



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

DIAGNÓSTICO DE ERROS DO MODELO HIDROLÓGICO ESTOCÁSTICO PREVIVAZ PARA PREVISÃO DE VAZÕES SEMANAIS NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Juan Pereira Colonese

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo

Co-orientador: Luciano Nóbrega Xavier

Rio de Janeiro

Março de 2014

DIAGNÓSTICO DE ERROS DO MODELO HIDROLÓGICO
ESTOCÁSTICO PREVIVAZ PARA PREVISÃO DE VAZÕES
SEMANAIS NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA
ELÉTRICO BRASILEIRO

Juan Pereira Colonese

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

Examinada por:

Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo, D.Sc.

Luciano Nóbrega Xavier, D.Sc.

Prof. Theophilo Benedicto Ottoni Filho, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2014

Colonese, Juan Pereira

Diagnóstico de erros do modelo hidrológico estocástico PREVIVAZ para previsão de vazões semanais no planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro/ Juan Pereira Colonese. – Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2014

xv, 123 p.; 29,7 cm

Orientador: Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo
Co-orientador: Luciano Nóbrega Xavier

Projeto de Graduação – UFRJ / POLI / Curso de Engenharia Ambiental, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 117-123

1.Previsão de Vazões; 2.Modelo estocástico PREVIVAZ
3.Modelagem Hidrológica; 4.Planejamento da Operação do SIN; 5.Modelagem de Séries Temporais de Vazões; I. Araujo, Afonso Augusto Magalhães de, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Diagnóstico de erros do modelo hidrológico estocástico PREVIVAZ para previsão de vazões semanais no planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro.

*Ao meu primeiro grande professor,
Altamiro Pereira, cujas
engenhocas e invenções sempre
me fascinaram. Onde quer que
esteja descansando, espero que
possa sentir orgulho e saiba que
se hoje sou quem eu sou, é
porque, vô, um dia quero ser
como você!*

Agradecimentos

Gostaria de dizer um muito obrigado a minha mãe Andrea e meu pai Rafael, já que sem eles nunca seria quem sou. Obrigado pelo apoio, compreensão e carinho incondicionais em todos os momentos de minha vida.

A minha Cris pelo amor, carinho, paixão, amizade, companheirismo e muito mais nesses anos passados juntos. E que após mais uma etapa cumprida, possamos compartilhar a realização de nossos próximos sonhos juntos.

Agradecimento especial a minha vó Auxiliadora, que além do apoio e carinho nunca escondeu o orgulho que tinha por mim e nunca se omitiu quando a ela recaia qualquer responsabilidade sobre mim. Vó só espero nunca te decepcionar.

Minha vida de estudante não teria sido a mesma sem o apoio de meu querido tio Paulo e os muitos livros emprestados e presenteados desde muito pequeno. Se hoje tenho interesse por ciência e tecnologia, você é sem dúvida um dos responsáveis. Tio, muito obrigado.

A Lili e Francesco, que são a prova viva da injustiça de nossa língua com as palavras madrasta e padrasto, muito obrigado pelo carinho, atenção, apoio e por me dar a oportunidade tardia, porém maravilhosa, de ter irmãos para amar. Então, agradeço também aos meus ainda pequenos irmãos Giuliana, Rafaela e David por me fazer voltar a ser criança.

A toda a família ainda não nominada e que tenho muito orgulho de fazer parte. A minha avó Dorotéia, meus tios Ayrton, Andrea, Beth, Isaias, André, Fernanda, Alexandre e Simone aos meus primos, Taísa, Ingrid, Bruno (também pelas muitas caronas ao Fundão), Ayrton e Matheus, muito obrigado por me ensinar a viver, amar e amado.

Muito obrigado ao Centro de Pesquisas de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), principalmente aos profissionais do DEA, pelo apoio e pela oportunidade de desenvolver meu trabalho de conclusão de curso durante meu período de estágio.

Muito obrigado ao meu orientador, mestre e amigo Luciano Xavier por abrir as portas do CEPEL, pelos ensinamentos e paciência, cuja falta teria tornado esse trabalho impossível.

Agradeço ao professor Afonso por embarcar nessa jornada sem pestanejar e muito contribuiu para que no final encontrássemos apenas sucesso.

Pelos inúmeros ensinamentos, apoio e pela contagiante vontade de se fazer pesquisa, agradeço imensamente ao amigo, hoje D.Sc., Ricardo Cesar. Se não tivesse esbarrado com você, as portas do Mestrado não teriam se aberto tão facilmente.

Agradeço aos meus amigos engenheiros ambientais Tomás, Bia, Ágatha, Luíza S., Nina, Bel, Isa, Camila, Mini, Nanda, Hélinah, Friburgo, Rafael “Kelah”, Rodrigo Peixoto, Rodrigo Amado, Diego, Pedro e Luíza M pelos maravilhosos 6 anos vividos na universidade com muitas alegrias e tristezas sempre harmonizadas com muitas cervejas e algumas aulas. Com vocês não foi nada doloroso, muito pelo contrário.

Por tornar meu período de estágio no CEPEL o mais prazeroso possível e pela amizade construída. Muito obrigado Felipe, Priscilla, Diego, Hugo, Yasmin, João e Adhara.

Agradeço a Universidade Federal do Rio de Janeiro e aqueles bons professores que a constituem. Pela oportunidade de ter sido um dos seus muitos alunos, pelo desenvolvimento pessoal e profissional e por ter tido a possibilidade de estudar durante um ano na Alemanha, muito obrigado. Espero poder fazer jus ao seu nome e tradição na prática profissional.

A todos aqueles que sentem que deveriam ter sido nominados, mas não foram, mil desculpas por minha memória e falta de modos; a culpa é toda minha. A vocês muito obrigado.

Este trabalho e tudo o que ele representa é de todos vocês.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

DIAGNÓSTICO DE ERROS DO MODELO HIDROLÓGICO ESTOCÁSTICO PREVIVAZ PARA PREVISÃO DE VAZÕES SEMANAIS NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Juan Pereira Colonese

Março/2014

Orientador: Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo

Co-orientador: Luciano Nóbrega Xavier

Curso: Engenharia Ambiental

O planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) deve garantir o melhor aproveitamento dos volumes armazenados nos reservatórios das usinas hidroelétricas, de modo a minimizar os custos operativos associados ao uso de combustíveis das usinas termoelétricas. Este problema possui uma forte dependência espacial e temporal, assim, uma decisão presente afeta diretamente a capacidade de geração do sistema no futuro. Devido à complexidade deste problema diversos modelos computacionais são utilizados em diferentes etapas deste processo. A cada etapa esses modelos consideram diferentes horizontes de planejamento, discretização temporal e graus de detalhamento do sistema. Como a geração no Brasil é preponderantemente hidráulica, as previsões das aflúências futuras são fundamentais para o planejamento da operação do SIN. Esse trabalho se concentrará nas previsões de vazões semanais utilizadas no planejamento de curto prazo e obtidas através do modelo estocástico PREVIVAZ, baseado na modelagem de séries temporais. Após transformação os dados da nova série seguem uma distribuição normal sendo possível, assim, obter os intervalos de confiança teóricos para o valor esperado (VE) das previsões. Objetiva-se avaliar a acurácia das previsões semanais realizadas pelo modelo PREVIVAZ como forma de subsidiar o aprimoramento do modelo. Foram selecionadas quatro bacias por representatividade dos aproveitamentos hidroelétricos do SIN a elas associados e são: (i) bacia do Paraná (Itaipu), (ii) bacia do Tocantins (Tucuruí), (iii) bacia Rio São Francisco (Sobradinho), (iv) bacia do Uruguai (Itá). A

avaliação dos erros foi efetuada em um período de cinco anos, através de dois testes: (i) avaliação dos erros no VE das previsões em comparação com aquelas observadas; e (ii) pela verificação se os dados observados estão contidos no intervalo de confiança teórico calculado. Os resultados mostraram que o modelo apresentou maiores erros, em ambos os testes, para o período chuvoso. Em relação às regiões analisadas, o subsistema Sul (bacia do Rio Uruguai) foi aquele no qual o modelo se mostrou menos acurado. As características dos erros verificados em cada bacia forneceram indícios para o aprimoramento da modelagem adotada.

Palavras-chave: Previsão de vazões; Modelagem hidrológica estocástica; Planejamento da operação energética.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

ERROR EVALUATION OF THE STOCHASTIC MODEL PREVIVAZ WEEKLY INFLOW FORECASTS IN BRAZILIAN POWER SYSTEM OPERATIONAL PLANNING

Juan Pereira Colonese

March/2014

Advisor: Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo

Co-Advisor: Luciano Nóbrega Xavier

Course: Environmental Engineering

The operational planning for the Brazilian National Interconnected Power System (SIN) should guarantee the better use of water storage in hydroplants' reservoirs in order to minimize total operational costs (due to thermoelectric plants' fuels usage). This problem has a strong spatial and time dependency, thus a present decision directly affects system's future generation capacity. Due to its high complexity, system operational planning is subdivided in three steps (medium term, short term and dispatch), to which one, models considering differently the system main characteristics in each planning horizon are used. The hydropower predominance on Brazilian Energy Matrix makes streamflow forecasts an issue of utmost importance. This project will focus on the weekly inflow forecasts used at the short-term planning and performed by PREVIVAZ stochastic model, which is based on time series modeling. After a suitable transformation, the inflow series are normally distributed and the expected value (VE) as well as its theoretical confidence interval can be obtained. Aiming at supporting model improvement, PREVIVAZ's weekly forecasts were evaluated. Inflow series to four major Brazilian hydro plants were chosen due to its importance in representing SIN subsystems. They were: (i) Paraná river basin (Itaipu hydroplant); (ii) Tocantins river basin (Tucuruí hydroplant); (iii) São Francisco river basin (Sobradinho hydroplant); and (iv) Uruguai river basin (Itá hydroplant). The error evaluation was performed for a five years period through two tests: (i) Error evaluation comparing forecasts and observed inflows; (ii) Verification if observed data were within calculated confidence intervals. Results showed that errors were higher for rainy seasons in both tests. In

terms of analyzed sites, Southern subsystem (Itá) presented higher errors than the others ones. Error main patterns revealed by the study provided valuable hints that should guide model further improvement.

Keywords: River flow forecast; Stochastic hydrological modeling; Energy operational planning.

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura da Organização Textual	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Sistema Elétrico Brasileiro.....	5
2.1.1. Introdução.....	5
2.1.2. Mercado de energia elétrica.....	13
2.1.3. Operação do Sistema Hidrotérmico Brasileiro.....	15
2.1.4. Cadeia de Modelos CEPEL para o planejamento da operação.....	22
2.2. Engenharia e Modelagem Hidrológica	28
2.2.1. Considerações Iniciais	28
2.2.2. Modelos Determinísticos.....	31
2.2.3. Modelos Estocásticos	33
2.2.4. Desafios na Modelagem Hidrológica.....	38
2.2.5. Conclusões Gerais.....	46
3. Metodologia	48
3.1. Modelo PREVIVAZ.....	48
3.1.1. Modelo Conceitual e o Planejamento da Operação do SIN.....	48
3.1.2. Modelo Matemático.....	52
3.1.3. Estimção dos Parâmetros	53
3.1.4. Escolha do “melhor” Algoritmo	55
3.1.5. Transformações aplicadas às séries e intervalo de confiança.....	56
3.2. Índices estatísticos para caracterização dos registros de vazão.....	57
3.3. Avaliação do Desempenho do Modelo	60
4. Caracterização das Bacias Estudadas.....	62
4.1. UHE Itá – Bacia do Uruguai.....	62
4.2. UHE Itaipu – Bacia do Paraná.....	66
4.3. UHE Sobradinho – Bacia do São Francisco	71
4.4. UHE Tucuruí - Bacia do Tocantins-Araguaia	76
5. Resultados e Discussão	81
5.1. Caracterização dos registros históricos de vazões.....	81

5.1.1. Séries de Vazões Naturais.....	81
5.1.2. Assimetria das Distribuições.....	90
5.1.3. Coeficientes de Autocorrelação.....	92
5.2. Análise geral dos erros de previsão.....	96
5.3. Acurácia dos Intervalos de Confiança Teóricos.....	105
5.4. Síntese dos resultados.....	111
6. Conclusões e recomendações.....	114
7. Bibliografia.....	117

Índice de Figuras

Figura 1. Produção de Energia Elétrica no Brasil (IEA, 2013; EPE, 2013).	2
Figura 2. Custo de desenvolvimento por MWh gerado de energia elétrica no Brasil por diferentes alternativas tecnológicas. Fonte: adaptado de BARROSO <i>et al.</i> (2008)	6
Figura 3. Integração Eletroenergética. Fonte: http://www.ons.org.br	7
Figura 4. Bacias Hidrográficas do Brasil e UHE's com potência instalada maior de 1.000 MW.	9
Figura 5. Diagrama esquemático das usinas do SIN. Fonte: www.ons.org/conheca_sistema/mapas_sin.aspx	12
Figura 6. Modelo de Organização do Setor Elétrico Brasileiro. (adaptado de SILVA, 2001).	15
Figura 7. Possíveis decisões operativas, incerteza hidrológica e suas consequências.	17
Figura 8. Funções de Custos Imediato (FCI), Futuro (FCF) e Custo Total (CT) em função do armazenamento no fim do período com destaque ao ponto de operação ótima ou custo total mínimo hipotético.	18
Figura 9. PLD médio para subsistema Sudeste de maio de 2003 a janeiro de 2014... 20	
Figura 10. Intercâmbio (MWh) entre os Subsistemas do SIN para a terceira semana de fevereiro de 2014 e patamar de carga pesado (Fonte: http://www.ons.org.br).	21
Figura 11. Energia Natural Afluente no subsistema Sudeste a partir de janeiro 2000. (Fonte: http://www.ons.org.br).....	22
Figura 12. Energia Armazenada para o subsistema Sudeste a partir de janeiro de 2000. (Fonte: http://www.ons.org.br).....	22
Figura 13. Relações entre os Modelos Hidrológicos no Planejamento da Operação do SIN.	25
Figura 14. Esquema do cronograma das previsões de vazões para o PMO e modelos utilizados, usualmente, em cada etapa. (Adaptado de ONS, 2012).	26
Figura 15. Etapas do Planejamento da Operação Energética e Despacho do Sistema. (adaptado de SILVA, 2001).....	27
Figura 16. Nilômetro e possíveis leituras (DOOGE, 1988).	29
Figura 17. Ciclo Hidrológico generalizado (RAMOS, 1989).....	30
Figura 18. Esquema de estimação dos parâmetros e escolha da alternativa de modelagem. Em azul dados de entrada, em verde o processo de estimação dos parâmetros e composição do erro médio, em violeta os produtos deste processo.....	56
Figura 19. Diagrama explicativo do teste de acurácia para os intervalos de confiança.	61
Figura 20. Bacia Hidrográfica do Uruguai.	63
Figura 21. Bacia Hidrográfica do Paraná excluindo-se a Sub-bacia do Paraguai.....	70
Figura 22. Bacia Hidrográfica do São Francisco.	73
Figura 23. Bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia.	78
Figura 24.Registro Histórico de Vazões para a UHE Itá - 1940 a 2008.....	81
Figura 25. Série Histórica Semanal para o posto de Itá.	82
Figura 26. Médias (-), Máximos (- -) e Mínimos (- -) Anuais para posto de Itá.	83
Figura 27. Registro Histórico de Vazões para a UHE Itaipu - 1931 a 2008.	84
Figura 28. Série Histórica Semanal para Itaipu com destaque para os valores extremos no período usualmente mais seco.	85

Figura 29. Médias (–), Máximos (– –) e Mínimos (– –) Anuais para posto de Itaipu.	85
Figura 30. Registro Histórico de Vazões para a UHE Sobradinho - 1931 a 2008.....	86
Figura 31. Série Histórica Semanal para Sobradinho.....	87
Figura 32. Médias (–), Máximos (– –) e Mínimos (– –) Anuais para posto de Sobradinho.	88
Figura 33. Registro Histórico de Vazões para a UHE Tucuruí - 1970 a 2008.....	88
Figura 34. Série Histórica Semanal para Tucuruí.....	89
Figura 35. Médias (–), Máximos (– –) e Mínimos (– –) Anuais para posto de Tucuruí.	90
Figura 36. Frequência absoluta de semanas em cada categoria de assimetria. (A) Assimétrico; (SS) Simétrico; (P) Positivo; (N) Negativo; (FO) Forte; (MO) Moderado; (FR) Fraco.	91
Figura 37. Coeficientes de Assimetria por posto.	92
Figura 38. Coeficientes de Autocorrelação para Itá (92) e Itaipu (266).	93
Figura 39. Coeficientes de Autocorrelação para Tucuruí (275) e Sobradinho (168).	94
Figura 40. Razão entre Vazão no tempo t e em $t-1$ e $t-2$ para semanas selecionadas do registro de vazões de Itá.	95
Figura 41. Razão entre Vazão no tempo t e em $t-1$ e $t-2$ para semanas selecionadas do registro de vazões de Tucuruí.....	95
Figura 42. Vazão Observada (azul) e Vazão prevista (vermelho) para Itá e Itaipu.	97
Figura 43. Vazão Observada (azul) e Vazão prevista (vermelho) para Sobradinho e Tucuruí.	98
Figura 44. Erros para a previsão da primeira semana para o posto de Itá com destaque para o erro médio (59%) ao longo do período.....	98
Figura 45. Erros em valores absolutos e separados por semana com envoltórias de máximos, mínimos e médias semanais para Itá.....	99
Figura 46. Erros para a previsão da primeira semana para o posto de Itaipu com destaque ao erro médio (13%) ao longo do período.	100
Figura 47. Erros em valores absolutos e separados por semana com envoltórias de máximos, mínimos e médias semanais para Itaipu.	101
Figura 48. Erros para a previsão da primeira semana para o posto de Sobradinho com destaque ao erro médio (18%) no período.	102
Figura 49. Erros em valores absolutos e separados por semana com envoltórias de máximos, mínimos e médias semanais para Sobradinho.	103
Figura 50. Erros para a previsão da primeira semana para o posto de Tucuruí com destaque para o erro médio (8%) para o período.....	104
Figura 51. Erros em valores absolutos e separados por semana com envoltórias de máximos, mínimos e médias semanais para Tucuruí.....	105
Figura 52. Intervalos de confiança e vazão observada para Itá.	106
Figura 53. Intervalos de confiança e vazão observada para Itaipu.....	107
Figura 54. Intervalos de confiança e vazão observada para Sobradinho.	107
Figura 55. Intervalos de confiança e vazão observada para Tucuruí.	108
Figura 56. Distâncias percentuais da vazão observada em relação aos limites dos intervalos de confiança para Itá (esquerda) e Itaipu (direita) agrupados por semana.	110
Figura 57. Distâncias percentuais da vazão observada em relação aos limites dos intervalos de confiança para Sobradinho (esquerda) e Tucuruí (direita) agrupados por semana.....	111

Índice de Tabelas

Tabela 1. Características selecionadas dos subsistemas do SIN (Fonte: www.ons.org.br).....	8
Tabela 2. Grandes bacias brasileiras e a hidroeletricidade.	11
Tabela 3. Características da Cadeia de Modelos Energéticos do CEPEL.....	24
Tabela 4. Algoritmos de Previsão no PREVIVAZ. (CEPEL, 2001)	55
Tabela 5. Características Hidrometeorológicas por sub-região da bacia do São Francisco (MMA, 2006b).....	75
Tabela 6. Frequência e Magnitude de erros para os intervalos de confiança.....	109

1. Introdução

1.1. Contextualização

Desde a pilha de Alessandro Volta até os celulares de hoje em dia, o mundo moderno se acostumou às benesses proporcionadas pelo avanço da ciência acerca dos fenômenos elétricos e hoje, equipamentos que se utilizam desta tecnologia, fazem parte do cotidiano das pessoas. O aumento de qualidade de vida promovido pela possibilidade de se consumir energia elétrica é fato notório em qualquer pesquisa econômica, sendo utilizado inclusive o consumo de energia utilizado como indicador de desenvolvimento econômico de cidades, regiões ou países. Dessa forma, não se imagina um futuro sem eletricidade e assim, tanto o aumento de confiabilidade e qualidade dos sistemas existentes quanto a expansão do acesso às pessoas não conectadas à rede, são imprescindíveis para o desenvolvimento de um país melhor.

No Brasil a geração de energia elétrica possui características únicas, quando comparada com a de outros países do mundo. Aproximadamente 77% (455,6 TWh) da energia elétrica produzida no país em 2012 proveio das hidroelétricas espalhadas por todo o território nacional. Nesse ano a participação da geração hídrica foi relativamente pequena, devido às condições hidrológicas desfavoráveis. Em um ano mais próximo do comportamento padrão, a participação da hidroeletricidade na matriz elétrica brasileira pode chegar a 82%, como em 2011 (EPE, 2013).

A complementação do sistema gerador é feita com usinas termelétricas a gás (7,9%), biomassa (6,8%), petróleo e derivados (3,3%) e carvão (1,6%) e usinas nucleares (2,7%) – que, em essência, são usinas térmicas, ou seja, utilizam um combustível para gerar calor, mover uma turbina e transformar essa energia em eletricidade (EPE, 2013). Destaca-se ainda a já significativa presença de geração eólica na matriz elétrica brasileira (0,9%) com tendência de crescimento (EPE, 2013). A Figura 1 mostra a evolução histórica a partir de 1990 da geração elétrica no Brasil e a participação das diversas fontes de geração no sistema brasileiro (dados obtidos junto à Agência Internacional de Energia, IEA (2013), e ao Balanço Energético Brasileiro de 2013 elaborado pela Empresa de Pesquisas Energéticas, EPE (2013)).

Pode-se afirmar, portanto, que a geração de energia elétrica no Brasil depende basicamente das vazões naturais afluentes nas bacias correspondentes aos aproveitamentos hidrelétricos, que constituem o Sistema Interligado Nacional (SIN). Da operação deste sistema hidrotérmico emergem diversas questões relativas, principalmente, à inconstância das afluências e a falta de informação precisa sobre sua ocorrência ou não em quantidades suficientes à operação do sistema.

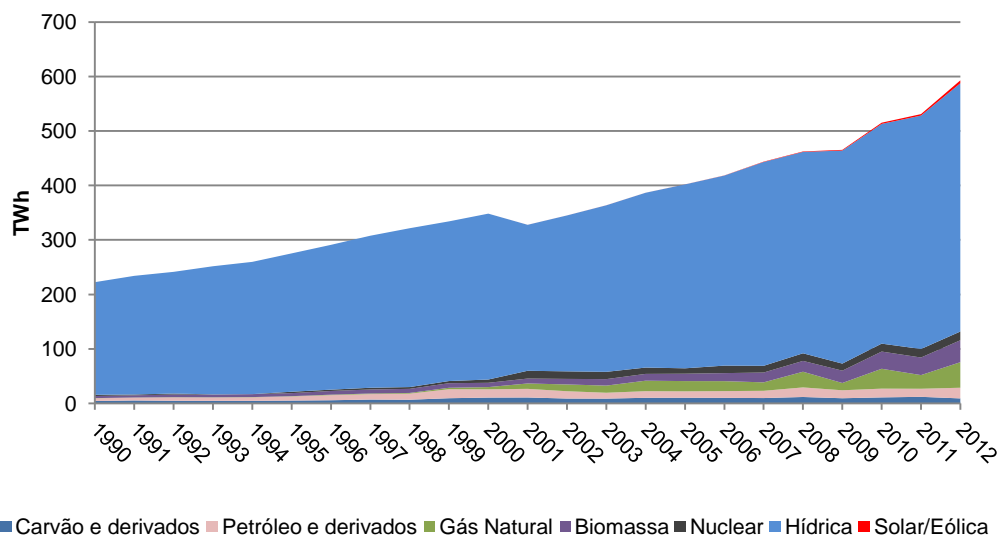


Figura 1. Produção de Energia Elétrica no Brasil (IEA, 2013; EPE, 2013).

Devido à irregularidade inerente ao fenômeno hidrológico, para complementar o sistema de geração há ainda reservatórios de acumulação, cuja função é essencialmente de regularização das vazões afluentes, ou seja, armazena água nos períodos de maiores vazões para ser utilizada nos períodos mais secos do ano. A capacidade de armazenamento hoje disponível permite não só a regularização intra-anual do sistema, como também, protege o mesmo de uma possível sequência de anos secos, ou regularização plurianual do sistema (COSTA *et al.*, 2007).

Nesse contexto, pode-se considerar que a água – “combustível” para geração hídrica – não possui custo associado ao seu uso. Entretanto, o mesmo não pode ser dito em relação aos diferentes combustíveis utilizados nas usinas térmicas de complementação e o custo da geração de eletricidade está associado principalmente ao preço e a quantidade de combustível utilizada nessas usinas (FORTUNATO *et al.*, 1990). Assim, a operação de um sistema hidrotérmico de produção de energia elétrica, que busca o menor preço final de energia, deve utilizar a menor quantidade de fontes térmicas em detrimento aos recursos hídricos.

Considerando as dimensões continentais do Brasil e as diferenças regionais em termos de produção e demanda por eletricidade, o problema de se alocar da melhor maneira possível, no tempo e espaço, os recursos disponíveis é extremamente complexo. Assim, diversos modelos computacionais são utilizados em várias etapas do planejamento da operação deste sistema, sejam eles de otimização energética, controle de tensões, análise de redes entre outros.

No planejamento da operação do SIN os modelos de otimização energética dão as diretrizes a serem tomadas em diferentes horizontes de tempo. Para tal, estes

modelos utilizam, entre outras, a previsão de vazões do período de interesse como informação primordial. Considerando a incerteza quanto às afluências futuras e a importância desta informação na operação do sistema, pode-se afirmar que a modelagem hidrológica possui um papel chave no planejamento adequado do SIN e o aprimoramento da qualidade de suas previsões deve ser sempre procurado.

Dentre os diversos modelos hidrológicos utilizados neste processo destaca-se o PREVIVAZ, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) para previsão de vazões semanais, cujos resultados são usados na programação mensal da operação do sistema brasileiro. O PREVIVAZ é um modelo hidrológico estocástico de séries temporais, ou seja, utiliza apenas o histórico de vazões passadas para estimação de seus parâmetros e previsão das vazões para até seis semanas a frente.

Há grande interesse por parte do CEPEL no aprimoramento deste modelo, principalmente por sua importância dos estudos do planejamento da operação do SIN no horizonte de curto prazo. Por exemplo, a definição do preço de comercialização de energia (como será discutido ao longo do trabalho) depende das previsões do modelo. Assim, é notório que aumentar a confiabilidade das previsões realizadas pelo PREVIVAZ trará grandes ganhos para o planejamento da operação do SIN e, portanto, é nesse contexto e com essa motivação que este trabalho foi desenvolvido.

1.2. Objetivos

Considerando o exposto acima, o trabalho em tela se dedica a análise dos erros das previsões do modelo PREVIVAZ para alguns postos associados a aproveitamentos hidroelétricos representativos do SIN, como forma de subsidiar o acompanhamento da qualidade das previsões e o aprimoramento do modelo. Para tal, além da análise de erros, serão analisadas estatisticamente as séries históricas dos postos escolhidos com intuito de identificar características e padrões, que potencialmente interfiram no processo de previsão de vazões pelo método adotado.

Além de seu objetivo principal, este trabalho buscará ao longo de seu desenvolvimento cumprir com outros objetivos parciais:

- Contribuir para o preenchimento de uma lacuna na literatura com uma revisão bibliográfica acerca da modelagem hidrológica estocástica em uma perspectiva integradora com modelos determinísticos.

- Avaliar potenciais procedimentos para o desenvolvimento de uma avaliação sistemática e contínua da qualidade das previsões dos modelos hidrológicos do CEPEL e que possibilite uma comparação mais sólida com os demais modelos utilizados no setor elétrico.
- Quantificar de maneira idônea e mais clara os erros do PREVIVAZ.
- Ser um registro das avaliações dos modelos do CEPEL e um documento de referência inicial para a avaliação da qualidade de modelos hidrológicos no setor elétrico.

1.3. Estrutura da Organização Textual

Este trabalho está dividido de forma a contemplar, de maneira mais detalhada, os principais assuntos julgados importantes para o cumprimento dos objetivos acima citados. Portanto o capítulo 2 trará uma revisão bibliográfica dividida em dois eixos principais e que buscam cercar da melhor maneira possível a áreas do conhecimento envolvidas nesse trabalho. São elas: (i) Apresentação do setor elétrico brasileiro e como ele se organiza atualmente, com foco ao planejamento da operação do SIN; ii) Revisão bibliográfica sobre a modelagem hidrológica, seu desenvolvimento e principais limitações e fontes de erro.

O capítulo 3 apresenta a metodologia adotada para realização do estudo. Inicialmente uma descrição mais detalhada dos métodos utilizados pelo modelo PREVIVAZ é apresentada. Seguidamente são apresentados os índices estatísticos utilizados para caracterização das séries históricas de vazão. Por fim, é apresentado o método de avaliação dos erros do modelo.

No capítulo 4 são apresentadas as áreas de estudo escolhidas por uma breve caracterização geral. O capítulo 5 se dedica a apresentação e discussão geral dos resultados obtidos no estudo. Tanto os resultados acerca da caracterização das séries de vazões, quanto àqueles relacionados à avaliação dos erros do modelo para cada um dos locais estudados são apresentados neste capítulo.

O capítulo 6 apresenta as principais conclusões obtidas através do estudo, assim como traz recomendações gerais sobre o aprimoramento e extensão das análises aqui realizadas. No capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas consultadas para realização do trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Sistema Elétrico Brasileiro

2.1.1. Introdução

Em uma sociedade moderna o acesso aos serviços de infraestrutura, como saneamento básico, transportes, telecomunicações e energia elétrica são determinantes para o bem-estar das pessoas. Dessa forma, a indústria da eletricidade trabalha tanto para aumentar o acesso da população ao serviço, quanto para buscar formas mais eficientes e de melhor qualidade na produção e uso dos recursos energéticos disponíveis.

Para atender aos critérios de qualidade e preço requeridos pelo mercado, os sistemas de energia elétrica assim como qualquer outra indústria além de produzir, devem também levar seus produtos e serviços ao mercado consumidor. São definidos assim os três componentes básicos de um sistema de energia elétrica: (i) Geração; (ii) Transmissão; e (iii) Distribuição.

Os meios de produção correspondem aos diferentes equipamentos necessários à produção de energia elétrica a partir de diferentes matérias-primas e técnicas. Para o Brasil as principais fontes de geração de energia elétrica estão apresentadas na Figura 1. Os meios de transporte correspondem às linhas de transmissão e subestações, que fazem a ligação entre as usinas geradoras e os centros consumidores de energia. Os meios de consumo dessa energia correspondem ao conjunto de cargas dos diferentes tipos de consumidores, que recebem a energia em baixa tensão (127 ou 220V) pelo sistema de distribuição.

Os dois primeiros componentes do sistema elétrico brasileiro juntos formam o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN), que é a principal obra de infraestrutura de integração do país, ligando através das linhas de transmissão as usinas e centros de carga das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Esta última, por dificuldades de acesso, grandes distâncias e baixa densidade demográfica é atendida em sua maior parte pelos Sistemas Isolados, porém com planos de integração ao resto do país em um futuro próximo de grandes aproveitamentos hidroelétricos na bacia do Amazonas, como Santo Antônio Jirau, Belo Monte e Teles Pires. Os grandes investimentos no SIN e em programas governamentais (Bolsa família – <http://www.mds.gov.br/bolsafamilia> – e Luz para Todos – <http://www.mme.gov.br/luzparatodos> – que garantiram maior infraestrutura e poder de consumo às comunidades isoladas) de ampliação de acesso ao sistema

fazem com que, no Brasil, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no ano de 2008, 95% da população brasileira estivesse ligada à rede elétrica.

O responsável pela coordenação, planejamento e controle da operação do SIN é o Operador Nacional do Sistema (ONS), cujas atribuições legais o faz desenvolver uma série de estudos e ações pautadas por diversas diretrizes elaboradas em conjunto aos agentes do sistema e o próprio ONS e ratificado pela ANEEL. Cabe ao ONS definir o despacho – quais usinas devem operar e quais devem ficar de reserva de modo a manter, permanentemente, o volume de produção igual ao de consumo – e as possíveis trocas (intercâmbio) entre os diversos subsistemas interligados.

A integração do SIN garante uma forte complementaridade de todo o sistema, diminuindo os riscos de não atendimento aos critérios de operação. A Figura 2 mostra o preço estimado por BARROSO *et al.* (2008) para o custo de produção em um novo empreendimento de geração elétrica segundo diferentes alternativas tecnológicas. Assim, pode-se afirmar, que o preço da energia gerada e paga pelo consumidor é reflexo direto do tipo de usina utilizada e, portanto, a definição do despacho com favorecimento à geração hídrica é fundamental para se obter o menor preço final possível. Ressalta-se ainda que, os custos mostrados na figura 2, estão associados a um cenário de expansão do sistema. Considerando apenas o processo de produção de energia, as fontes hidroelétricas possuem custo indireto positivo, baseado na geração térmica evitada. Esta última com altos custos de geração associados ao uso de combustível.

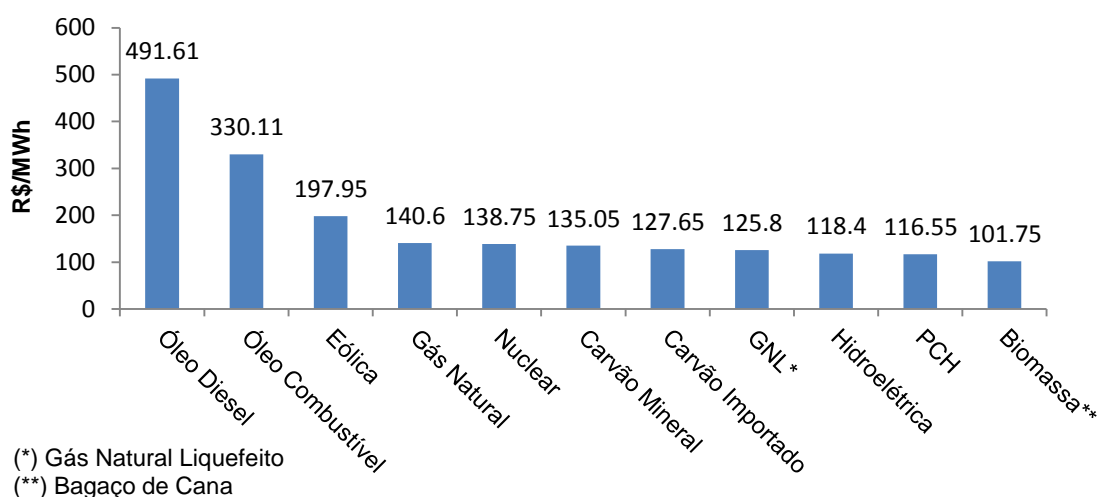


Figura 2. Custo de desenvolvimento por MWh gerado de energia elétrica no Brasil por diferentes alternativas tecnológicas. Fonte: adaptado de BARROSO *et al.* (2008)

Além disso, as diferenças climáticas e geográficas entre as regiões brasileiras exigem muitas vezes que certas usinas, localizadas em bacias sob um período de estiagem, devam ter sua geração complementada por outras, que estejam em condições hidrológicas mais favoráveis, preservando assim o “estoque de energia elétrica”, esta é a chamada complementaridade hidrológica do sistema. A Figura 3 representa a integração eletroenergética entre as diferentes regiões geradoras e consumidoras, além de mostrar os potenciais de complementaridade presentes no sistema.

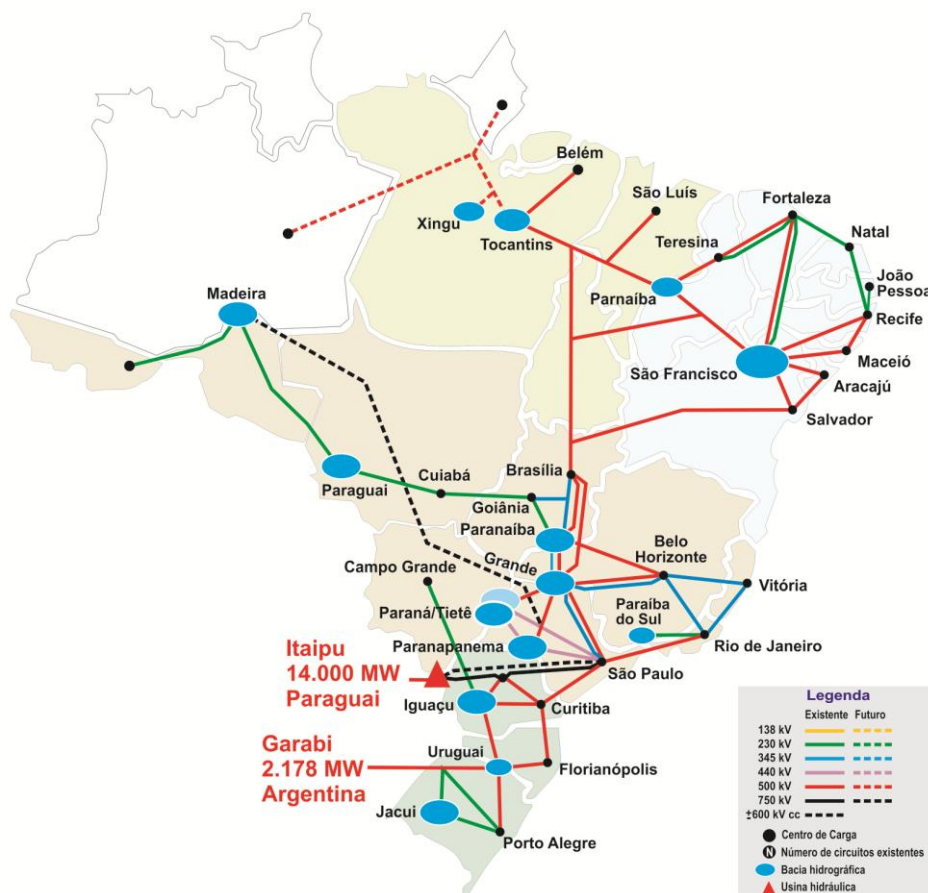


Figura 3. Integração Eletroenergética. Fonte: <http://www.ons.org.br>

De acordo com seus respectivos níveis de demanda, distância geográfica e unidades geradoras, o SIN é dividido em quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte (Figura 3). O subsistema Sudeste/Centro-Oeste é onde está maior parte da demanda por energia do país e mesmo que tenha uma grande capacidade instalada, necessita dos excedentes de produção das outras sub-regiões para suprir toda sua carga (Tabela 1), composta, principalmente, pela presença de muitas indústrias e das maiores cidades do país. A maior parte da área deste

subsistema está inserida na bacia do rio Paraná (incluindo a bacia do Paraguai), mas também, contempla áreas do alto São Francisco, em Minas Gerais e parte da bacia Atlântico Leste, nos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Essa região possui um grande potencial hídrico e foi a primeira a ser explorada para geração hidroelétrica no país. Assim, como pode ser visto na Figura 4, esta é a região com maior número de aproveitamentos hidroelétricos de grande porte de todo o Brasil, dos quais se destacam: Furnas, Marimbondo, Água Vermelha na sub-bacia do rio Grande; Emborcação, Itumbiara e São Simão na sub-bacia do rio Parnaíba; e Jupiá e Porto Primavera na sub-bacia do rio Paraná. Além dos aproveitamentos hidroelétricos, essa região possui grande quantidade de usinas térmicas a gás, óleo e de biomassa (principalmente bagaço de cana no interior de São Paulo).

Tabela 1. Características selecionadas dos subsistemas do SIN (Fonte: www.ons.org.br).

Subsistema	Capacidade Máxima Instalada (MW/Mês)	Geração Hidroelétrica 2013 (GWh)	Carga de Demanda 2013 (MWh/h)	Principais Sub-bacias geradoras (Códigos ANA)
Sul	19.873	78.492,0	167.964,6	Iguaçu (65) Jacuí (85) Uruguai (7-)
Sudeste/ Centro-Oeste	201.717	168.328,6	546.509,9	Paranaíba (60) Grande (61) Paranapanema (64)
Nordeste	51.859	33.990,8	134.294,4	São Francisco (4-)
Norte	14.267	44.941,8	63.270,9	Tocantins (2-)

O subsistema Sul é o segundo com maior capacidade instalada (19.873 MW/mês hidráulica, excluindo-se a potência de Itaipu) e por ser uma região industrialmente desenvolvida, também apresenta uma demanda por energia elevada. As bacias do rio Uruguai e Atlântico Sudeste estão contidas nesse subsistema, assim como, o Sul da bacia do Paraná (sub-bacia do Iguaçu). Há intensa exploração de recursos hídricos para geração de energia elétrica, principalmente na bacia do Uruguai, com as usinas de Machadinho e Itá. Nesta região se encontram as únicas usinas térmicas a carvão mineral do país, uma vez que a região Sul de Santa

Catarina, próximo a Criciúma, e o Norte do Rio Grande do Sul são ricas bacias carboníferas.

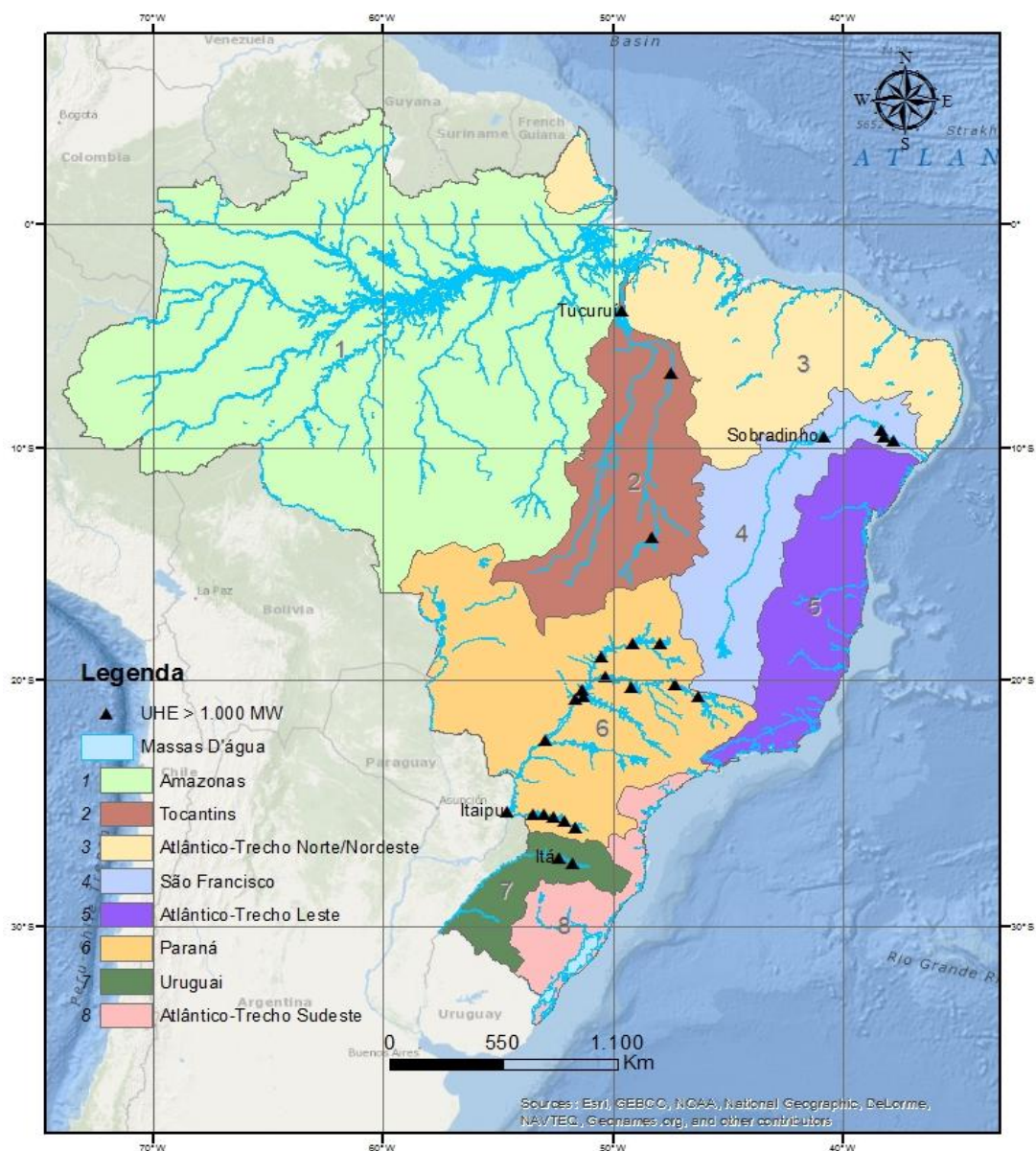


Figura 4¹. Bacias Hidrográficas do Brasil e UHE's com potência instalada maior de 1.000 MW.

A Tabela 2 apresenta algumas características selecionadas acerca dos aproveitamentos hidroelétricos nas grandes bacias brasileiras e serão, eventualmente, retomadas ao longo do texto. Para algumas dessas bacias (Uruguai, Paraná,

¹ Mapa elaborado pelo autor através do uso do *software* ArcGis 10.1 para gerenciamento de banco de dados geográficos. Para esse mapa os dados foram coletados em plataformas públicas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Agência Nacional de Águas (ANA).

Tocantins-Araguaia e São Francisco) uma apresentação mais detalhada de outros aspectos marcantes em cada região será feita ao longo do capítulo 4.

Já a Figura 5 apresenta todos os aproveitamentos hidroelétricos componentes do SIN divididos por bacias e com destaque para seus respectivos os agentes operadores, tipo de reservatório e potência instalada. Até mesmo aqueles em fase de construção, com suas respectivas estimativas de entrada em operação, estão mostrados.

Tabela 2. Grandes bacias brasileiras e a hidroeletricidade.

Bacias	Cod. Bacias ANA	Principais Usinas	Capacidade Instalada 2013 (MW/Hídrica)***	Potencial Hidroelétrico Total estimado (MW) ***	Principais Reservatórios	Situação Atual* dos Reservatórios (%)
Amazonas	1	Belo Monte** Santo Antônio Jirau Teles Pires**	8.447,4	95.391,81	Santo Antônio	-
Tocantins/Araguaia	2	Tucuruí Estreito Serra da Mesa	13.193,3	26.452,59	Serra da Mesa Tucuruí	32,6 90,0
Atlântico Norte/Nordeste	3	Boa Esperança	335,3	2.807,79	Boa Esperança	-
São Francisco	4	Sobradinho Paulo Afonso Xingó	10.717,7	22.581,67	Sobradinho Três Marias	52,7 23,7
Atlântico Leste	5	Nilo Peçanha Funil	5.390,1	14.001,66	Funil	-
Paraná	6	Itaipu Água Vermelha Marimbondo Furnas	43.301,9	62.923,38	Furnas Nova Ponte Emborcação Itaipu	39,1 30,7 39,5 -
Uruguai	7	Itá Machadinho Foz do Chapecó	6.308,9	11.525,96	Passo Fundo	93,0
Atlântico Sudeste	8	Itaúba Monte Claro	3.697,8	10.102,51	Passo Real	71,5

*16 de fevereiro de 2014.

** Em construção.

*** SIPOT/ELETROBRAS, Dezembro 2013.

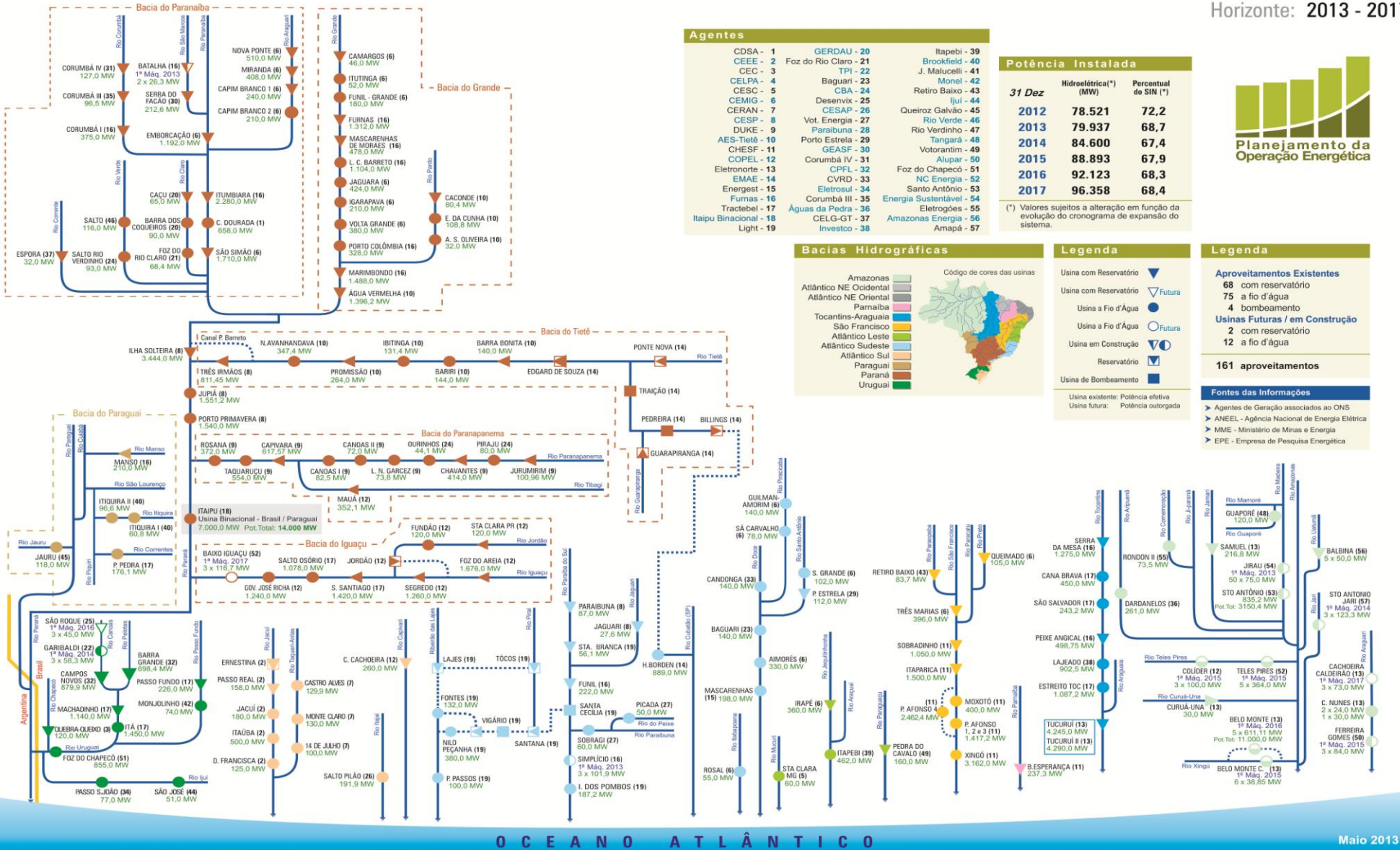


Figura 5. Diagrama esquemático das usinas do SIN. Fonte: www.ons.org/conheca_sistema/mapas_sin.aspx

2.1.2. Mercado de energia elétrica

Como as decisões tomadas no âmbito operativo influenciam diretamente o preço de comercialização da energia elétrica é interessante gastar algumas linhas acerca do funcionamento desse segmento do setor elétrico. Porém, antes de focar nos procedimentos que caracterizam o mercado de energia elétrica, um breve histórico da recente reestruturação do setor se faz necessário.

Antes da reforma iniciada em 1995, o controle sobre todas as facetas do setor elétrico foi, durante mais de 50, anos completamente estatal. As operadoras eram controladas pela União ou estados (subsidiárias da Eletrobras) e as atividades verticalizadas, ou seja, as mesmas empresas atuavam em geração, transmissão e distribuição. Inicialmente, a Eletrobras atuava principalmente como uma organização financiadora para suas subsidiárias, entretanto, com o passar do tempo, assumiu também as atividades de planejamento e operação do sistema (TERRY *et al.*, 1986).

A partir de 1995 se iniciou o processo de reestruturação do setor. As principais alterações se deram no sentido da desverticalização do mercado, ou seja, exigiu-se a dissociação das empresas responsáveis pela geração, transmissão e distribuição. Hoje, o mercado se organiza de forma que as atividades de transmissão e distribuição permaneçam como monopólios naturais, porém, com regulação técnica e econômica realizada por ONS e ANEEL, respectivamente. Já nas atividades de comercialização e geração se teria, idealmente, a livre competição entre os agentes da indústria. Para o adequado funcionamento deste mercado é imprescindível que estes agentes tenham livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição (SILVA, 2001).

Assim, o modelo institucional do setor elétrico passou por duas grandes mudanças desde a década de 90. A primeira começou com a Lei 9.427 de dezembro de 1996, que criou a ANEEL como órgão regulamentador do setor e determinou que a concessão para exploração dos potenciais hidráulicos fosse feita através de concorrência ou leilão, onde o maior valor oferecido pela outorga do uso da água se tornaria vencedor. Além disso, as mudanças seguiram com a privatização das companhias operadoras, mudando assim, o antigo cenário de monopólio estatal presente em todos os componentes do sistema brasileiro (ANEEL, 2008).

A segunda fase da reestruturação começou em 2004 quando foi alterado o critério para concessão de novos empreendimentos de geração. Passou-se a adotar o menor preço da energia produzida como fator preponderante para se vencer os leilões. Esses leilões são organizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e realizados para usinas outorgadas pela ANEEL e que se enquadrem

no planejamento de expansão realizado pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE).

Essas mudanças tiveram como objetivos principais: (i) garantir a segurança no suprimento; (ii) promover a modicidade tarifária (menor preço); (iii) e promover a inserção social através dos programas de universalização do acesso a energia elétrica (ANEEL, 2008; SILVA,2001).

Em termos de mercado, foram criados dois novos ambientes de compra e venda de energia: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL). No primeiro são realizados os leilões de energia elétrica organizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), os quais são a única forma de contratação de grandes quantidades de energia no longo prazo por parte das empresas distribuidoras. Tais contratos são realizados diretamente com empresas geradoras ou através de agentes de comercialização independentes.

No mercado livre, apenas as geradoras enquadradas como Produtores Independentes de Energia (PIE) e consumidores com demanda para uso próprio maior que 0,5 MW podem transacionar. Cumpridas as exigências, as partes entram em acordo quanto às cláusulas do contrato, como preço, prazos e condições de entrega (ANEEL, 2008). Aqueles consumidores com demanda superior ou igual a 3MW (consumidores livres em contraponto aos consumidores cativos) podem optar a participar, ou não, do mercado livre e tomar para si a responsabilidade de gerir suas compras e os riscos associados.

Há ainda um terceiro tipo possível de transação, esta, porém, de prazo mais curto. Usualmente, existe um hiato entre os volumes comercializados e as exigências de curto prazo devido, principalmente, às incertezas inerentes às projeções de consumo e geração sob as quais esses são realizados. Considerando ainda os vários anos pelos quais esses contratos podem durar, é de se compreender que diferenças entre a energia contratada e aquela de fato produzida possam existir. Dessa forma, a CCEE promove a comercialização de quantidades de energia não contempladas em contratos bilaterais no chamado mercado *spot*. Nesse caso, o preço depende das condições de mercado no momento da transação, ou seja, do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) do sistema hidrotérmico, que será melhor apresentado na próxima seção. Há ainda outro ente na organização do setor elétrico brasileiro, cuja responsabilidade recai sobre o planejamento da expansão do sistema. Atualmente a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é o órgão que elabora os estudos de longo prazo norteadores dos investimentos no sistema, elabora o plano decenal de energia e faz o acompanhamento do balanço energético brasileiro anualmente. Esses estudos

indicam o caminho a ser seguido para a expansão do sistema e acabam por influenciar diretamente os leilões de energia elétrica.

Destacam-se ainda as atuações do ONS – como agente determinativo em relação às instruções de despachos sobre os geradores e transmissores – e da ANEEL, que tem como atribuição, fixar preços para os consumidores cativos e para os serviços de natureza monopolista. Além disso, compete à ANEEL estabelecer padrões de qualidade, que estimulem a eficiência econômica da indústria e a universalização do serviço, evitando abusos na estrutura de custos do sistema (SILVA, 2001).

A figura 6 mostra, esquematicamente, o mercado de energia elétrica, assim como, suas interfaces com os demais agentes setoriais.

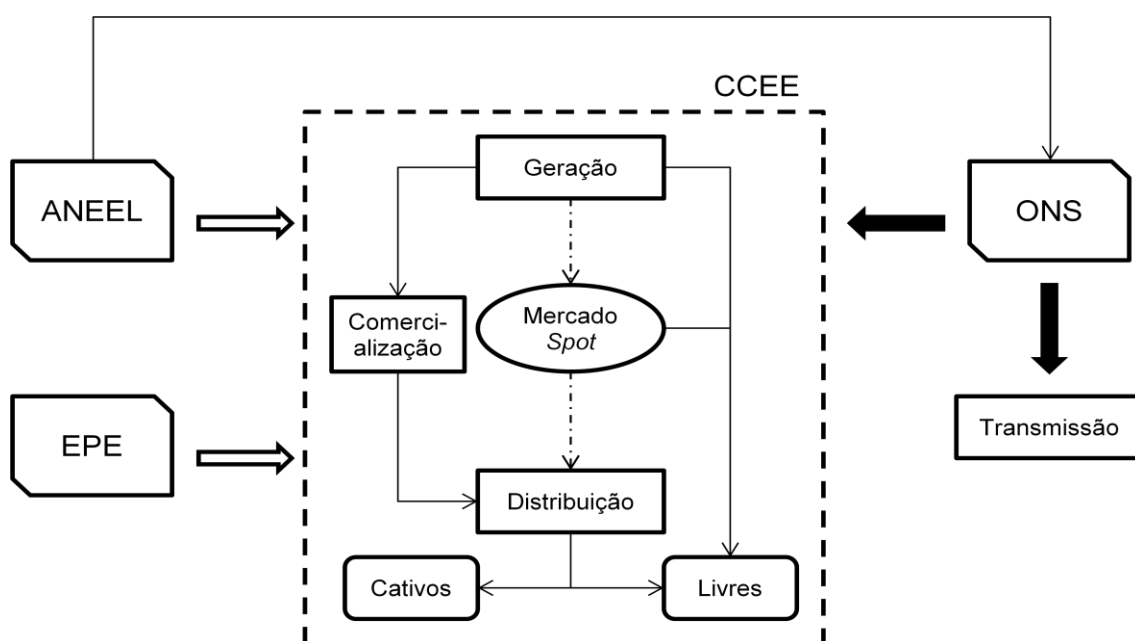


Figura 6. Modelo de Organização do Setor Elétrico Brasileiro. (adaptado de SILVA, 2001).

2.1.3. Operação do Sistema Hidrotérmico Brasileiro

Nota-se, portanto, que a definição do despacho é fundamental para consolidação do preço da energia comercializada. Em um sistema de operação simplificada – como um sistema puramente térmico – bastaria hierarquizar as usinas e organizar o despacho a partir daquelas com menor custo declarado de produção até o suprimento total da demanda.

Mesmo que em sua forma real esse problema operativo seja mais complexo do que apresentado acima (o tempo e custos de partida e desligamento das usinas devem ser considerados, além do nível de despacho por usina), não há dependência

temporal entre as decisões operativas, ou seja, uma decisão de uso do combustível hoje não afeta a capacidade de geração da usina no futuro, considerando nesse caso que a ele haja acesso irrestrito.

Em um sistema hidrotérmico, como o brasileiro, não há completa garantia acerca da disponibilidade futura de água nas bacias contribuintes aos aproveitamentos hidroelétricos e assim, a incerteza sobre as vazões futuras faz com que a decisão acerca da utilização da água armazenada nos reservatórios não seja separável no tempo, ou seja, uma decisão (deplecionamento ou armazenamento) em sua operação afeta diretamente a disponibilidade de água no reservatório no futuro. Além disso, há de se considerar o acoplamento espacial das usinas em cascata, ou seja, uma decisão de armazenamento ou não a montante afeta diretamente as usinas a jusante. Dessa forma, o modelo de despacho deve internalizar o impacto de cada decisão sobre os custos futuros e eventuais déficits.

Segundo SILVA (2001) as principais características da operação de um sistema hidrotérmico são:

- existe uma relação entre a decisão tomada em um estágio qualquer e sua consequência futura. Se muita água dos reservatórios for utilizada e futuramente um baixo regime pluviométrico vier a acontecer, provavelmente será necessária a utilização de geração térmica para o atendimento da demanda e com aumento do risco de déficit. Caso contrário, se for mantido o nível do reservatório, usando geração térmica preventiva, e altos índices pluviométricos ocorrerem, haverá vertimento de energia no sistema. Tanto uma situação quanto a outra explicita a consequência do acoplamento temporal na operação do problema;
- a impossibilidade de uma perfeita previsão das aflúncias futuras, no instante em que são tomadas as decisões operativas, faz com que o problema seja essencialmente estocástico;
- a grande quantidade existente de reservatórios e a necessidade de uma otimização multiperíodo, tornam o problema de grande porte;
- existem não-linearidades implícitas ao problema, as quais são devidas às funções de custos de operação das termoelétricas e às funções de produção de energia das hidroelétricas;
- há presença de custos indiretos relacionados com os benefícios de geração hidroelétrica, uma vez que, a água armazenada nas usinas tem um valor indireto, associado à oportunidade de economizar combustível através do deslocamento de uma térmica hoje ou no futuro. Com isso, tem-se que as variáveis do problema são não-separáveis no tempo;

- necessidade de considerar uma grande quantidade de atividades relacionadas com o uso múltiplo da água nos reservatórios (navegação, controle de cheias, irrigação, saneamento, recreação, entre outros), em conjunção com o despacho de geração e otimização multiperíodo dos reservatórios.

A figura 7 esquematiza de maneira conceitual as decisões a serem tomadas durante a operação de um sistema hipotético com um reservatório, e mostra como a incerteza sobre a disponibilidade hídrica futura afeta não somente a operação do reservatório em si, mas também o custo de geração em todo o sistema. Assim o operador de um sistema hidrotérmico deveria comparar o benefício imediato do uso da água e o benefício futuro de seu armazenamento.

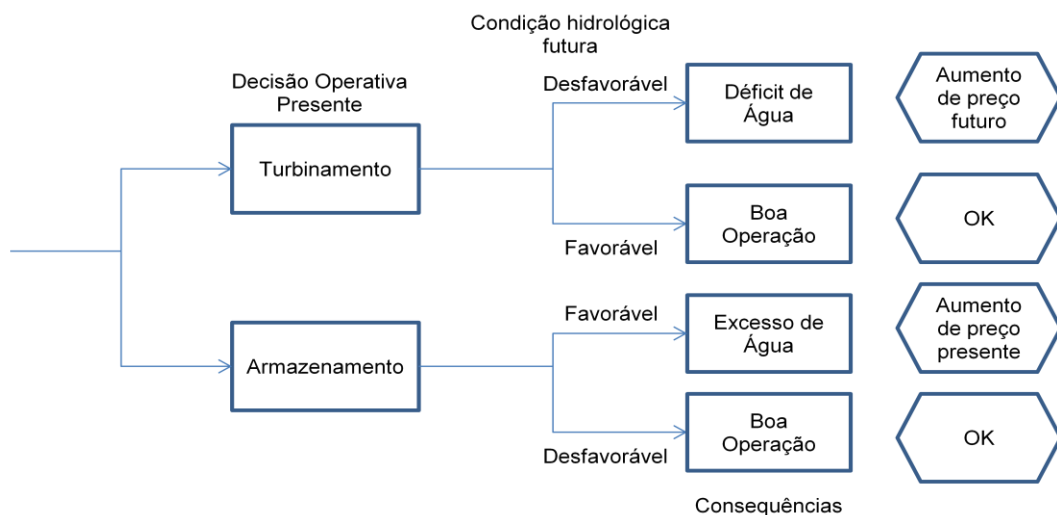


Figura 7. Possíveis decisões operativas, incerteza hidrológica e suas consequências.

A Figura 8 mostra de maneira mais precisa como se comportam os custos de produção de energia no contexto da operação de um sistema hidrotérmico. A Função de Custo Imediato (FCI) mede os custos de geração térmica no estágio t . Quanto menos recursos hídricos são utilizados (maior volume armazenado final), maior é o valor da FCI. Já a Função de Custo Futuro (FCF) está associada ao custo esperado de geração térmica e déficit no final do estágio t (início do período $t + 1$) até o fim do período de estudo. Quanto mais energia armazenada no final do período, menores serão os valores da FCF, uma vez que haverá mais energia hidráulica disponível no futuro. Assim, menor será a probabilidade das usinas térmicas serem despachadas e menor será o risco de ocorrências de déficit.

Portanto, a água armazenada possui um valor indireto, que pode ser medido pela inclinação de qualquer uma das curvas (o chamado “valor da água”) e o uso

ótimo do recurso se dará no ponto onde a soma dos custos é mínima, ou ainda no ponto onde as derivadas das funções em relação ao armazenamento no final do período se igualam em módulo¹¹.

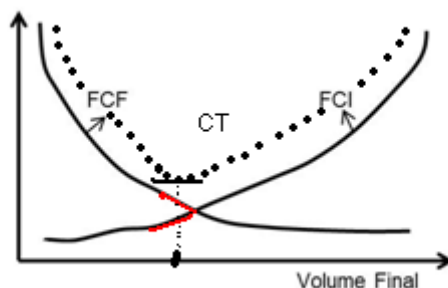


Figura 8. Funções de Custos Imediato (FCI), Futuro (FCF) e Custo Total (CT) em função do armazenamento no fim do período com destaque ao ponto de operação ótima ou custo total mínimo hipotético.

Entretanto o SIN é muito mais complexo e as decisões tomadas a nível operativo não podem ser sentidas de maneira tão direta. Dessa forma, faz-se necessário o uso de modelos de planejamento que sejam capazes de absorver os problemas e, sob certas limitações, encontrar o melhor despacho para o período de estudo. Mesmo assim, o problema deve ser dividido em etapas (Médio, Curto e Curtíssimo Prazo) com diferentes representações do sistema, em termos de complexidade, e maneiras de se trabalhar com as variáveis hidrológicas. Mais detalhes sobre as etapas do planejamento e os modelos empregados em cada uma delas serão apresentados na seção 2.1.4 e a Figura 15 apresenta esquematicamente as especificidades de cada etapa.

De maneira geral, pode-se dizer que, conceitualmente, o planejamento se dedica a resolver o seguinte problema de otimização: encontrar a operação do SIN (geração hidráulica, geração térmica, intercâmbios, armazenamentos, entre outros) que, ao longo do período de estudo, leve à operação de mínimo custo total (presente + futuro). Essa operação deve atender a um conjunto de restrições, tais como:

- a. Atendimento à demanda nos subsistemas;
- b. Limites de Geração e Transmissão / intercâmbios / armazenamentos;

¹¹ Admitindo que a função custo total, CT, é dada por $CT = FCI + FCF$. Seu ponto mínimo será: $\frac{\partial CT}{\partial V} = \frac{\partial FCI}{\partial V} + \frac{\partial FCF}{\partial V} = 0$. Portanto, $\frac{\partial FCI}{\partial V} = -\frac{\partial FCF}{\partial V}$.

- c. Balanço hídrico nas usinas;
- d. Restrições operativas, restrições elétricas;
- e. Atendimento aos demais usos da água;
- f. “Acoplamento” com a função de custo futuro;

Da resolução deste problema, os seguintes resultados estarão disponíveis:

- Volume final nos reservatórios;
- Vazão turbinada e vertida;
- Geração hidráulica e térmica;
- Intercâmbios entre os subsistemas;
- Custo marginal de operação.

No âmbito de operação mensal, o principal estudo para definição do despacho ótimo é o Programa Mensal da Operação (PMO), que fornece metas e diretrizes semanais a serem seguidas pelos órgãos executivos da programação diária da operação e da operação em tempo real (ONS, 2009). Com base nas condições hidrológicas, na demanda de energia, nos preços de combustível, no custo de déficit, na entrada de novos projetos e na disponibilidade de equipamentos de geração e transmissão, a cadeia de modelos de planejamento obtém o despacho (geração) ótimo para o período em estudo, definindo a geração hidráulica e a geração térmica para cada subsistema. Como resultado, é obtido o Custo Marginal de Operação (CMO) para o período estudado, para cada patamar de carga^{III} e para cada subsistema.

O ONS define assim as metas de geração para os agentes do sistema. Utilizando a mesma metodologia, a CCEE faz o acompanhamento dos custos de geração de energia elétrica para subsidiar a definição dos preços praticados no mercado. Os preços contabilizados semanalmente pela CCEE são baseados no CMO do mesmo período, porém, limitados por um preço máximo e mínimo vigentes para cada período de apuração de cada submercado e chamados de Preço de Liquidação das Diferenças (PLD).

A figura 9 mostra a série histórica do PLD médio mensal de maio de 2003 a janeiro de 2014 para o subsistema Sudeste. Pode-se verificar que o preço praticado em fevereiro de 2014 no mercado (R\$ 378,22/MWh) de energia está bem próximo do

^{III} Patamares de carga são níveis de carga estabelecidos de acordo com o padrão de consumo de certas horas do dia. Podem ser divididos em três categorias: Pesado, Médio e Leve. Os cálculos para o planejamento da operação do SIN são realizados para cada um desses patamares.

máximo geral de R\$ 502,45/MWh de janeiro de 2008. Isto tem sido atribuído a uma sequência de verões secos, principalmente em 2013 e 2014 (verificar também os baixos níveis dos reservatórios para o mesmo período mostrados na Tabela 2), que tem mantido os níveis dos reservatórios baixos e levado ao uso intenso de geração térmica e ao conseqüente aumento dos custos de geração. Nota-se que este é um valor médio nos patamares de carga de acordo com o número de horas de cada um deles durante um dia de cada mês.

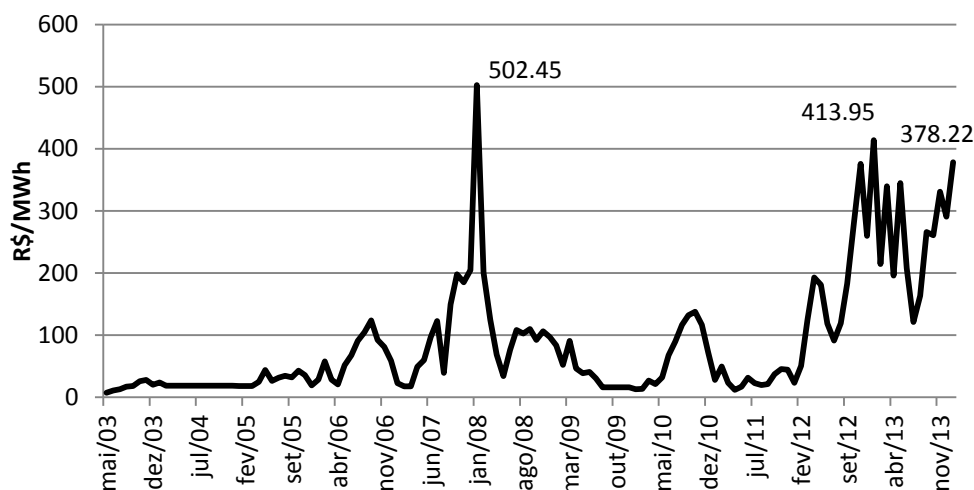


Figura 9. PLD médio para subsistema Sudeste de maio de 2003 a janeiro de 2014.

A Figura 10 mostra os resultados disponibilizados pelo ONS para cada subsistema e o intercâmbio entre os mesmos. Estes resultados são referentes a segunda revisão do PMO de fevereiro de 2014 e para o patamar de carga pesada. Neste diagrama estão mostrados o custo da energia gerada em cada subsistema, assim como a quantidade de energia transmitida entre eles. Pode-se observar, que nos subsistemas Sudeste/Centro-Oeste e Sul os custos de produção de energia estão em níveis muito altos, ambos R\$ 1.784,18/MWh. Este valor está muito acima do PLD máximo definido pela CCEE de R\$ 822,83, que vem, portanto, sendo praticado no mercado de curto prazo há algumas semanas durante o início de 2014. Já os subsistemas Norte e Nordeste, o primeiro principalmente, estão gerando grandes quantidades de energia (5.300 MWh) e exportando (2972 MWh) para os principais centros de carga do país localizados no subsistema Sudeste. Este último subsistema ainda necessitaria de outros 4.615 MWh de Itaipu para suprir sua demanda por energia. O subsistema Sul também não é capaz de produzir com seu parque gerador toda a energia demandada por seus centros de carga e, assim, há importação de

1.306 MWh de energia de Itaipu. Dessa usina ainda saem outros 1.648 MWh para o Paraguai, como previsto em acordo internacional entre o Brasil e este país.

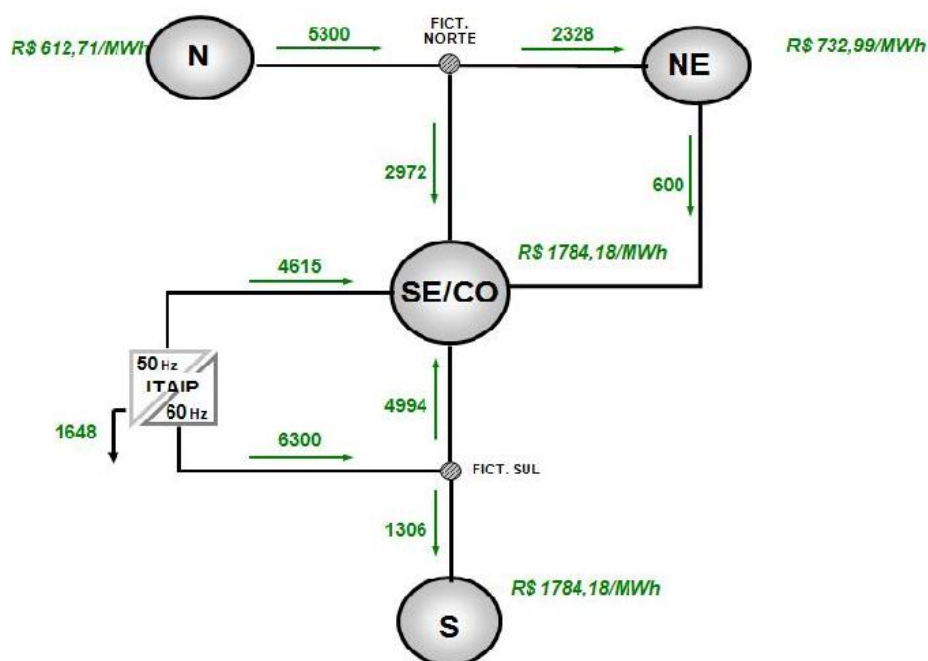


Figura 10. Intercâmbio (MWh) entre os Subsistemas do SIN para a terceira semana de fevereiro de 2014 e patamar de carga pesado (Fonte: <http://www.ons.org.br>).

Outro dado que corrobora a associação entre tempo seco, baixos níveis de armazenamento e altos custos de geração neste início de 2014 são as curvas de energia natural afluyente^{IV} e energia armazenada para o subsistema Sudeste/Centro-Oeste mostradas nas Figuras 11 e 12, respectivamente. Nos gráficos, verifica-se que os níveis dos reservatórios nesse subsistema estão próximos aos menores dos últimos 12 meses e próximos ao mínimo do histórico (desde janeiro de 2000). Além disso, para janeiro de 2014 foi observada a menor energia natural afluyente (30.152 MWmed) nesse mesmo subsistema para todo o histórico (mínimo observado desde 2000 foi 32.377 MWmed).

^{IV} Energia Natural Afluyente é a quantidade de energia que pode ser gerada a partir das vazões naturais afluentes em um determinado (ou grupo de) aproveitamento(s) hidroelétrico(s). As vazões naturais afluentes são calculadas de forma a se eliminar os efeitos da operação de reservatórios, evaporação e usos consuntivos a montante do posto de medição. Este procedimento será detalhado na seção 3.2.5.

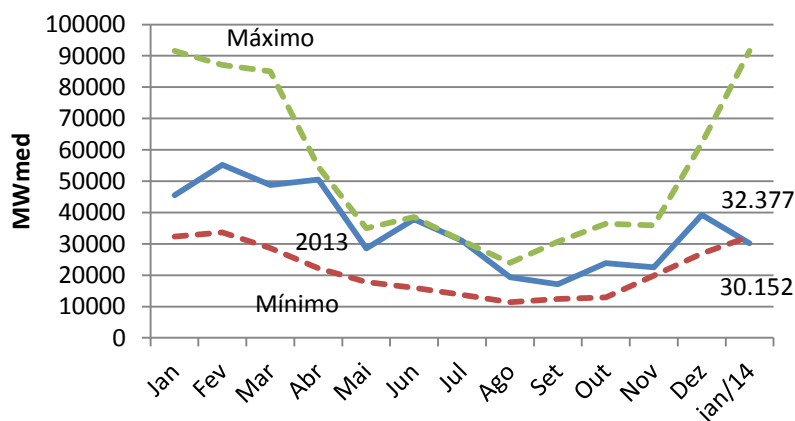


Figura 11. Energia Natural Afluyente no subsistema Sudeste a partir de janeiro 2000. (Fonte: <http://www.ons.org.br>)

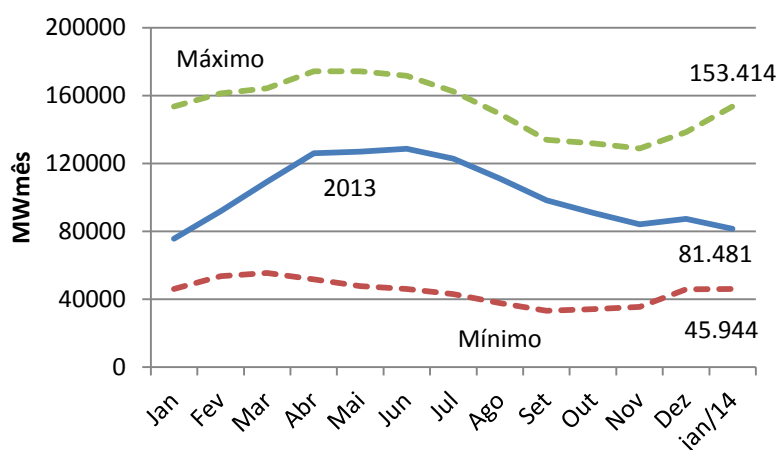


Figura 12. Energia Armazenada para o subsistema Sudeste a partir de janeiro de 2000. (Fonte: <http://www.ons.org.br>)

2.1.4. Cadeia de Modelos CEPEL para o planejamento da operação.

As primeiras discussões sobre a atual forma de planejamento da operação do SIN começaram na década de 70, durante o período de controle estatal sobre o setor (TERRY *et al.*, 1986). O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) ligado a Eletrobras iniciou o desenvolvimento dos modelos computacionais utilizados nas mais diversas áreas do sistema. Atualmente, são os modelos desenvolvidos no CEPEL nas décadas de 80/90 (porém em constante aprimoramento) aqueles adotados na resolução dos problemas operativos descritos na seção anterior.

O planejamento da operação do SIN é realizado, como discutido anteriormente, de forma a se obter o mínimo custo operativo total. Para que este objetivo seja alcançado, o problema da operação é dividido em três etapas referentes a diferentes

horizontes de planejamento (programação da operação, curto e médio prazos) e para cada uma dessas, um conjunto distinto de modelos matemáticos é utilizado em sua resolução.

Devido ao longo tempo de utilização, os métodos utilizados pelos modelos matemáticos principais referentes a cada etapa já se confundem com aqueles da concepção estrutural do planejamento do setor. Entretanto, tais modelos estão em constante aprimoramento e sempre recebendo novas funcionalidades e integração com modelos de apoio. Assim, para cada um desses horizontes de planejamento são utilizados diferentes modelos hidrológicos e de otimização energética que, mesmo que encadeados, ainda diferem quanto à discretização temporal e níveis de detalhamento do sistema brasileiro.

Na Tabela 3 são mostrados os diferentes modelos utilizados no planejamento da operação do SIN e suas características. Tais modelos trabalham em conjunto e as decisões são tomadas de maneira hierárquica e estão esquematizadas no fim do capítulo na Figura 15. Acima dos demais, para o planejamento da operação de médio prazo, o modelo NEWAVE (MACEIRA, *et al.*, 2012) “decide” quanto da demanda total de cada mês será atendida pelo parque térmico e quanto será pelo subconjunto de hidroelétricas agrupadas por subsistema equivalente. Como dado de entrada, o modelo recebe as indicações do Plano de Expansão Decenal (elaborado anualmente) acerca da projeção de demanda e configuração do sistema, ou seja, quais usinas estão disponíveis. Para considerar a incerteza hidrológica, esse modelo utiliza cenários sintéticos, gerados estocasticamente com base no registro histórico de vazões, de energias afluentes de até cinco anos à frente produzidos pelo modelo GEVAZP (JARDIM *et al.*, 2001; MACEIRA e MERCIO, 1997) a partir das afluições naturais, verificados até os últimos 12 meses. A partir disso, o NEWAVE calcula a função de custo futuro, que será considerada no planejamento de curto prazo.

No planejamento de curto prazo o modelo DECOMP, a partir da FCF estimada pelo NEWAVE, resolve outro problema de otimização com uma representação mais detalhada do SIN e um conjunto de restrições operativas e elétricas. Assim, para o primeiro mês, são definidas metas semanais de geração para cada usina do sistema. A hidrologia é considerada parte estocástica parte determinística. Para o primeiro mês são consideradas, para a maior parte das usinas pertencentes ao SIN, o valor esperado das vazões semanais obtidas através do modelo PREVIVAZ (MACEIRA *et al.*, 1999), para os demais meses, são considerados os cenários sintéticos do modelo GEVAZP. Atualmente, o planejamento de curto prazo é realizado para até dois meses à frente.

Tabela 3. Características da Cadeia de Modelos Energéticos do CEPEL.

Etapa	Médio Prazo	Curto Prazo	Programação da Operação
Modelo Hidrológico	GEVAZP	PREVIVAZ/ GEVAZP	PREVIVAZH
Modelo de Otimização	NEWAVE	DECOMP	DESSEM
Horizonte de Planejamento	Até 10 anos	Até 1 ano	Até 14 dias
Discretização Temporal	Mensal	Semanal/Mensal	Horário/ Patamares
Incerteza Hidrológica	Estocástico	Determinístico/ Estocástico	Determinístico

Por fim, na programação da operação (modelo DESSEM; DINIZ *et al.*, 2002; MACEIRA, *et al.*, 2000), as vazões diárias para um horizonte de até 7 a 14 dias à frente são previstas pelo modelo estocástico PREVIVAZH, entre outros (LIVINO, 2001). No horizonte de planejamento diário, vários são os modelos hidrológicos utilizados para cada bacia ou usina, assim, o DESSEM é flexível em relação ao nível de discretização dos dados hidrológicos, podendo ser ajustado de acordo com o tipo de saída desejada e confiabilidade das previsões de vazões. De maneira geral, são considerados pelo modelo de otimização energética apenas o valor esperado das previsões discretizado de maneira semelhante ao utilizado para a definição das variáveis FCF, despacho e configuração ótima do sistema. Os resultados são obtidos pra cada ½ hora, no primeiro dia, e a cada hora para os demais dias da semana. Além disso, são estimados os custos marginais de cada subsistema e as perdas na transmissão (NORBIATO E DINIZ, 2011).

É possível notar, que há uma *trade-off* em termos de complexidade das representações do sistema e a incerteza hidrológica ao longo das etapas de planejamento. Enquanto os modelos energéticos de médio prazo consideram poucas usinas para representar todo o SIN, nesta mesma etapa o modelo hidrológico GEVAZP gera cenários de previsão. Por outro lado, nas etapas de prazo mais curto os modelos hidrológicos são quase que totalmente determinísticos e geram, assim, valores únicos em suas previsões.

Os modelos hidrológicos estocásticos utilizados no planejamento da operação do SIN trabalham basicamente com as informações históricas de vazões passadas em um determinado posto, associado a uma usina hidroelétrica, a qual se referirão os

dados hidrológicos do histórico, para produzir o valor esperado da vazão no horizonte de tempo desejado, ou seja, são, em essência, modelos estocásticos de séries temporais (O GEVAZP se enquadra nesta categoria de modelos, porém tem como resultado cenários de aflúências e não apenas o valor esperado das previsões). Na Figura 13 é apresentado como cada um desses modelos pode receber a informação de outros e utilizá-la como tendência para suas próprias previsões.

Dentro do conjunto de modelos desenvolvidos no CEPEL e usados no planejamento da operação do SIN, destaca-se o modelo PREVIVAZ, utilizado no horizonte de curto prazo para previsão de vazões semanais, cujos erros encontrados no processo de previsão serão avaliados. Como resultado do modelo PREVIVAZ são obtidos tanto o valor esperado da vazão média para até seis semanas à frente, como os limites inferior e superior do intervalo de confiança teórico. Estes últimos são utilizados hoje pelo ONS em estudos de sensibilidade para vazões mais extremas (máximos e mínimos) e estão associados a um intervalo de confiança de 68% (ONS, 2013). Os detalhes do PREVIVAZ serão abordados na seção 3.1.

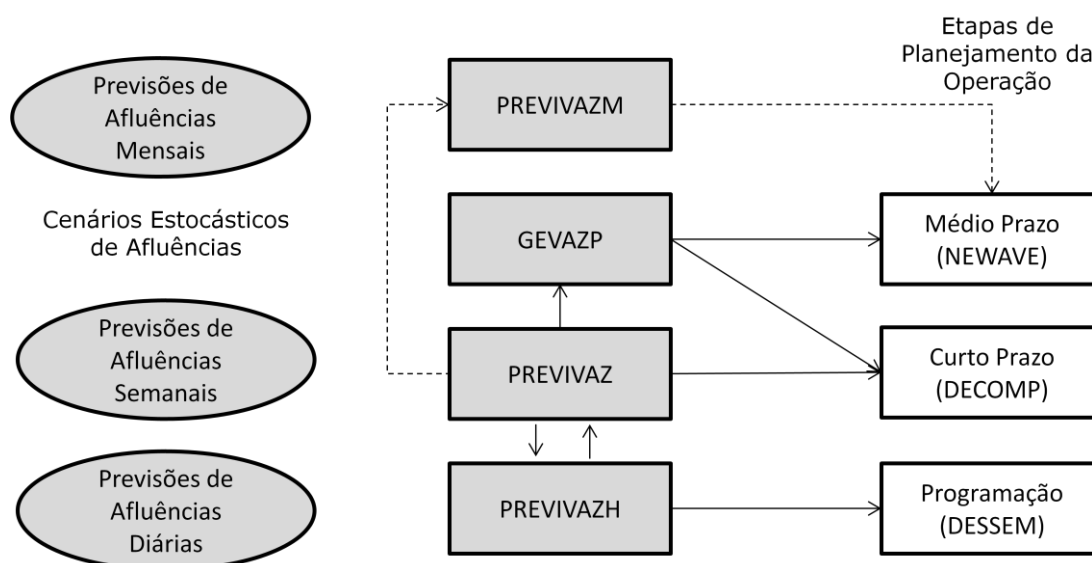


Figura 13. Relações entre os Modelos Hidrológicos no Planejamento da Operação do SIN.

A partir dos resultados obtidos no PMO as metas e diretrizes energéticas de curto prazo da operação coordenada do SIN são disponibilizadas aos órgãos executivos da programação diária e da operação em tempo real. A partir delas, busca-se assegurar a otimização dos recursos de geração disponíveis.

A Figura 14 apresenta de maneira esquemática como e quando são elaboradas as previsões de vazões para o PMO para o mês m . O estudo é realizado na última

quarta-feira do mês $m-1$ para as semanas operativas^V subsequentes (de 4 a 6 semanas à frente). Como não há observação de aflúncias para todos os dias da última semana do mês $m-1$, é necessária a composição desta por previsões diárias (potencialmente pelo modelo PREVIVAZH), a fim de se obter a vazão média para a semana 0. Este valor é, então, utilizado como tendência (como será melhor explicado no capítulo 2.2.3) para a previsão das semanas do mês m . Para o segundo mês do PMO as previsões semanais do primeiro são, então, utilizadas para a geração de cenários pelo modelo GEVAZP. À medida que o calendário avança sobre o mês m , as previsões são revistas, usualmente, na quinta-feira. Mais uma vez, a composição com previsões diárias para a semana 0 (antiga semana 1) é necessária. Por fim, as vazões das demais semanas do mês m são então previstas a partir das novas observações e previsões diárias realizadas. Este processo de revisão ocorre toda semana, até o fim do mês, onde o PMO para o mês $m+1$ é, então, efetuado.

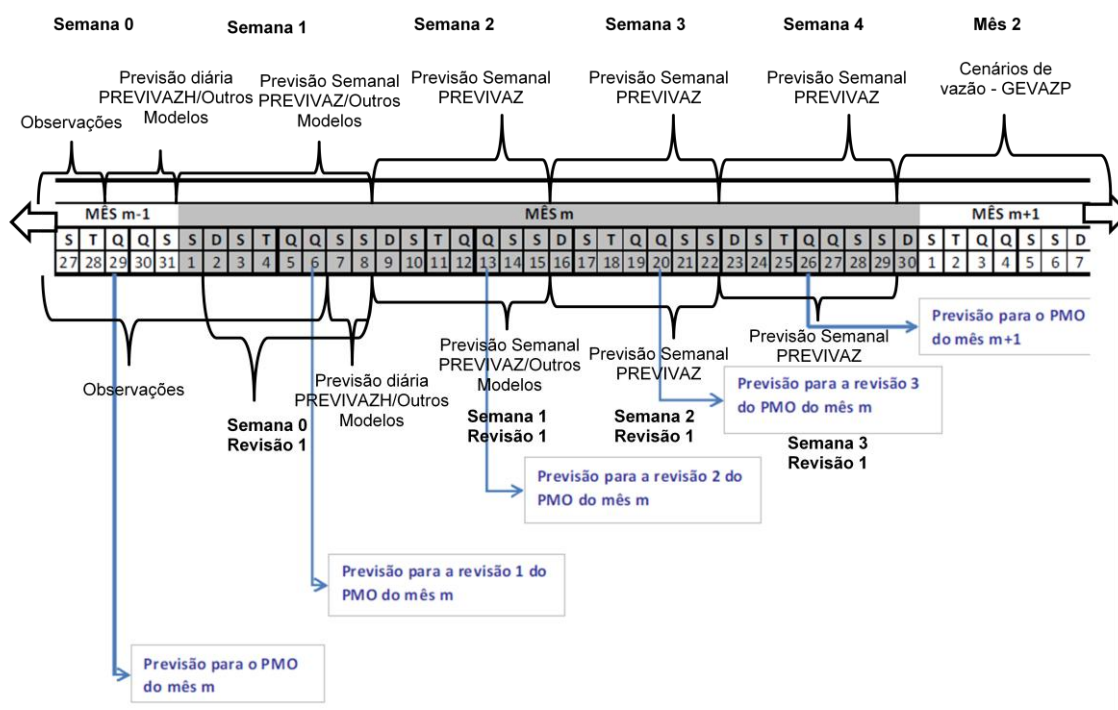


Figura 14. Esquema do cronograma das previsões de vazões para o PMO e modelos utilizados, usualmente, em cada etapa. (Adaptado de ONS, 2012).

A Figura 15 sintetiza e explica, de maneira conceitual e com um pouco mais de detalhes, o fluxo de informações e o encadeamento entre os diversos modelos

^V As semanas operativas tem início às 00:00h de sábado e terminam às 24:00h da sexta-feira posterior. A primeira semana operativa do mês é aquela que contém o primeiro dia do referido mês.

utilizados no planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro em cada uma das etapas anteriormente descritas.

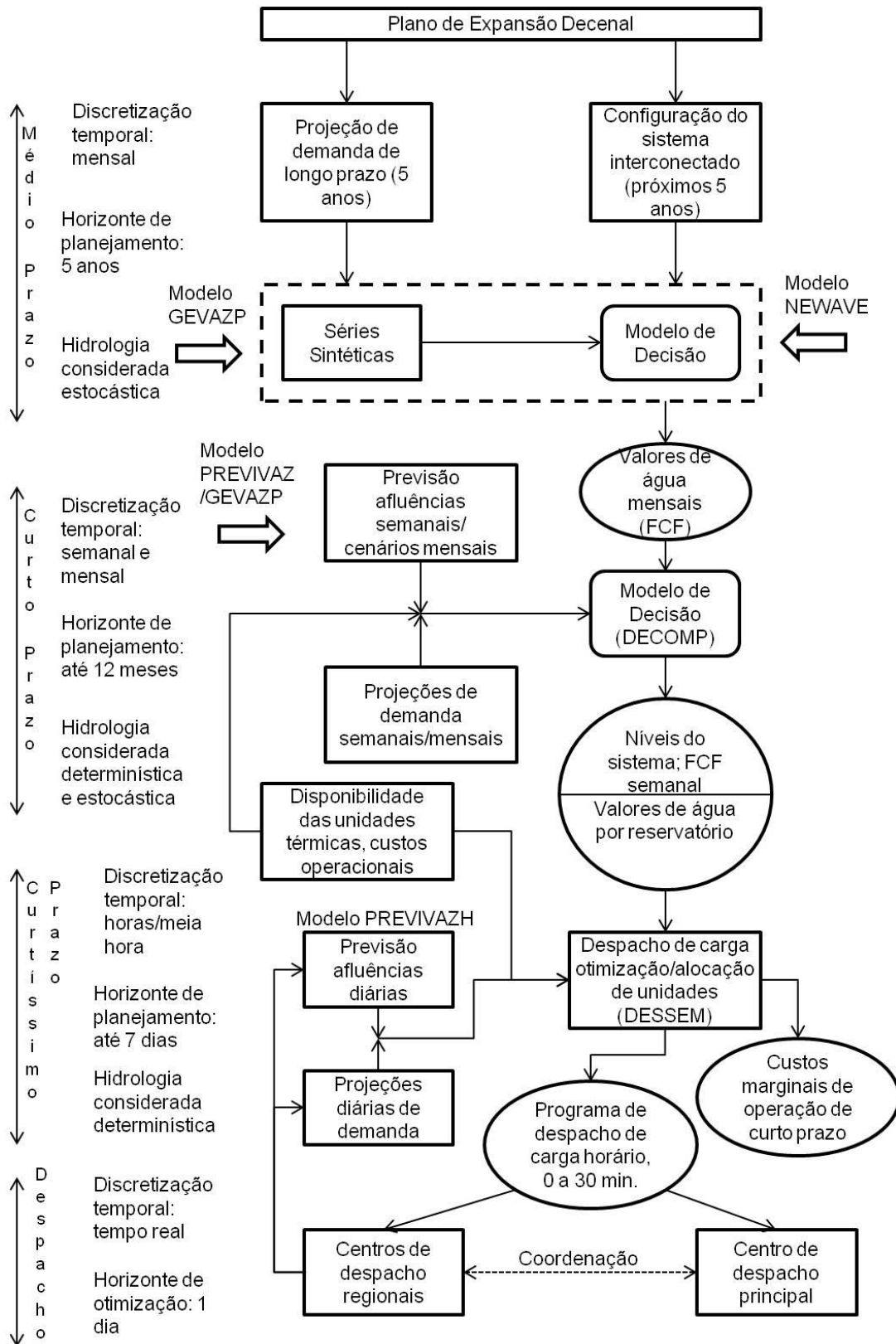


Figura 15. Etapas do Planejamento da Operação Energética e Despacho do Sistema.

(adaptado de SILVA, 2001).

2.2. Engenharia e Modelagem Hidrológica

2.2.1. Considerações Iniciais

Muitas são as definições possíveis para a ciência hidrológica, mas todas podem concordar que ela lida com a ocorrência, distribuição, circulação e as propriedades da água na Terra (EAGLESON, 1994). De maneira mais simplificada e nos limites da bacia hidrográfica, poderíamos ainda dizer que a hidrologia procura responder a pergunta “O que acontece com a chuva?” (PENMAN, 1961 *apud* SINGH e WOOLHISER, 2002). Entretanto, por mais simples que seja a pergunta, as diversas fontes de incertezas e complexidade dos fenômenos por trás de um evento de precipitação fazem com que a resposta não acompanhe a pergunta em simplicidade e muito menos em acurácia.

A necessidade em se entender os processos referentes à distribuição da água em nosso planeta não é nova. Assim como, toda forma de vida conhecida em nosso universo, as civilizações humanas dependem basicamente de água para sobreviver. Não à toa, as cidades mais antigas conhecidas hoje por nós são, ou foram, cortadas por rios com potencial hídrico para servirem como manancial de água potável, via de transportes, fonte de obtenção de proteína animal entre muitos outros usos possíveis. Sem dúvida alguma a presença dos rios Tigre e Eufrates impulsionou o desenvolvimento da primeira grande civilização conhecida na História e que carrega essa particularidade em seu nome: Mesopotâmia é a variante grega para “entre rios”. Por outro lado, esses mesmos rios eram e ainda são fonte de preocupação, associado, principalmente, a eventos de cheias e consequentes extravasamentos de calha e alagamentos nas áreas de várzea.

A figura 16 mostra uma representação esquemática das inscrições encontradas nas paredes internas de um poço de monitoramento (Nilômetro) usado no período romano para acompanhamento dos níveis do Rio Nilo, no continente africano. Esse acompanhamento era muito importante para a prosperidade da agricultura egípcia, que dependia dos extravasamentos do Nilo para fertilizar os aluviões e possibilitar a atividade agrícola. Como disse o historiador grego Heródoto “O Egito é a dádiva do Nilo”, ou seja, a civilização egípcia só era possível graças aos benefícios proporcionados pelo rio. Além disso, pode-se dizer que a importância social das cotas do rio é bastante clara nesta figura e é interessante notar que para ambos os extremos há uma situação adversa associada. A partir disso vem boa parte da motivação em se compreender os processos hidrológicos no âmbito da engenharia (DOOGE, 1988).

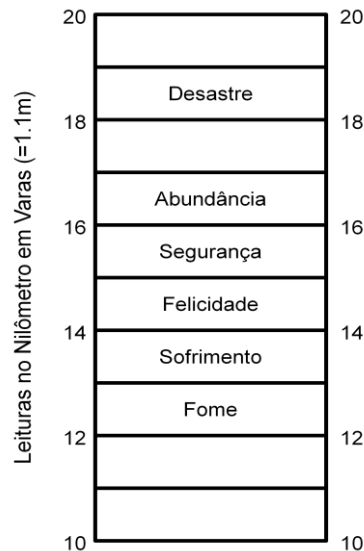


Figura 16. Nilômetro e possíveis leituras (DOOGE, 1988).

A distribuição de água pelo planeta é resultado de uma intensa inter-relação entre os diversos compartimentos geoquímicos da Terra. Como diversas outras substâncias presentes na superfície terrestre, a presença de água se dá dentro de um contexto cíclico, porém com uma particularidade, pode ser encontrada nas suas três fases em condições ambientais. A figura 17 representa o ciclo hidrológico em sua concepção mais generalizada. A precipitação (normalmente em forma chuva e será tratada assim daqui para frente, os casos especiais, onde a presença de neve, gelo ou granizo for especialmente importante, serão claramente identificados) é a água em movimento e transição, do vapor presente na atmosfera para o líquido presente na superfície; na figura identificada pela letra “P”.

Durante o processo de descenso a água pode voltar a evaporar (E) antes mesmo de chegar à superfície. Uma vez em contato com a superfície ela pode seguir diferentes caminhos: i) interceptada nas irregularidades do terreno, por plantas ou qualquer outro obstáculo; ii) escoar pela superfície (S); iii) infiltrar no solo (I); iv) uma vez no solo a água pode escoar tanto pelas zonas saturada ou não-saturada (B); v) exposta a temperatura ambiente, evaporar (E ou T) indo novamente em direção à atmosfera.

A partir dessa representação simplificada do ciclo da água, pode-se escrever a equação básica para o balanço hídrico considerando os principais compartimentos e suas respectivas quantidades armazenadas:

$$\Delta W = P - (S + B) - (E + T) \quad [2.2.1]$$

onde ΔW é a variação da quantidade de água armazenada no solo.

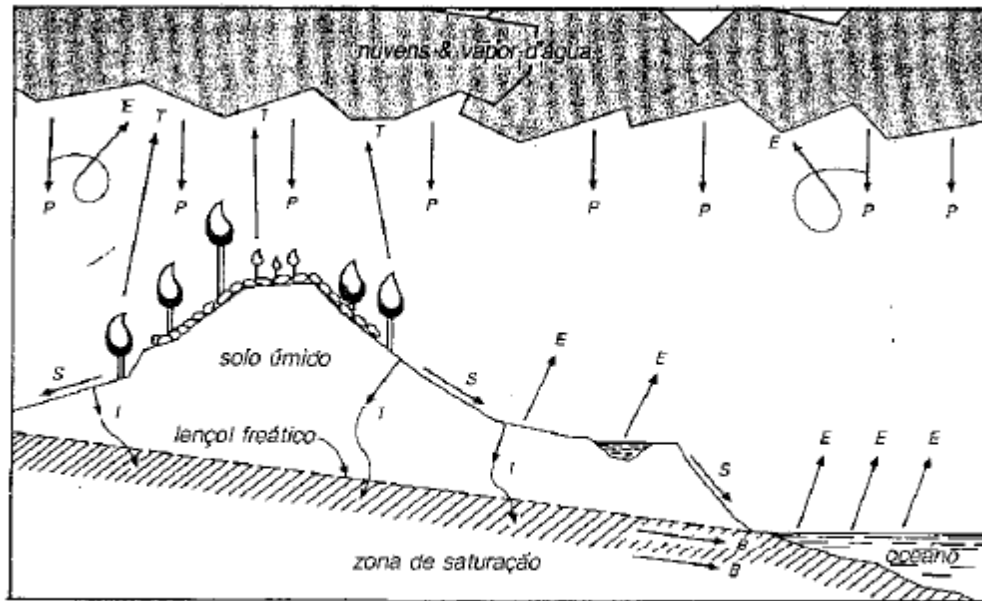


Figura 17. Ciclo Hidrológico generalizado (RAMOS, 1989).

Esta ideia básica de se separar os componentes do balanço hídrico e tentar prever a resposta de uma bacia hidrográfica a certas condições sustentam os esforços no desenvolvimento de modelos hidrológicos conceituais. Tais modelos podem ser categorizados para fins didáticos de acordo com suas formas de representação e formulação dos problemas, mas a modelagem e a ciência hidrológica devem ver tal divisão apenas no plano conceitual e idealmente de forma complementar, uma vez que são apenas ferramentas diferentes para o mesmo problema.

Quando são levadas em consideração a chance de ocorrência das variáveis do modelo e a teoria probabilística é introduzida na formulação do modelo, este é dito estocástico. Por outro lado, se a chance de ocorrência das variáveis não for considerada e o modelo seguir uma formulação baseada em alguma lei física ou empírica, o modelo será considerado determinístico. (CHOW, 1964 *apud* ROTUNNO FILHO, 1989).

Os modelos podem ainda ser baseados em leis físicas ou em expressões definidas por observações de campo, podendo assim ser classificados como físicos ou empíricos, respectivamente. Apesar desse não ser um conceito universalmente aceito na comunidade científica hidrológica (vide ABBOTT, *et al.*, 1986a), segundo ROTUNNO FILHO (1989) a distinção entre modelos físicos e empíricos muitas vezes é dificultada, já que dificilmente um modelo hidrológico será inteiramente baseado em leis físicas e em alguma de suas formulações acabará por aparecer alguma expressão de base empírica.

SILBERSTEIN (2006) apresenta ainda os modelos conceituais como aqueles do tipo “fluxo e estoque” muito comuns na modelagem hidrológica. Em termos hidrológicos os componentes do ciclo hidrológico são representados como uma série de reservatórios interconectados entre si. O fluxo da água entre estes reservatórios é determinado por equações paramétricas. Muitas vezes os fluxos e estoques possuem significado físico, mas geralmente não são mensuráveis independentemente; a definição dos parâmetros é então feita a partir de dados de entrada e saída.

Os modelos hidrológicos podem ainda se diferenciar segundo a variabilidade espacial de seus parâmetros. Caso esta seja considerada o modelo é dito distribuído, já os modelos concentrados consideram apenas a variabilidade temporal de suas variáveis e assumem a bacia como homogênea.

Para fins de complementação um breve histórico do desenvolvimento dos modelos hidrológicos determinísticos e estocásticos se segue. Ressalta-se, que ainda hoje a discussão conjunta das particularidades e limitações destas duas abordagens é pouco explorada na literatura. Assim este trabalho se propõe a contribuir para o preenchimento desta lacuna, especialmente no que se refere à modelagem hidrológica estocástica. Mesmo que apresentado aqui de maneira separada a evolução da modelagem hidrológica é uma só e a aparente dicotomia entre as abordagens, que surge a partir da formatação do texto (e muito encontrada na literatura), não passa de um risco conscientemente assumido pelo autor.

2.2.2. Modelos Determinísticos

A partir de equações empíricas, que representavam de certa forma o balanço hídrico, os primeiros modelos hidrológicos foram desenvolvidos. Buscava-se uma previsão sobre as respostas na superfície a partir de condições atmosféricas previamente estabelecidas e através de uma relação de causa-efeito entre chuva e *runoff*. Esses modelos eram utilizados principalmente para complementar estudos de engenharia hidráulica ou agrônômica, então se preocupavam apenas com questões de pequena escala geográfica, não havendo, portanto, outra forma de representar os fluxos de água (EAGLESON, 1994).

Os estudos para aprimoramento desses modelos eram principalmente referentes à melhoria nas descrições dos processos físicos em cada compartimento específico e de maneira independente. O sistema hidrológico era considerado linear (respostas observadas na eram bacia proporcionais às forçantes do fenômeno), estacionário (invariância no tempo dos parâmetros da bacia) e concentrado (invariância no espaço dos parâmetros da bacia) (CANEDO, 1989).

Entram nesse caso as equações de Horton (HORTON, 1945 *apud* SINGH e WOOLHISER, 2002) para o escoamento superficial e o transporte de sedimentos nesse processo; outros componentes importantes dentro do balanço hídrico como a evaporação eram considerados apenas por índices ou coeficientes. Mais exemplos de estudos que buscavam de maneira isolada descrever matematicamente os diferentes componentes do ciclo hidrológico podem ser encontrados em SINGH E WOOLHISER (2002).

O desenvolvimento da computação científica por volta de 1960 possibilitou a incorporação de não-linearidades e variabilidade espacial nos modelos (chamados então de distribuídos), porém sob o mesmo conceito de causa-efeito (EAGLESON, 1994). SINGH E WOOLHISER (2002) apresentam uma extensa lista de modelos desenvolvidos nesse período, inclusive aquele que potencialmente foi a primeira tentativa de se representar em um modelo o ciclo hidrológico inteiro (“Stanford Watershed Model” ou SWM proposto por CRAWFORD e LINSLEY, 1966 *apud* SINGH e WOOLHISER, 2002).

A partir disso, modelos com base na física dos processos hidrológicos cada vez mais complexos foram desenvolvidos (como o complexo modelo “Système Hydrologique Européen” ou simplesmente “SHE” desenvolvido por ABBOTT *et al.*, 1986a e ABBOTT *et al.*, 1986b para bacias do continente europeu) e tem sua utilização bem difundida em problemas de engenharia. Entretanto, a grande quantidade e diversidade de dados necessários para calibração de seus parâmetros passou a ser a principal crítica acerca das limitações em sua aplicação (BEVEN, 2012; SILBERSTEIN, 2006). A fim de suprir esta lacuna de dados, foram criadas ao longo dos anos diversas forças tarefas internacionais com o intuito de melhorar o gerenciamento do uso de recursos hídricos transnacionais e obter de dados hidrológicos de larga escala de maneira cooperativa (EAGLESON, 1994). Boa parte da motivação por ações internacionais conjuntas é deque os dados necessários frequentemente não estão completamente acessíveis ou simplesmente não existem; e mesmo que estejam a mão, há de se preocupar ainda com a incerteza das medições, a não homogeneidade dos dados e a possível interrupções nas medições (SINGH e WOOLHISER, 2002).

SINGH e WOOLHISER (2002) fazem um levantamento dos possíveis tipos de dados necessários à modelagem hidrológica através de modelos distribuídos. Eles incluem dados:

- Hidrometeorológicos (precipitação, temperatura, radiação solar, umidade do ar, pressão de vapor, entre outros);

- Geomorfológicos (mapas topográficos, rede de drenagem, áreas de drenagem, taludes e seus comprimentos, área da bacia);
- Agrícolas (cobertura vegetal, uso da terra, tratamento e aplicação de fertilizantes);
- Pedológicos (tipo de solo, textura e estrutura, tamanho de partícula do solo, porosidade, conteúdo de umidade, entre outros);
- Geológicos (estratigrafia, litologia e controles estruturais);
- Hidrológicos (descarga fluvial, descarga de base, profundidade de escoamento, interação rio-aquífero, entre outros).

Dessa grande quantidade de dados, a maior parte raramente está disponível em escalas adequadas à modelagem dos processos hidrológicos. Os dados hidrometeorológicos básicos (Temperatura, Precipitação, Umidade do Ar e Radiação Solar) normalmente estão disponíveis próximo a grandes cidades, nas quais um número maior de estações de medição existe. Dados hidrofluviiais estão normalmente disponíveis em trechos de rios com aproveitamentos hidroelétricos, barragens, açudes, estruturas de captação ou qualquer outra obra fluvial. Os demais dados são obtidos normalmente por técnicas indiretas de medição ou campanhas de campo isoladas.

Da escassez (ou até mesmo inexistência) de dados necessários vem grande parte da crítica sobre os modelos distribuídos cada vez mais complexos. A necessidade crescente em quantidade e qualidade de dados não acompanha de maneira nenhuma a velocidade de aumento de complexidade desses modelos. Assim questiona-se a validade em se gastar tantos recursos no desenvolvimento de ferramentas cada vez mais imponentes, sem a garantia da existência daquilo indispensável para alimentá-las (BEVEN, 2012).

2.2.3. Modelos Estocásticos

O desenvolvimento da computação científica, que subsidiou o aumento de complexidade dos modelos determinísticos também influenciou o aparecimento, no mesmo período, de modelos hidrológicos estocásticos. Tais modelos acrescentam, na representação das variáveis do balanço hídrico, componentes aleatórios. A resposta desses modelos serão sempre uma distribuição de resultados ou um resultado com uma variância, diferentemente de modelos determinísticos, que se rodados com os mesmos dados de entrada produzirão sempre um único valor para as variáveis a se

determinar nos resultados. Os trabalhos de THOMAS e FIERING (1962 *apud* CEPEL, 2009) e de YEVJEVICH (1963) são considerados os primeiros nesse caminho e muitos outros seguiram, destacando aqui os que de alguma forma representam a experiência brasileira (no setor elétrico) acerca do tema, (KELMAN, 1980; MACEIRA e MERCIO, 1997; LIVINO, 2001; JARDIM *et al.*, 2001; MACEIRA *et al.*, 1999).

A motivação maior para o uso de teoria probabilística ao se modelar o fenômeno hidrológico vem do fato que todos os processos em hidrologia têm natureza aleatória, ou seja, não seria identificável na natureza nenhum processo puramente determinístico. Assim, a hidrologia não poderia ser totalmente entendida e descrita sem o uso intensivo de métodos provenientes da teoria probabilística (YEVJEVICH, 1972).

Porém como defendido por YEVJEVICH (1974) não deve haver um confronto claro entre essas duas abordagens, uma vez que não passam de formas diferentes de encarar o mesmo problema. Além disso, ele ainda defende que quando combinadas em um mesmo modelo os resultados obtidos são sempre superiores e critica aqueles que defendem a utilização de modelos unicamente baseados em equações físicas simplificadas e desconsideram assim as características estocásticas das variáveis hidrológicas. Exemplo de como as duas abordagens podem se misturar é o trabalho de SHAH *et al.* (1996a; SHAH *et al.*, 1996b). Os autores estudaram a compatibilidade e respostas de um modelo distribuído (modelo europeu “SHE”) quando a ele são incorporadas informações de precipitação através de suas distribuições de probabilidade em um campo de chuva estocástico.

Uma das principais “classes” de modelos estocásticos, especialmente no contexto brasileiro, são os modelos de séries temporais aplicados em séries de vazões fluviais. Eles se utilizam da premissa de que a vazão no futuro é uma função de n vazões passadas. Dessa forma, o único dado de entrada em um modelo exclusivamente baseado em séries temporais é o registro histórico de vazões.

Como já comentado ao longo da seção 2.1.4 os modelos hidrológicos desenvolvidos no CEPEL e utilizados no setor elétrico são de caráter estocásticos e em sua maioria de séries temporais. Entre eles, entretanto, há o PREVIVAZH (COSTA *et al.*, 2007) para previsão de vazões diárias, que pode ser considerado um “híbrido”, já que utiliza os cenários sintéticos de vazões diárias resultantes do modelo estocástico DIANA (LIVINO, 2001). Em um segundo momento o PREVIVAZH seleciona o cenário mais próximo de uma meta semanal estabelecida para definir o conjunto de previsões diárias daquela semana.

O modelo DIANA possui uma formulação característica de “fluxo e estoque” simplificado (com 2 reservatórios) e o escoamento superficial é considerado um

elemento-chave na determinação das vazões. Assim, a vazão é considerada como a soma de dois componentes: um associado a fatores externos e a resposta da bacia à esses fatores (U), e o segundo representa o contínuo esvaziamento da água armazenada na bacia (O). U está associado à precipitação e é modelado através de uma formulação com base em séries temporais. Sempre que não há precipitação a vazão é função apenas das defluências (O) de dois reservatórios lineares conceituais. Ela é então definida através de uma equação probabilística que depende da vazão observada imediatamente antes. Os parâmetros dessa parcela são determinados por uma análise dos trechos de recessão da série histórica.

Por outro lado, um bom exemplo de modelo puramente de séries temporais é o PREVIVAZ, que será objeto de análise por este estudo e de maiores detalhamentos no capítulo 3. Ele utiliza a informação adquirida das séries de vazões para determinar os parâmetros que definiriam a vazão futura. Este modelo, portanto, se utiliza da premissa de que há dependência linear entre os termos da série e é constituído por um grupo de alternativas pré-definidas que se diferenciam pelos métodos de estimação dos parâmetros, ordem (até quantos passos atrás considerar) e formulação da estrutura de dependência.

Dessa forma, verifica-se, que a principal fonte de informação em modelos hidrológicos estocásticos de séries temporais é o registro de vazões. Um histórico de dados hidrometeorológicos pode ser entendido como apenas uma de todas as possíveis realizações do fenômeno e assim, pode-se imaginar que a natureza “sorteou” entre um universo de possibilidades – segundo algum conjunto de leis probabilísticas – a série histórica observada (KELMAN, 1983). Portanto os modelos estocásticos procuram reproduzir da melhor maneira possível o comportamento estocástico natural das variáveis hidrológicas estudadas. Mais detalhes sobre a aplicabilidade da teoria de séries temporais em problemas de engenharia de recursos hídricos podem ser encontrados em HIPEL E MCLEOD (1995).

KELMAN (1987) apresenta como seria, esquematicamente, resolvido este problema:

- i) coleta-se ou organiza-se uma série temporal do processo estocástico $X(t)$;
- ii) seleciona-se um modelo matemático (conjunto de expressões paramétricas) para representar o processo estocástico. A seleção é usualmente feita a partir do exame das propriedades da série, embora em alguns casos seja possível escolher a expressão paramétrica com base em conceitos teóricos;
- iii) estimam-se os parâmetros do modelo e testam-se o ajuste e adequação do modelo aos dados disponíveis;

- iv) utiliza-se o modelo ajustado para a obtenção da resposta desejada.

A hipótese fundamental na formulação de um modelo estocástico de séries temporais é de que a variável a ser modelada (prevista) pode ser escrita em função de um certo número de realizações passadas dessa mesma variável. Em termos de séries de vazões é importante notar que tal hipótese não poderia ser sempre adotada, uma vez que, como já apresentado na seção 2.2.1, mesmo em uma representação básica o ciclo hidrológico possui outras variáveis, que juntas definiriam a vazão escoada na calha do rio. A importância de cada uma dessas variáveis certamente mudará ao longo da bacia e do tempo e seu conhecimento deve ser explorado no desenvolvimento de modelos dessa natureza.

Além daquela adotada na própria formulação do problema, outra importante hipótese adotada no uso de modelos estocásticos de séries temporais é a estacionariedade dos dados históricos. Isto implicaria na não alteração das propriedades estatísticas da série ao longo do tempo, mesmo que os valores absolutos sejam diferentes. Como sugere KELMAN (1987) séries de vazões discretizadas em intervalos inferiores ao ano (dia, mês) seriam necessariamente não-estacionárias devido à periodicidade anual dos processos climáticos. Dessa forma, ao se debruçar sobre esse horizonte temporal o hidrólogo deve encontrar melhores respostas com modelos que capturam em seus parâmetros tais características periódicas. Tal observação e as que se seguem sobre estacionariedade, valem também para os dados utilizados em modelos determinísticos.

Mesmo quando o objeto da modelagem são vazões anuais, o correspondente processo estocástico não será necessariamente estacionário; devem ser observadas as seguintes questões apresentadas em KELMAN (1987):

- a) As características fisiográficas das bacias estão em constante evolução devido à erosão e à sedimentação;
- b) A distribuição da energia solar sofre variações periódicas, o que ocasiona mudanças climáticas;
- c) As características fisiográficas das bacias sofrem alterações devido à intervenção humana, por exemplo, a construção de reservatórios ou desmatamento.

Os dois primeiros pontos realizam-se em uma escala de tempo muito maior do que aquela relevante para o horizonte de planejamento em questões de engenharia. Por outro lado, as alterações descritas no ponto (c) são extremamente relevantes,

podendo chegar ao ponto, em que tais alterações são tão profundas, que a hipótese de estacionariedade não pode ser aceita e os métodos convencionais de modelagem de séries temporais não podem ser aplicados. Ainda se considerarmos o cenário atual de mudanças climáticas ocasionadas (ainda não comprovada, mas defendida por maior parte da comunidade científica) por alterações antropogênicas no meio ambiente, pode-se inferir que a esperada variabilidade estacionária em registros históricos de vazões (ou qualquer outra série de variáveis hidroclimatológicas) deveria ser questionada. Portanto, como defende MILLY *et al.* (2008), técnicas capazes de absorver esse comportamento devem ser incorporadas do gerenciamento de recursos hídricos, uma vez que a estacionariedade estaria “morta”. Nos modelos hidrológicos utilizados pelo setor elétrico, o impacto das intervenções humanas na alteração das características das bacias ao longo do tempo é considerado moderado, e, portanto, a estacionariedade das séries é uma forte premissa adotada, independentemente da bacia.

Além dos problemas referentes à adoção da hipótese anteriormente apresentada, o usuário deve estar atento a algumas outras questões ao utilizar modelos hidrológicos estocásticos. Primeiramente há incerteza na adequação das equações paramétricas escolhidas para representar o fenômeno. Usualmente, essas equações são baseadas puramente em teoria estatística de séries temporais e não guardam quase ou nenhuma restrição sobre as características hidrológicas da bacia estudada.

O processo de estimação dos parâmetros sofre dos mesmos problemas referentes às funções matemáticas escolhidas para realizá-la, assim como no caso de modelos determinísticos. O tamanho do registro histórico de vazões influencia diretamente a qualidade da informação que pode ser extraída, ou seja, para séries muito curtas os parâmetros estimados dificilmente capturam de fato as características intrínsecas do fenômeno estocástico.

Mais importante que o tamanho da série deve-se ainda discutir a qualidade dos dados de vazão disponíveis, uma vez que, usualmente, são obtidos através de técnicas indiretas de medição (necessitam de um modelo de ajuste da variável de fato medida para variável pretendida, como no método de curva-chave) que possuem suas próprias incertezas. Os dados, portanto, devem trazer de fato informação que permitam uma melhor definição e estimação dos parâmetros do modelo e não simplesmente mais dados para processar.

Outro ponto importante, que deve ser observado, é a sensibilidade do modelo em capturar comportamentos referentes a fatores exógenos à formulação matemática. Um modelo de série temporal procura usualmente estabelecer os parâmetros que

definem um termo da série em função de termos anteriores. Entretanto, em se tratando de modelagem de um processo físico natural, é notório que a realização de um fenômeno não se dará apenas em função de uma única variável. Existem diversos fatores externos, com diferentes graus de relevância, que podem influenciar na resposta da bacia em cada momento.

2.2.4. Desafios na Modelagem Hidrológica

Independente da estrutura do modelo escolhido para representar o ciclo hidrológico, algumas questões inerentes à modelagem merecem atenção. Tais desafios estão ligados tanto a não compatibilidade exata do modelo com o fenômeno representado, quanto ao desconhecimento ou incapacidade de se conhecer com devidos detalhes as facetas do fenômeno hidrológico.

Como ponto de partida, pode-se tomar a lista elaborada por O'DONNELL e CANEDO (1980 *apud* CANEDO, 1989), onde são apresentadas as principais fontes de incerteza no uso de modelos determinísticos (alguns também podem ser extrapolados para modelos estocásticos) e a discussão sobre muitos deles se fez (ou fará) ao longo deste capítulo:

1) Registro de Dados:

- Erro na coleta de dados brutos;
- Redução de dados pontuais em médias espaciais;
- Redução de dados contínuos em médias temporais;
- Erros no processo indireto de estimação de dados secundários (como vazão);

2) Estrutura dos Modelos:

- Conhecimento imperfeito dos processos físicos que ocorrem na bacia;
- Aproximações para que representações desses processos sejam viavelmente tratadas;
- Tratamento de variáveis com distribuição espacial de forma concentrada;
- Tratamento sequencial de processos concomitantes;
- Omissão de processos considerados menos relevantes;

3) Calibração dos modelos:

- Escolha da função objetivo;
- Critério de convergência na otimização;

- Ocorrência de mínimos locais;
- Tamanho das séries de dados de calibração;
- Amostragem das séries de dados de calibração;
- Dificuldades na estimação adequada dos parâmetros.

Muitos dos itens apresentados pelos autores são referentes apenas a modelos determinísticos concentrados, entretanto dos modelos distribuídos outras questões importantes emergem e serão tratadas ao longo do texto.

Pôde ser observado ao longo das discussões já apresentadas sobre o desenvolvimento da modelagem hidrológica, que o caminho tomado para seu aperfeiçoamento passa quase que exclusivamente por uma representação mais completa (ou simplesmente mais complexa) do ciclo hidrológico. Entretanto, muitas são as limitações desse caminho e algumas já foram apresentadas na discussão sobre a formulação dos modelos. De forma a complementar esta discussão, os itens que se seguem são breves exposições dos principais problemas encontrados e debatidos na literatura acerca da aplicação de modelos hidrológicos. Essas questões estão normalmente associadas a modelos determinísticos, mas assim como alguns itens da lista de possíveis fontes de incertezas apresentada acima, alguns pontos podem ser extrapolados para modelos estocásticos e serão importantes no desenvolvimento do estudo proposto.

a) Escala

Em hidrologia escala é normalmente definida como o tamanho do intervalo de amostragem em que as observações hidrológicas são realizadas ou ainda o tamanho da malha usada em processos computacionais numéricos (SINGH e WOOLHISER, 2002) e assim o é tanto para dimensões espaciais quanto temporais. Entretanto, a escala dos dados obtidos nesse processo não necessariamente será a mesma dos fenômenos de interesse. DOOGE (1992) sugere que uma completa teoria hidrológica relevante para a modelagem climática deveria cobrir fenômenos desde a escala molecular (10^{-10} m/ 10^{-1} s) até a escala da grade de modelos de circulação global (100 km/ 10^5 s). Uma faixa tão grande de escalas nunca poderia ser representada por um modelo e a construção de um arcabouço teórico ainda esbarra na dificuldade em compreender as diferentes aparências com que os fenômenos são percebidos em diferentes escalas (DOOGE, 1986).

Um modelo deve, portanto, trabalhar sob uma faixa específica de escalas de representação do objeto modelado e incompatibilidades com dados disponíveis estarão certamente presentes. Uma das principais hipóteses em modelos hidrológicos

distribuídos é que na unidade da malha há homogeneidade nos parâmetros do modelo (SINGH e WOOLHISER, 2002). Entretanto dependendo da escala do modelo escolhido é sabido que tal hipótese não se verifica na prática, onde a variabilidade dos parâmetros submalha (internos a unidade de malha) é importante na resposta da bacia a um evento de chuva, por exemplo. Uma vez que sistemas hidrológicos não são lineares trocar um parâmetro local pelo seu equivalente promediado na escala da malha não apresentaria o mesmo resultado (BEVEN, 2001).

Dessa forma a obtenção de dados nas escalas apropriadas a cada modelo é fundamental para a representação acurada do sistema hidrológico. Entretanto as técnicas de medição existentes não são capazes de captar toda a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros nas escalas de representação dos modelos. Acredita-se que técnicas de sensoriamento remoto poderiam suprir essa lacuna, porém, como será discutido no item c, a capacidade desses novos dados em trazer informação ao modelo não é garantida.

Assim, BEVEN (1995) defende que o primeiro passo no uso de um modelo distribuído deve ser a definição dos processos dominantes de controle presentes no local estudado. O autor afirma ainda que qualquer teoria para corrigir os erros de escala em modelos hidrológicos se mostrará em algum momento falha, levando à necessidade de se reconhecer a dependência das estruturas dos modelos à escala de interesse. Porém essa visão não é universal e até hoje grande esforço é empregado em estudos para se aprimorar as estimativas de parâmetros submalha. WOOD (1994) compara os resultados de um modelo distribuído e um concentrado para uma mesma bacia e assim decidir quando o resultado promediado do distribuído se assemelha ao resultado do concentrado.

Mais recentemente (WOOD *et al.* 2011) convocaram a comunidade científica hidrológica para cooperar naquele que seria o grande desafio da área na atualidade, o desenvolvimento de um modelo de circulação global e obtenção de dados de superfície em uma malha de alta resolução (aproximadamente 100m). Entretanto como comenta BEVEN (2011) apenas o refinamento da representação do terreno ou das medições não resolveria os problemas causados por falta de conhecimento dos processos governantes em escalas menores do que a representação da malha.

b) Quantidade e Qualidade dos dados

O desempenho de um modelo está diretamente ligado à disponibilidade, a quantidade e a qualidade dos dados de entrada utilizados. Idealmente, o usuário condicionaria a escolha do modelo a ser utilizado à existência de dados compatíveis. No caso de dados hidrometeorológicos as limitações como insuficiência (em

quantidade e distribuição) de postos medidores ao longo da bacia, séries de pequena duração e discretização inadequada dos dados podem levar a escolha de um modelo que simplesmente seja mais adequado a essas limitações e não a um que de fato represente melhor a área estudada (CANEDO, 1989). Assim o autor sugere que a modelagem hidrológica não escapa do problema do cobertor curto, ou seja, é preciso decidir o que se busca como resultado do processo de modelagem: um melhor entendimento das especificidades dos fenômenos que compõe o ciclo hidrológico ou, pragmaticamente, a melhor resposta final possível para o cumprimento de demandas de ordem prática?

Essa questão está ainda ligada ao problema da escala dos modelos e das observações apresentado anteriormente. A falta de informação para se estabelecer parâmetros submalha é um elemento importante no desenvolvimento de um modelo, que represente de fato os processos que ele propõe. SILBERSTEIN (2006) divide a comunidade científica hidrológica em “modeladores”, que se preocupam apenas no desenvolvimento de ferramentas computacionais mais complexas, e “experimentalistas”, que se preocupam com a observação de campo dos processos físicos que ocorrem na bacia e em suas medições, e defende que essas abordagens diferenciadas, e hoje afastadas, devem se complementar, uma vez que sem dados o caráter científico dos modelos é perdido.

Soma-se a isso o aumento da complexidade dos modelos ou ainda à medida que são expandidos os processos internamente representados, a necessidade de dados para calibrá-los e validá-los também aumenta. Da mesma forma a tecnologia para obtenção de novos atributos ou incremento de precisão nas observações já realizadas se desenvolve, porém em ritmos e direções diferentes. Novos modelos são criados a todo o momento para lidar com novos tipos de dados, porém não para testá-los (SILBERSTEIN, 2006).

Pode-se ainda discutir a real possibilidade em se obter de fato todos os dados necessários para calibração de um modelo distribuído em bacias de grande área. Seria possível mapear com a precisão adequada a variação de porosidade do solo para toda bacia Amazônica? As séries históricas de vazões fluviais são grandes o suficiente para se capturar todas as sazonalidades causadas por fenômenos hidroclimatológicos? Há confiança na acurácia dos dados medidos? Essas e outras perguntas devem ser consideradas tanto no processo de escolha do modelo a ser utilizado assim como na interpretação de seus resultados.

c) Dados de Satélite

O desenvolvimento tecnológico possibilitou o envio de diversos satélites para observação da superfície terrestre. Atualmente, há uma quantidade muito grande de dados obtidos dessa forma e que vem apoiando diversos estudos na hidrologia. Essas observações têm sido apontadas como um novo paradigma para obtenção de dados hidrológicos. De fato a distribuição espacial dos parâmetros obtidos por satélite é uma grande vantagem dessa tecnologia, porém outros problemas emergem e serão discutidos a seguir.

O sensoriamento remoto é processo de se inferir parâmetros de superfície através de medições de radiação eletromagnéticas refletidas e emitidas da superfície terrestre. Os parâmetros, que potencialmente são obtidos com as capturas de satélite são: dados de precipitação por radar (SINGH e WOOLHISER, 2002; KRAJEWSKI *et al.*, 2002), radiação visível e infravermelho próximo para mapeamento de neve e qualidade da água, infravermelho térmico para temperatura da superfície e estudos de balanço de energia ou ainda micro-ondas passivas para umidade do solo e neve. SCHUMUGGE *et al.* (2002) fizeram uma didática revisão dessas técnicas e de possíveis aplicações do sensoriamento remoto na hidrologia (ver também SCHULTZ, 1988 e KITE E PIETRONIRO, 2009).

Entretanto, deve-se ter cuidado ao se utilizar dados de sensoriamento remoto, pois os problemas na estimação e validação dos parâmetros do modelo são se esgotam, mesmo que a distribuição espacial dos atributos medidos seja facilmente obtida. Primeiramente as observações de satélite também possuem erro de medição e limitações que dependerão das condições locais da atmosfera (cobertura de nuvem atrapalha medições na faixa do visível, por exemplo).

Segundo, as incertezas da medição não são apenas de caráter técnico; o satélite possui equipamento de medição de ondas eletromagnéticas em diversas frequências e para transformar essas medições em dados hidrológicos, algum modelo que interprete as medições e as transformem em informação hidrológica (como umidade do solo, por exemplo), é necessário e possui seus erros associados.

Por último, por não ser uma técnica de medição direta, as observações de satélite também necessitam de calibração e validação dos resultados obtidos, ou seja, necessitam das mesmas observações de campo e estão sujeitos aos mesmos problemas discutidos nas sessões anteriores (BEVEN, 2001).

Portanto o sensoriamento remoto é de fato uma importante ferramenta para obtenção de dados hidrológicos em toda a superfície terrestre, porém não esgota os principais problemas associados ao processo de modelagem e referentes à não acurácia e validação dos dados obtidos.

d) Calibração e validação dos parâmetros

A calibração de um modelo hidrológico é a etapa em que os parâmetros deste modelo são identificados e avaliados. Essa é uma fase essencial na estruturação do modelo e que definirá diretamente a qualidade das respostas obtidas em sua aplicação. Não obstante essa tem recebido especial atenção na pesquisa em modelagem hidrológica ao longo dos anos acarretando no desenvolvimento de diversos métodos matemáticos para sua execução.

O objetivo de um processo de calibração é obter um conjunto ótimo de parâmetros que reflitam as respostas dos fenômenos de interesse no modelo na bacia. Segundo TROUTMAN (1985 *apud* ROTUNNO FILHO, 1989) há duas maneiras de se definir esse conjunto ótimo de valores. A primeira seria assumir valores fisicamente compatíveis com as características da bacia estudada. A segunda definição possível seria através do atendimento de um critério matemático em uma função objetivo visando à minimização do erro cometido pelo modelo.

Em um hipotético modelo perfeito essas duas definições se sobreporiam, mas como na prática isso não se confirma obtêm-se, muitas vezes, valores que diminuem certa função objetivo, mas que não representam valores fisicamente reais. Faz-se então necessário o estabelecimento de restrições aos valores dos parâmetros fisicamente representativas (ROTUNNO FILHO, 1989) e recai-se novamente no problema do “cobertor curto” comentado acima. Uma vez assumida a incapacidade do modelo em ser uma representação fiel do mundo físico, a escolha do conjunto de parâmetros “ótimos” deve ser condicionada ao real objetivo final da aplicação dos modelos: parâmetros fisicamente plausíveis ou resultados pragmáticos e melhores?.

Os potenciais problemas encontrados na etapa de calibração dos modelos hidrológicos estão intimamente ligado à dificuldade em se obter os dados necessários para análise dos mesmos. Além disso, há dificuldade em se determinar quais seriam os atributos medidos em campo para se estimar os parâmetros e erros associados às medições. Assim a consistência dos dados necessários no processo de calibração é imprescindível para o estabelecimento de um modelo adequado.

BEVEN (2001) defende que mesmo que fosse desenvolvido o modelo perfeito para a descrição dos processos em uma bacia, as características únicas locais aliadas à escassez de dados na escala adequada tornariam a tarefa de identificar um conjunto ótimo de parâmetros impossível. Na verdade a falta de dados disponíveis levaria a identificação de uma série de conjuntos de parâmetros ótimos que trariam resultados igualmente aceitáveis.

Assim, considerando que os modelos não são perfeitos e há grande déficit de dados para definição de seus parâmetros, o autor apresenta o conceito de

equifinalidade (*equifinality*) como uma melhor abordagem para esse problema. Ao invés de se procurar um modelo perfeito com parâmetros perfeitos, os hidrólogos, segundo BEVEN (2001; BEVEN, 2006a) deveriam aceitar que existe uma série de estruturas de modelos e conjunto de parâmetros que seriam aceitáveis – segundo um critério pré-estabelecido – para a simulação dos dados disponíveis.

Outra etapa na modelagem hidrológica, complementar a calibração é aquela na qual o modelo, com seus parâmetros já estabelecidos, é utilizado com dados diferentes a fim de verificar ou validar suas respostas em comparação a valores esperados. Normalmente, divide-se o registro de dados e uma parte é utilizada para calibrar o modelo e outra para sua validação (“*split-sample-test*”). Tal procedimento deve ser repetido para todas as situações nas quais o modelo deverá ser utilizado e assim constatar sua validade em cada uma delas. (ROTUNNO FILHO, 1989).

SILBERSTEIN (2006) defende que modelos em uma perspectiva científica nunca poderiam ser de fato validados. Como conclui ORESKES *et al.* (1994), modelos não podem ser verificados porque existem muitos parâmetros inerentes aos fenômenos modelados que são desconhecidos. A maior parte dos trabalhos, que lidam com validação de modelos, trata o problema do ponto de vista da engenharia, ou seja, determinam se sob certas condições o modelo reproduz bem observações obtidas no campo. Nesse sentido, quanto mais dados, maior seria a confiança de que o modelo representa o conjunto de respostas do mundo real. Assim, como dizem KORNIKOW E BREDEHOEFT (1992), modelos podem ser suportados por observações, porém nunca verificados (se de fato representam a realidade).

e) Análise de incertezas

A partir do exposto ao longo deste capítulo pode-se concluir que os modelos hidrológicos apresentam uma série de limitações. A heterogeneidade das bacias hidrográficas, a representação dos processos físicos de interesse ou ainda as limitações dos métodos de calibração e validação são grandes fontes de incerteza e devem estar sempre presentes no desenvolvimento e nas análises dos resultados de modelos.

Dessa forma, alguns pesquisadores defendem que a análise de incerteza deve constituir parte fundamental do processo de modelagem hidrológica. Como exposto por KUCZERA E PARENT (1998 *apud* XAVIER, 2002), os modelos conceituais podem ser vistos como o resultado de uma combinação empírica de operadores matemáticos que descrevem as características principais de um ciclo hidrológico idealizado, fato que não permitiria que as séries de vazão geradas fossem encaradas como verdade

absoluta. Mesmo que um modelo de alta resolução fosse adotado, seus resultados jamais poderiam ser encarados dessa maneira.

Os autores ainda destacam, que sem uma previsão realista da incerteza dos parâmetros não seria possível efetuar com qualquer confiança tarefas tais como avaliar intervalos de confiança de respostas do modelo, prever a significância dos desvios em testes de validação e prever o valor de relações de regionalização obtidas entre parâmetros do modelo e características da bacia. As incertezas na resposta de um modelo não são induzidas apenas pela propagação das incertezas dos parâmetros simulados, mas também, pela incerteza intrínseca às medições dos dados de entrada e a própria incerteza natural referente à estrutura do modelo (XAVIER, 2002).

Motivado por questões como as apresentadas acima, BEVEN (2001; BEVEN, 2006a) propôs uma metodologia na qual os resultados do modelo são apresentados em função de um conjunto de parâmetros considerados igualmente capazes de representar os fenômenos da bacia de maneira aceitável. Em outras palavras diferentes modelos com diferentes conjuntos de parâmetros poderiam ser testados como hipóteses de representações dos processos hidrológicos. Ele (BEVEN, 2006b; BEVEN, 2008) ainda defende, que uma análise formal de incertezas deve ser explicitada para os usuários, não importando o modelo utilizado ou seu grau de ajuste.

Entretanto, mesmo que conscientes sobre as diversas fontes de incerteza, trabalhos que tratam a modelagem hidrológica sobre uma perspectiva de análise desses erros é pouco comum na literatura. PAPPENBERGER E BEVEN (2006) listam e rebatem os principais argumentos utilizados pela comunidade para ignorar a análise de incerteza na pesquisa hidrológica, entre eles:

- A análise de incertezas não seria necessária em modelos fisicamente realistas;
- A análise de incertezas não poderia ser utilizada para testar hipóteses em hidrologia e hidráulica;
- Distribuições de probabilidades (ou incertezas) não poderiam ser entendidas por tomadores de decisões ou pelo público;
- A análise de incertezas não poderia ser incorporada em processos de tomada de decisão;
- A análise de incertezas seria muito subjetiva e muito complicada para ser aplicada.

Os autores concluem que nenhum desses argumentos é forte o suficiente para derrubar suas convicções sobre a necessidade em se tratar de incertezas sempre que um modelo hidrológico estiver em pauta. E ainda, que boa parte da relutância em se

incorporar essa abordagem no desenvolvimento da pesquisa hidrológica viria da ausência de uma metodologia consolidada e disponível para nortear o caminho da pesquisa nesse sentido.

2.2.5. Conclusões Gerais

Como visto ao longo deste capítulo, determinar o que acontece com a chuva, independentemente do caminho tomado não é tarefa simples. Há diversas limitações ligadas à dificuldade em conhecer melhor a própria natureza dos processos modelados, como outros associados a questões de ordem prática, como inexistência de dados confiáveis. O tipo de modelo adotado para resolução de um problema de engenharia específico terá, intrinsecamente à sua formulação, potenciais fontes de incerteza. Aliado a isso, tem-se os erros referentes aos processos de estimação e validação de seus parâmetros.

Portanto, como já afirmava DOOGE (1972), um modelo nunca será perfeito e é algo que deve ser utilizado com parcimônia e nunca será algo em que se deve acreditar. Conhecer a natureza do fenômeno de interesse é imprescindível no desenvolvimento e na avaliação dos resultados apresentados por um modelo e seu aprimoramento passa invariavelmente por uma análise profunda de suas potencialidades e limitações.

Esse trabalho analisará o modelo estocástico de séries temporais PREVIVAZ para previsão de vazões semanais. Como será discutido nas seções subsequentes, os erros apresentados em suas previsões são produto das limitações apresentadas aqui, sejam em termos de qualidade dos dados de vazão ou ainda devido a real validade das hipóteses adotadas, por exemplo.

Ainda assim, boa parte das discussões apresentadas ao longo deste capítulo é referente às dificuldades na aplicação de modelos determinísticos. Como intuito é subsidiar o aprimoramento do PREVIVAZ e considerando o que afirmou XAVIER (2002), mais importante do que se obter um melhor ajuste entre dados previstos e observados, os fatores que contribuem para a incerteza do modelo devem ser investigados e assim se aumentar a confiabilidade de suas previsões. Dessa forma, devem-se analisar os possíveis caminhos a se tomar e ter consciência de suas dificuldades e potenciais vantagens.

Os possíveis caminhos para o PREVIVAZ passam exclusivamente pela incorporação em sua formulação de variáveis exógenas. Quais variáveis e quantas deve ser objeto de estudo específico. Ainda deve-se analisar que dados utilizar para cumprir com tal objetivo. Considerando a ampla aplicação do modelo por bacias

diversas em todo o Brasil, seriam esses dados disponíveis e adequados em todas elas? A obtenção de dados por sensoriamento remoto é uma realidade, entretanto seu uso traria mais informação ao modelo ou mais uma fonte de incerteza? Seria possível incorporar a análise de incertezas em um modelo como o PREVIVAZ, que é utilizado extensivamente como apoio a tomada de decisões em várias esferas do setor elétrico? Essas são questões chave para o aprimoramento do modelo PREVIVAZ e estarão, sem dúvida, presentes ao longo de toda a discussão acerca deste tema.

3. Metodologia

3.1. Modelo PREVIVAZ

3.1.1. Modelo Conceitual e o Planejamento da Operação do SIN.

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada nas análises desenvolvidas neste estudo. Inicialmente são discutidos os métodos e estrutura do modelo PREVIVAZ. Como já apresentado anteriormente, este é um modelo estocástico de previsão de vazões semanais utilizado no planejamento da operação do SIN. Ele tem como objetivo a análise e teste de alternativas metodológicas para a modelagem estocástica das aflúncias semanais para até 6 semanas a frente (CEPEL, 2009).

Segundo o determinado no módulo 7.3 dos Procedimentos de Rede do ONS (ONS, 2009) o modelo é utilizado rotineiramente pelo ONS para prever as vazões naturais afluentes a todos os aproveitamentos do SIN. Essas previsões são insumo básico para elaboração dos PMO's e de suas revisões semanais. Como regra geral tal procedimento é realizado nas quartas-feiras da última semana operativa do mês e as previsões para as revisões às quintas-feiras da semana operativa anterior.

Para estimativas da vazão da semana em curso, são utilizados modelos de discretização diária, cujos resultados são agregados às observações já realizadas nessa semana. Assim é obtida a vazão média da semana em curso e esta é utilizada como tendência para o PREVIVAZ elaborar as previsões das semanas subseqüentes. Com o passar das semanas as revisões são elaboradas (utilizando da mesma metodologia descrita neste capítulo) tomando a vazão observada da semana anterior como tendência para o modelo, que irá ter como resultado a previsão para as semanas faltantes do PMO do mês em curso. Esse procedimento é realizado até a última semana operativa do mês, depois da qual o PMO do mês seguinte deverá ser elaborado. Os procedimentos básicos do PMO foram melhor descritos na seção 2.1.4.

O PREVIVAZ é baseado em modelos lineares de séries temporais univariadas, utilizando assim, apenas o histórico de vazões do posto (aproveitamento hidroelétrico) como informação para sua previsão. Dessa forma, possíveis dados de postos pluviométricos ou fluviométricos próximos não são considerados no processo de previsão (CEPEL, 2009).

Como discutido na seção 2.2.3, a modelagem estocástica de séries temporais aplicada à previsão de vazões fluviais assume que a vazão futura pode ser escrita como uma função linear de n observações passadas. Para tal, esse tipo de modelo toma partido, não somente do comportamento sazonal das aflúncias descrito pelo

histórico, mas também da chamada tendência hidrológica. A tendência hidrológica pode ser entendida como o comportamento observado nas séries históricas de vazões fluviais naturais de valores superiores ou inferiores ao valor normal, para um determinado período, serem seguidos e precedidos por valores superiores ou inferiores ao valor normal. Em outras palavras, entende-se que se a vazão observada em uma determinada semana foi maior do que a média sazonal para esta semana, é provável que a vazão para semana seguinte também seja maior do que a média (COSTA, *et al.*, 2007).

A ocorrência da tendência hidrológica pode ser atribuída ao fenômeno da infiltração de parcela do volume precipitado sobre a bacia hidrográfica, que tem relação direta com o volume de escoamento superficial para esse mesmo evento. Caso tenham ocorrido níveis consideráveis de precipitação na semana $t-1$ e conseqüentemente grandes aflúências, é esperado que na semana t as vazões fluviais também sejam altas, já que a superfície do terreno deve estar úmida diminuindo o volume infiltrado de possíveis novas precipitações e conseqüentemente aumentando o escoamento superficial. Além disso, dependendo do tempo de concentração da bacia, a parcela infiltrada em $t-1$ pode estar ainda chegando aos canais fluviais em t (COSTA, *et al.*, 2007).

Em termos de modelagem de séries temporais, a tendência hidrológica pode ser entendida como uma estrutura de dependência temporal entre seus termos, que por sua vez pode ser expressa pela função de autocorrelação (FAC) estimada do registro. A função de autocorrelação de uma série temporal é uma das estatísticas, que visam descrever a estrutura de dependência entre os termos da série. Portanto, é através deste parâmetro que se busca validar a premissa básica na modelagem por séries temporais: termos anteriores podem descrever o comportamento futuro da série. Entretanto, como foi discutido ao longo da seção 2.2 e será analisado neste estudo, o fenômeno hidrológico é resultado da interação de diversos fatores que resultam em uma vazão na calha do rio. Olhar apenas o comportamento das vazões pode não ser suficiente para capturar e prever adequadamente a quantidade de água disponível no futuro.

Antes de descrevê-la propriamente, é importante definir a função de autocovariância, $\gamma_s(s, t)$, que pode ser entendida como o produto de segundo momento (SHUMWAY & STOFFER, 2006):

$$\gamma_s(s, t) = E[(x_s - \mu_s)(x_t - \mu_t)], \quad [3.1.1]$$

para todo s e t , onde:

x_i é a variável avaliada no período de i ;

μ_i é a média da variável x_i no período i .

A função de autocovariância mede a dependência linear entre dois pontos de uma mesma série observada em tempos diferentes (s e t). Já a FAC ($\rho(s, t)$), que é uma normalização da função de autocovariância, pode ser entendida como uma medida da previsibilidade da série em um tempo t (x_t) usando apenas o valor de x_s . A diferença, $s-t$, é o chamado *lag* para o qual a FAC é calculada. Assim essa função pode ser escrita matematicamente como:

$$\rho(s, t) = \gamma_s(s, t) / \sqrt{\sigma_s \sigma_t}, \quad [3.1.2]$$

onde:

σ_i é o desvio padrão da variável avaliada no período i .

Em termos teóricos caso $\rho(s, t)$ assuma o valor 1, pode-se dizer que x_t é perfeitamente previsível a partir de uma relação linear do tipo $x_t = \beta_0 + \beta_1 x_s$. Assim, como a função só poderá assumir valores entre $[-1, 1]$, tem-se uma boa medida da previsibilidade dos termos da série em uma abordagem de séries temporais (SHUMWAY & STOFFER, 2006).

Como com qualquer outra estrutura de dependência em séries temporais, modelos autorregressivos (AR) poderiam, uma vez atendida a premissa básica, reproduzir o comportamento das afluências semanais, sendo esta uma abordagem flexível e bastante utilizada para modelagem estocástica de vazões fluviais. Conceitualmente esses modelos expressam a vazão (Q) no tempo t em função das n vazões passadas, cada qual com seu respectivo coeficiente autorregressivo a , somado a um resíduo (r_n) de ordem n . Mais precisamente são do tipo:

$$Q_t = a_1 Q_{t-1} + a_2 Q_{t-2} + \dots + a_n Q_{t-n} + r_n \quad [3.1.3]$$

Segundo HIPEL E MCLEOD (1994) o resíduo r_n é uma sequência definida como sendo distribuída independentemente. Isto faz com que eles sejam não correlacionados (correlação temporal nula), ter distribuição normal e devem ter variância (σ_r^2) constante, ou seja, deve satisfazer:

$$E[r_t r_{t-k}] = \begin{cases} \sigma_r^2, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} \quad [3.1.4]$$

Uma vez conhecidos os coeficientes a_i e o resíduo r_n , encontrar o valor de qualquer vazão em um tempo t qualquer seria trivial. Entretanto, definir esses parâmetros é a principal atividade no processo de modelagem e deverá ser feito a partir do histórico de vazões observadas. Apesar de ter como estrutura principal os modelos AR, o modelo PREVIVAZ, na verdade, é um conjunto de algoritmos, que se diferenciam principalmente na forma de estimar tais parâmetros. Além dessa há outras diferenças entre os 15 diferentes algoritmos, que compõem o PREVIVAZ:

- as séries históricas de vazões podem sofrer pré-transformações do tipo Box&Cox ou logarítmica;
- aos modelos podem ser inseridos um termo de média móvel para suavizar a série de resíduos ou não (ARMA (n), PARMA (n,q));
- podem considerar os parâmetros diferentes em cada período (semana) ou não, ou seja, uma estrutura de correlação periódica ou não (PAR(n,q), PARMA(p,q));
- distintas formas de estimação da função de autocorrelação do registro.

Segundo BOX *et al.* (2008), a definição da estrutura de correlação de um modelo autorregressivo e sua respectiva ordem devem ser definidos a partir da FAC, ou seja, seguindo os passos:

1. Identificação e Seleção do Modelo: Verificação acerca da estacionariedade das variáveis; Identificação de sazonalidades que devem ser potencialmente modeladas; Usar gráficos de autocorrelação para determinar se algum componente autorregressivo ou de média móvel deve ser utilizado.
2. Estimação dos parâmetros: Encontrar os parâmetros de melhor ajuste à série histórica.
3. Validação do modelo: Verificar se o modelo estimado está de acordo com as especificações de um modelo estacionário e univariado, ou em outras palavras, a série de resíduos deve ser independente entre si e constante no tempo, como definido na equação [3.1.4].

Já o PREVIVAZ adota uma abordagem diferente, onde as alternativas de modelagem são previamente definidas e somente em uma etapa posterior de

validação a melhor alternativa é selecionada. Os testes realizados e o critério de escolha da melhor alternativa serão detalhados na seção 3.1.4.

3.1.2. Modelo Matemático

O mais geral de todos esses algoritmos é aquele que considera tanto os termos periódicos quanto o parâmetro de média móvel e será a seguir descrito. Nas próximas linhas, para efeitos práticos, alguns passos matemáticos serão omitidos, porém podem ser consultados em CEPEL (2009) e CEPEL (1997). Em sua forma normalizada e para ordem 1 de média móvel, o modelo PARMA(p,1) pode ser escrito matematicamente como:

$$\left(\frac{Q_t - \mu_s}{\sigma_s}\right) = a_1^s \left(\frac{Q_{t-1} - \mu_{s-1}}{\sigma_{s-1}}\right) + \dots + a_p^s \left(\frac{Q_{t-p} - \mu_{s-p}}{\sigma_{s-p}}\right) + \theta_1^s r_{t-1} + r_t \quad [3.1.5]$$

onde:

Q_t é uma série sazonal de período m ;

S é o número de períodos ($S = 52$ para séries semanais);

N é o número de anos;

t é índice de tempo, $t=1,2,\dots,SN$, função do ano T (1,2,3,... N) e do período s (1,2,3,..., S);

μ_s é a média sazonal de período m ;

σ_s é o desvio-padrão sazonal de período m ;

p é a ordem do operador autorregressivo;

θ_1^s é o coeficiente de média móvel de ordem 1;

r_t é a série de ruídos independentes com média zero e variância $\sigma_r^{2(s)}$;

Considerando que a função de autocorrelação sazonal ($\rho^s(p)$) entre Q_t e Q_{t-p} pode ser escrita como em [3.1.6] e de tal forma que t corresponda ao período s :

$$\rho^s(p) = E \left[\left(\frac{Q_{t-1} - \mu_s}{\sigma_s} \right) \left(\frac{Q_{t-p} - \mu_{s-p}}{\sigma_{s-p}} \right) \right] \quad [3.1.6]$$

Multiplicando-se a equação [3.1.5] por Q_t e Q_{t-1} e tomando o valor esperado, obtêm-se, respectivamente:

$$\sigma_{r_t}^2 = 1 - a_1^s \rho^s(1) - \dots - a_p^s \rho^s(p) + \theta_1^s (a_1^s - \theta_1^s) \sigma_{r_{t-1}}^2 \quad [3.1.7]$$

$$\theta_1^s = \frac{a_1^s - \rho^s(1) + a_2^s \rho^{s-1}(1) + \dots + a_p^s \rho^{s-1}(p-1)}{\sigma_{r_{t-1}}^2} \quad [3.1.8]$$

De maneira geral, multiplicando-se ainda [3.1.5] por Q_{t-p-1} , obtêm-se uma expressão geral para o coeficiente autorregressivo lag $p+1$, que podem ser estimados a partir do histórico de vazões:

$$\rho^s(p+1) = a_1^s \rho^{s-1}(p) + a_2^s \rho^{s-2}(p-1) + \dots + a_p^s \rho^{s-p}(1) \quad [3.1.9]$$

Fazendo [3.1.9] para p a partir de 1 e arrumando as equações obtidas na forma matricial, encontram-se as equações de Yule-Walker:

$$\begin{bmatrix} \rho^{s-1}(1) & 1 & \dots & \rho^{s-2}(p-2) \\ \rho^{s-1}(2) & \rho^{s-1}(1) & \dots & \rho^{s-3}(p-3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho^{s-1}(p) & \rho^{s-2}(p-1) & \dots & \rho^{s-p}(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^s \\ a_2^s \\ \vdots \\ a_p^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho^s(2) \\ \rho^s(3) \\ \vdots \\ \rho^s(p+1) \end{bmatrix} \quad [3.1.10]$$

A partir dessas equações é possível estimar os parâmetros, a_i^s , que ajustam o modelo de previsão ao histórico de afluições, uma vez que os coeficientes de autocorrelação ($\rho^s(p)$). Para tal, são utilizados dentro do PREVIVAZ três métodos distintos, que serão brevemente descritos a seguir.

3.1.3. Estimação dos Parâmetros

O primeiro desses métodos é chamado Método dos Momentos (CEPEL, 2001). Nele os coeficientes autorregressivos são obtidos através da resolução do sistema de equações [3.1.10]. As estimativas para as funções $\rho^s(p)$ são feitas através da versão amostral da equação [3.1.6]. O parâmetro referente ao termo de média móvel de cada semana é obtido a partir de um procedimento iterativo com as equações [3.1.7] e [3.1.8], o qual tem início com a primeira semana do ano. Adota-se como uma primeira estimativa para a variância dos ruídos do período imediatamente anterior (por exemplo, a última semana do ano), $\sigma_{r_{t-1}}^2$, o valor correspondente ao do modelo autorregressivo de ordem 1, dado pela equação [3.1.7] sem os termos associados ao coeficiente de média móvel. A seguir obtêm-se θ_1^s pela expressão [3.1.8]. Substituindo-se este valor em [3.1.7], obtêm-se $\sigma_{r_n}^2$ associado à estimativa de θ_1^s , e assim sucessivamente até a convergência dos valores.

Já o método de regressão linear considera todo o registro de afluições representado como na equação [3.1.5]. Tomando ainda o valor observado para as vazões no registro histórico da semana s do i -ésimo ano, $q_i^s = \left((Q_i^s - \mu_i) / \sigma_i \right)$, e reescrevendo o sistema de equações em sua forma matricial:

$$\begin{bmatrix} q_1^s \\ q_2^s \\ \dots \\ q_N^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1^{s-1} & \dots & q_1^{s-p} & a_1^{s-1} \\ q_2^{s-1} & \dots & q_2^{s-p} & a_2^{s-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_N^{s-1} & \dots & q_N^{s-p} & a_N^{s-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^s \\ \dots \\ a_p^s \\ \theta_1^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1^s \\ r_2^s \\ \dots \\ r_N^s \end{bmatrix} \quad [3.1.11]$$

ou ainda, escrita de outra forma e com as variáveis nas posições correspondentes,

$$Z = X\beta + \varepsilon \quad [3.1.12]$$

cuja solução por mínimos quadrados (CEPEL, 2001), será dada por:

$$\beta = (X^T X)^{-1} (X^T Z) \quad [3.1.13]$$

Uma variante do método de regressão linear é calcular os parâmetros com relação à origem de previsão. Neste caso, o modelo PARMA (p,1) é descrito por uma regressão nas p observações e no ruído, ambos conhecidos no instante da previsão. Seja a origem da previsão no início de cada mês e chamando de s a primeira semana do mês, pode-se reescrever a equação [3.1.5] para Q do ano j e semana $s+i$ como:

$$\left(\frac{Q_j^{s+i} - \mu_{s+i}}{\sigma_{s+i}} \right) = a_1^s \left(\frac{Q_j^{s-1} - \mu_{s-1}}{\sigma_{s-1}} \right) + \dots + a_p^s \left(\frac{Q_j^{s-p} - \mu_{s-p}}{\sigma_{s-p}} \right) - \theta_1^s a_j^{s-1} + a_j^{s+i} \quad [3.1.14]$$

A equação [3.1.14] pode ser escrita em forma matricial de forma análoga à [3.1.11] e resolvida por [3.1.13].

Este é um dos algoritmos possivelmente utilizados no PREVIVAZ para obtenção das vazões fluviais futuras. A Tabela 4 mostra todos os outros possíveis modelos e suas respectivas características, que os diferencia em termos de modelo de estrutura de correlação, método de estimação dos parâmetros e utilização potencial de séries transformadas.

3.1.4. Escolha do “melhor” Algoritmo

A escolha do algoritmo a ser utilizado pelo PREVIVAZ, dentre as opções apresentadas na Tabela 4, é feita a cada semana através de um teste, no qual cada série é dividida em duas partes. Inicialmente apenas a primeira parte da série é utilizada para estimar os parâmetros segundo o método adotado por cada algoritmo. Com a segunda metade da série verificam-se os erros de previsão de cada algoritmo. Completada essa fase, o mesmo procedimento é refeito, porém com as metades das séries invertidas, ou seja, a segunda é utilizada para estimar os parâmetros e a primeira para verificar os erros. Para cada algoritmo então é calculado o erro médio quadrático associado á previsão para primeira semana contabilizado em todo o registro e aquele que apresentar o menor valor é o escolhido. Esse procedimento de estimação dos parâmetros e escolha do algoritmo de menor erro é apresentado esquematicamente na Figura 18.

Tabela 4. Algoritmos de Previsão no PREVIVAZ. (CEPEL, 2001)

Modelo de Previsão	Características	Método de Estimação	Séries Potencialmente Transformadas
Constante	Previsão pela média anual	Momentos	Não
Sazonal	Previsão pela média do mês	Momentos	Sim
AR(p), (1≤p≤4)	Correlação estacionária	Momentos	Sim
ARMA(p,1), (1≤p≤3)	Correlação estacionária	Momentos	Sim
PAR(p)-G1, (1≤p≤4)	Correlação sazonal semanal	Momentos	Sim
PAR(p)-G2, (1≤p≤4)	Correlação sazonal mensal	Momentos	Sim
PAR(p)-G3, (1≤p≤4)	Correlação sazonal trimestral	Momentos	Sim
PAR(p)-G4, (1≤p≤4)	Correlação sazonal semestral	Momentos	Sim
PAR(p)-RO, (1≤p≤4)	Correlação sazonal	Regressão a partir da origem	Sim
PARMA(p,1)-G1, (1≤p≤4)	Correlação sazonal semanal	Momentos	Sim
PARMA(p,1)-G2, (1≤p≤4)	Correlação sazonal mensal	Momentos	Sim
PARMA(p,1)-G3, (1≤p≤4)	Correlação sazonal trimestral	Momentos	Sim
PARMA(p,1)-G4, (1≤p≤4)	Correlação sazonal semestral	Momentos	Sim
PARMA(p,1)-RO, (1≤p≤3)	Correlação sazonal	Regressão a partir da origem	Sim
PARMA(p,1)-R, (1≤p≤3)	Correlação sazonal	Regressão simples	Sim

PREVIVAZ ainda calcula os limites dos intervalos de confiança para este valor. Um intervalo de confiança representa a amplitude de valores que tem probabilidade de conter o verdadeiro valor da população, sendo o grau de confiança a probabilidade $1-\alpha$ de o intervalo conter este valor.

Essa probabilidade é determinada pela integração da função distribuição de probabilidade acumulada dos ruídos e a partir disto obtêm-se o valor crítico^{VI} $Z_{\alpha/2}$ necessário para o cálculo da margem de erro $\delta = Z_{\alpha/2}\sigma$, com a qual são calculados os limites do intervalo de confiança:

$$LI = \bar{x} - \delta; \quad [3.1.17]$$

$$LS = \bar{x} + \delta; \quad [3.1.18]$$

onde \bar{x} será a previsão da semana e σ o desvio padrão dos ruídos, cujo cálculo está descrito na seção 3.1.3.

3.2. Índices estatísticos para caracterização dos registros de vazão.

De forma a melhor entender o comportamento fluvial das bacias nos postos selecionados, este trabalho se debruçará sobre a avaliação dos erros de previsão do modelo PREVIVAZ (apresentado na seção anterior). Assim, este estudo buscará identificar quais são os potenciais fatores ou padrões identificáveis que potencialmente levam a previsões imprecisas a fim de subsidiar aprimoramentos futuros no modelo.

Para cumprir tais objetivos foram selecionados quatro postos fluviais associados a importantes aproveitamentos hidroelétricos componentes do SIN. A importância das usinas foi avaliada de forma a melhor representar os subsistemas do SIN e as diferenças nos regimes hidrológicos presentes no Brasil.

As séries semanais de vazões fluviais correspondentes aos postos selecionados foram obtidas na base de dados do ONS^{VII}. As vazões semanais são obtidas a partir da agregação dos dados diários de acordo com as semanas operativas de cada ano. Neste estudo o ano base foi o de 2013. Os dados de vazões não correspondem exatamente à medições realizadas nos locais dos postos, mas sim calculadas de forma a se eliminar as influências de reservatórios, usos consuntivos e evaporação a montante do local de medição, segundo ONS (2011). Em outras

^{VI} Considerando a normalidade da distribuição dos ruídos, o valor crítico Z é aquele que possui probabilidade de ocorrência α . Como a distribuição é simétrica, calcula-se para $\alpha/2$.

^{VII}Disponíveis em http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx.

palavras, as vazões naturais são calculadas de forma a se eliminar o efeito da operação dos reservatórios a montante nas observações realizadas no ponto de interesse.

O procedimento de cálculo dessas vazões é melhor descrito por ONS (2011), mas os principais pontos serão mostrados aqui. Após consolidação, os dados diários de vazão afluente fornecidos por agentes geradores são utilizados para o cálculo da vazão incremental (Q_{inc}) – vazão relativa apenas à área entre o aproveitamento em estudo e o(s) aproveitamento(s) de montante – através da expressão:

$$Q_{inc} = Q_{afl} - \sum_j Q_{defm_j} + Q_{uso} + Q_{evp}, \quad [3.2.1]$$

onde:

Q_{defm_j} é a vazão defluente do(s) j reservatório(s) imediatamente a montante (m^3/s).

Q_{uso} é a vazão relativa aos usos consuntivos da bacia incremental (m^3/s).

Q_{evp} é a vazão relativa à evaporação do reservatório (m^3/s).

As vazões incrementais passam ainda por tratamento a fim de se evitar a ocorrência de valores negativos, além de suavizar valores extremos que não são compatíveis com a natureza da bacia (ONS, 2011). Uma vez consolidados, os dados de Q_{inc} são utilizados no cálculo da vazão natural (Q_{nat}) seguindo a expressão:

$$Q_{nat} = Q_{natp} + Q_{inc}, \quad [3.2.2]$$

onde:

Q_{natp} é a vazão natural do(s) reservatório(s) imediatamente a montante (m^3/s).

Os dados, dessa forma trabalhados, são disponibilizados para o público no sítio da ONS^{VIII} para cada aproveitamento do SIN e discretizados mensalmente e diariamente. As vazões semanais são agregadas a partir dos dados diários de acordo com o ano operativo em curso (neste estudo adotou-se o ano de 2013). As séries analisadas a seguir correspondem aos registros mais antigos disponíveis até a última semana de 2007, já que os cinco últimos anos completos (de janeiro de 2008 até dezembro de 2012) serão utilizados na fase de avaliação dos resultados do modelo, cuja descrição será apresentada na seção 3.3.

^{VIII} Vide nota VII.

A fim de caracterizar os dados assim obtidos e buscar entender potenciais padrões em seu comportamento, alguns parâmetros estatísticos foram calculados tanto para cada semana como para todo o registro histórico. Esses foram:

- I. Média, desvio padrão e mediana amostral;
- II. Coeficiente de assimetria de Pearson (YEVJEVICH, 1972) descrito pela equação 3.0.1;

$$\alpha = 3(\bar{x} - x_{med})/\sigma, \quad [3.2.3]$$

onde:

\bar{x} é a média amostral da semana;

x_{med} é a mediana da amostra;

σ é o desvio padrão amostral.

- III. Distribuição de probabilidade para cada semana; e
- IV. Cálculo do coeficiente de autocorrelação sazonal até *lag* 6^{IX} segundo equação análoga à 2.3.2, porém substituindo os parâmetros estatísticos necessários por seus correspondentes amostrais.

A partir dos valores obtidos para α , a assimetria da distribuição de probabilidade pode ser avaliada. Os módulos dos coeficientes indicam o grau de assimetria das distribuições, já o sinal sua característica principal. Portanto, os seguintes critérios foram adotados para categorizar o formato das distribuições:

$$\begin{aligned} \alpha < 0 &\rightarrow \textit{Assimetria negativa}; & |\alpha| < 0,15 &\rightarrow \textit{Assimetria fraca}; \\ \alpha > 0 &\rightarrow \textit{Assimetria positiva}; & 0,15 < |\alpha| < 1,0 &\rightarrow \textit{Assimetria moderada}; \\ \alpha = 0 &\rightarrow \textit{Distribuição Simétrica}; & |\alpha| > 1,0 &\rightarrow \textit{Assimetria forte}. \end{aligned}$$

As séries estudadas correspondem aos aproveitamentos hidroelétricos de Tucuruí (Bacia do Rio Tocantins), Sobradinho (Bacia do Rio São Francisco), Itaipu (Bacia do Rio Paraná) e Itá (Bacia do Rio Uruguai). Como pode ser visto na figura 4

^{IX} O cálculo do coeficiente de autocorrelação foi arbitrariamente levado até *lag* 6, mesmo que dessa forma a caracterização da estrutura de correlação temporal das séries não possa ser necessariamente caracterizada. O ideal seria estabelecer um valor mínimo aceitável de correlação e estender o cálculo até que este limiar fosse alcançado. Cabe ressaltar ainda, que o PREVIVAZ, na formulação de suas alternativas de modelos autorregressivos, não considera modelos de ordem maior do que 4, embora calcule a FAC do registro para até *lag* 12.

esses aproveitamentos representam os quatro principais subsistemas do SIN e devido às dimensões continentais de nosso país possuem características hidrológicas bastante distintas. O capítulo 4 procura sintetizar, para cada região, seus respectivos atributos, que do ponto de vista hidrológico as definem. Além de características fisiográficas e hidroclimatológicas também serão apresentadas alguns aspectos socioeconômicos e históricos de cada região. Por fim são caracterizados e analisados os registros históricos de vazões para cada um dos postos.

Os índices estatísticos foram calculados através de um programa em linguagem Fortran implementado durante o desenvolvimento deste estudo em compilador *Compaq Virtual Fortran 6* e de maneira a trabalhar com dados de vazão de qualquer fonte, porém previamente consolidados. Os gráficos, que não foram elaborados em planilha *Excel*, são resultado de um programa também implementado durante o desenvolvimento do estudo em ambiente *Canopy* para linguagem *python* e sua biblioteca de funções matemáticas e gráficas *matplotlib* (disponível em <<http://matplotlib.org>>). Os produtos desses programas podem ser obtidos para qualquer número de séries de vazões e são ferramentas, que poderão vir a ser utilizadas para a extensão desse estudo para outros postos.

3.3. Avaliação do Desempenho do Modelo

A cumprir com o objetivo principal deste trabalho os resultados do modelo PREVIVAZ foram avaliados segundo uma única métrica de erro. Existem diversas metodologias possíveis para se calcular o erro associado à distância entre um valor previsto (Q_{prev}) e o valor real observado posteriormente (Q_{obs}). Entretanto, este trabalho se preocupará mais com as implicações e discussões das possíveis causas dos erros encontrados no processo de modelagem, do que promover um acompanhamento da qualidade das previsões, mesmo que este seja um possível produto do estudo.

Dessa forma, os erros (Δ) foram avaliados através do cálculo do erro relativo das previsões assim como um (assim denominado pelo autor) teste de “acurácia” dos intervalos de confiança teóricos calculados como em 3.1.5. O erro relativo (Δ) das previsões foi então obtido por:

$$\Delta = \frac{(Q_{prev} - Q_{obs})}{Q_{obs}} \quad [3.3.1]$$

Já o teste simples de acurácia realizado é descrito na figura 19. Como pode ser visto um erro relativo também é calculado no caso das vazões observadas estiverem fora dos limites teóricos dos intervalos. Esse parâmetro é calculado de forma análoga a apresentada pela equação 3.3.1, porém com a vazão limite dos intervalos (Q_{IC}) substituindo Q_{prev} .

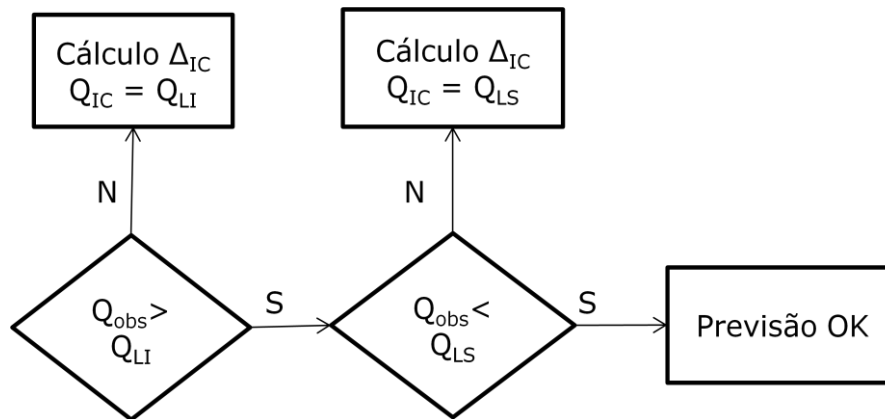


Figura 19. Diagrama explicativo do teste de acurácia para os intervalos de confiança.

4. Caracterização das Bacias Estudadas.

4.1. UHE Itá – Bacia do Uruguai

A usina hidrelétrica de Itá fez parte do programa de aproveitamento dos recursos hidroenergéticos da bacia do Rio Uruguai inventariados desde a década de 1960. Devido a sua posição estratégica e consequente baixo custo de construção por energia firme, a UHE Itá tinha posição destacada nesse projeto. Porém a operação da usina se iniciou somente no ano 2000, devido a atrasos por diversos motivos: indo da privatização da Eletrosul – anteriormente majoritária no consórcio vencedor da licitação de construção de Itá – até a crise econômica brasileira e moratória de 1989. Hoje a empresa belga Tractebel Energia opera a usina com 1.450 MW de potência instalada, sendo assim a maior usina em operação nas bacias inteiramente contidas na região Sul do país (bacias 7 e 8), como pode ser visto no diagrama apresentado na Figura 5.

Localizada no município homônimo, Itá possui um reservatório com aproximadamente 140 km² e reserva cerca de 5.000 hm³ de água. Entretanto, é considerada uma usina a fio d'água, pois não é capaz de regularizar as vazões afluentes ao longo de ano hidrológico completo. A regularização das vazões do Rio Uruguai é feito pelo reservatório da usina de Machadinho (1.140,0 MW) à montante de Itá.

A Figura 20 apresenta o mapa da bacia do Uruguai com suas sub-bacias e principais aproveitamentos hidrolétricos. O Rio Uruguai é um dos principais rios da região Sul do Brasil, que nasce na Serra Geral como Rio Pelotas a apenas 65 km da costa e 1.800 m de altitude. Seu precursor é o Rio Pelotas que ao se juntar ao Rio Canoas formam o Uruguai. Sua extensão em terras brasileiras é de 1.262 km dos seus 1.770 km até a foz no Rio da Prata (Paraná) já bem próximo ao mar. Seus principais tributários são os rios do Peixe, Chapecó e Peperi-Guaçu pela margem esquerda e os rios Passo Fundo, Ijuí e Ibicuí pela margem direita. A disponibilidade hídrica nessa região é de 565 m³/s e uma vazão específica de 23,5 L/s/km² a segunda maior do país ficando atrás apenas da região Amazônica, cuja vazão específica é de 34,1 L/s/km².

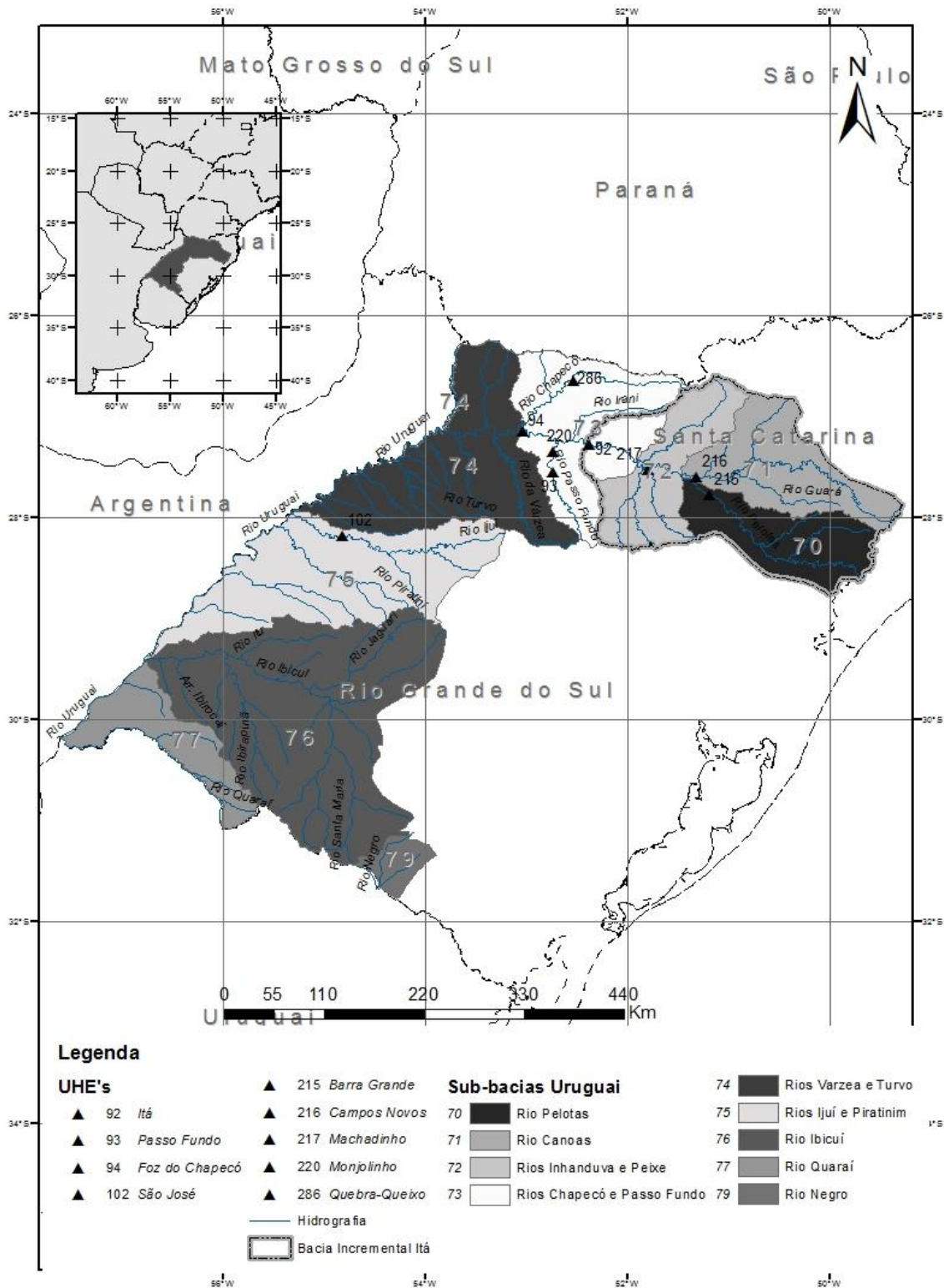


Figura 20^X. Bacia Hidrográfica do Uruguai.

^X Esse mapa e seus semelhantes apresentados ao longo deste capítulo foram elaborados pelo autor através do *software* ArcGis 10.1 para gerenciamento de dados geográficos. Tais dados foram obtidos em plataformas públicas de divulgação de dados do tipo *shapefile* da ANA, IBGE e ANEEL.

A maior parte dos aproveitamentos hidroelétricos nessa bacia são localizadas nas partes mais altas da mesma, um trecho meândrico, porém em altitude como a volta do Uv, na qual está localizada a UHE Itá. As demais usinas conectadas ao SIN na bacia do Rio Uruguai são as UHE's de Campos Novos (879,9 MW) no Rio Canoas, Barra Grande (698,4 MW) no rio Pelotas, Passo Fundo (226,0 MW) e Monjolinho (74,0 MW) no Rio Passo Fundo, Quebra-Queixo (120,0 MW) no Rio Chapecó, São José (51,0 MW) e Passo São José (77,0 MW) no Rio Ijuí além da já citada Machadinho e Foz do Chapecó (855,0 MW) no rio Uruguai. Não considerando a fragilidade e degradação histórica dos ambientes naturais dessa região, haveria ainda espaço para crescer, uma vez que, cerca de 40% do potencial hidroenergético total estimado (aproximadamente 5.000 MW sendo quase 4.000 MW já inventariados) para a região ainda não foi explorado e l se encontra uma das maiores relações energia/km² do mundo (SIPOT, 2013).

Em função das suas características hidrológicas e dos principais rios formadores, a bacia do Rio Uruguai é dividida em 13 unidades hidrográficas, sendo que quatro ficam no estado de Santa Catarina e nove no estado do Rio Grande do Sul. Cerca de 3,9 milhões de pessoas vivem na parte brasileira da região hidrográfica do Uruguai, com maior concentração nas unidades hidrográficas de Chapecó, Canoas, Ibicuí e Turvo. A região possui um total de 384 municípios, dos quais merecem destaque Lages e Chapecó, em Santa Catarina; Erechim, Ijuí, Uruguaiana, Santana do Livramento e Bag, no Rio Grande do Sul.

Além do seu potencial hidroelétrico a região hidrográfica do Uruguai tem grande importância para o país em função também das atividades agroindustriais desenvolvidas. A bacia hidrográfica possui, em território brasileiro, 174.533km² de área, o equivalente a 2% do território nacional.

Em relação  vegetação, a bacia apresentava, originalmente, nas nascentes do rio Uruguai, os Campos e a Mata com Araucária e, na direção sudoeste a Mata do Alto Uruguai, Mata Atlântica. Atualmente, devido ao grande desenvolvimento rural, a região encontra-se intensamente desmatada e apenas regiões restritas conservam a vegetação original, área essa estimada em 31% do total (21% das áreas de Mata Atlântica e 42% das áreas de Pampa) (ANA, 2013).

O clima da bacia hidrográfica do Uruguai é temperado, apresentando uma regular distribuição intra-anual de chuvas, porém com alguma elevação no período de maio a setembro, coincidindo com o inverno. A precipitação média anual é de 1.784mm, com temperatura média anual variando entre 16 e 20C, e evapotranspiração média anual de 1.041mm (MMA, 2006a). A grande variabilidade na

ocorrência e magnitude das chuvas na bacia do Uruguai influencia fortemente a caracterização do registro de vazões, que será discutido na próxima seção.

No que tange ao regime pluviométrico, segundo o documento elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2006a) sobre a bacia hidrográfica do Uruguai, este é marcado por uma regular distribuição de chuvas ao longo do ano, com totais mensais superiores a 60 mm, sem ocorrência de grandes extremos: máximos ou mínimos. A formação de chuvas na bacia hidrográfica do Uruguai apresenta comportamentos característicos para os períodos de inverno e verão, bem como para as regiões de relevo mais elevado e acidentado ou mais plano e baixo. Quanto às estações do ano, a gênese das chuvas de inverno é diferente das que ocorrem no verão.

As chuvas de inverno são decorrentes da aproximação de um anticiclone (zona de alta pressão), que desloca as áreas de depressão, estas originando chuvas. Devido à intensificação de circulação secundária do ar, as penetrações das massas de alta pressão são mais violentas, frequentes e duradouras, gerando chuvas mais prolongadas e com maior ocorrência. Os anticiclones mais frequentes, que correspondem a tempo mais seco e que sucedem às chuvas, na região, são as Massas Polares Atlântica e Pacífica. Já durante o verão, os anticiclones decrescem em valor e frequência, passando a atuar, então, novos fatores na formação das chuvas, dentre os quais se destacam os ventos alísios, que soprando do Atlântico, transportam ar úmido formando as chuvas de verão, com trovoadas, grande intensidade e baixa duração (MMA, 2006a).

O relevo também possui papel determinante no clima da região, uma vez que as formações serranas existentes na área causam forte influência orográfica – da Serra Geral, principalmente – na formação de nebulosidade e precipitação devido à forçada ascensão das massas de ar. Cidades como Iraí, Soledade, Campos Novos, Xanxerê e Chapecó, essencialmente, em razão do efeito orográfico, apresentam precipitações mais elevadas do que outras localidades próximas. Nas áreas mais planas as chuvas são menores, tendo-se registros de estiagens periódicas na região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. Estas estiagens são devidas à baixa umidade dos ventos que sopram nesta área.

Na parte oeste de Santa Catarina e noroeste do Rio Grande do Sul, as chuvas são mais abundantes na primavera e no verão. No sul de Santa Catarina, Serras Riograndenses e na Campanha, as chuvas são mais frequentes no outono e no inverno. As chuvas de verão decrescem progressivamente para o Sul à medida que as chuvas de inverno, provocadas pela frente polar Atlântico nos seus avanços para o norte, vão se estabelecendo na área (MMA, 2006a).

Apesar destas variações no comportamento temporal e regional da precipitação, a análise do regime de chuvas não permite caracterizar um período de estiagem característico, já que os valores médios mensais de precipitação são muito próximos entre si. O que pode ser constatado é um acentuado *déficit* de umidade nos meses de verão, já que os valores de evaporação superam os de precipitação (MMA, 2006a).

Quanto às feições geológicas e suas conseqüentes facetas sobre o relevo, a bacia do Uruguai é majoritariamente localizada em Planaltos formados por derramamentos areníticos basálticos. A resistência maior das camadas de basalto aos processos morfogênicos concorreu para a formação de relevos tabulares e vertentes íngremes, suavemente inclinados para o eixo da bacia. A borda deste planalto constitui a Serra Geral que, em Santa Catarina, aproxima-se do litoral formando uma escarpa elevada, com altitudes superiores a 1.200 m. No outro lado, situam-se os formadores do rio Uruguai, entalhando vales profundos em meio a chapadões levemente ondulados, com altitudes entre 950 e 850 m (MMA, 2006a).

A porção imediatamente após o Planalto de Lajes, drenado pelo rio Canoas, é denominada Planalto das Araucárias onde a topografia dominante é ainda de Planaltos elevados (500 m) associados a presença de rochas vulcânicas basálticas e ácidas e profundamente sulcados pelos principais afluentes do Uruguai. Na região de rochas ácidas há a presença de formas mais arredondadas. Aos patamares se associam os solos mais espessos e argilosos, já nas escarpas solos rasos e afloramentos rochosos. A declividade vai decrescendo e quando do rio Uruguai inflete para sudoeste, a altitude é de 200 m aproximadamente, declinando gradativamente em direção ao sul.

A topografia no setor sul da bacia vai se suavizando, a feição predominante é a de colinas suaves, vales rasos, tanto em terrenos da Depressão Central, onde estão situadas as nascentes do Rio Ibicuí, como no próprio capeamento basáltico, que adentra o território uruguaio (MMA, 2006a).

4.2. UHE Itaipu – Bacia do Paraná

O processo de construção da usina de Itaipu é único no mundo; ele é resultado da parceria internacional entre Brasil e Paraguai para a exploração dos recursos hídricos do rio Paraná no trecho compreendido desde e inclusive o Salto de Sete Quedas até a foz do rio Iguaçu. Essa iniciativa foi impulsionada durante a década de 1960 e em 1973 foi aprovada no Congresso Nacional dos dois países a criação da

empresa Itaipu Binacional, cujo capital é dividido igualmente entre a Eletrobras, sociedade anônima brasileira de economia mista, e a Ande – *Administración Nacional de Eletricidad*, entidade autárquica paraguaia.

As obras de escavação do canal de desvio começam em 1975 e a usina começa a gerar e operar efetivamente em 1984. Nos anos subsequentes novas unidades geradoras foram instaladas até a 20ª em 2006 fazendo com que a potência instalada chegasse aos 14.000 MW. Ao longo dos anos Itaipu já acumula mais de 2 bilhões de MWh gerados com o recorde mundial anual de 94.685 MWh em 2008 e consolidando sua posição como usina hidroelétrica mais produtiva do mundo, superando até mesmo a recém construída usina de Três Gargantas na China (ITAIPU, 2012).

A bacia hidrográfica do Paraná, com 32,1% da população nacional, apresenta o maior desenvolvimento econômico do País. Com uma área, em território nacional, de 879.873Km², a região abrange os estados de São Paulo (25% da região), Paraná (21%), Mato Grosso do Sul (20%), Minas Gerais (18%), Goiás (14%), Santa Catarina (1,5%) e o Distrito Federal (0,5%) e avança ainda sobre território paraguaio, argentino e boliviano fazendo da parte da grande bacia do rio da Prata. Neste trabalho apenas a porção brasileira da bacia do Paraná será tratada e como o foco estará sobre os afluentes nacionais do rio Paraná, muitas vezes a porção nacional da sub-bacia do Paraguai será suprimida nas análises, como na Figura 21. A bacia incremental de Itaipu, que corresponde à área entre as usinas de Rosana, Porto Primavera e Itaipu, se estende por 150.900 km² (FADIGA *et al.*, 2008).

O potencial hidroenergético da bacia é extensivamente e historicamente explorado (cerca de 70% dos mais de 60.000 MW estimados segundo ELETROBRAS (2012)) através de 53 usinas a montante de Itaipu e conectadas ao SIN. Destas se destacam os aproveitamentos de Emborcação (1.192,0 MW de potência instalada), Itumbiara (2.280,0 MW) e São Simão (1.710,0 MW) na sub-bacia do rio Paranaíba; Furnas (1.312,0 MW), Marimbondo (1.488,0 MW) e Água Vermelha (1.396,2 MW) na sub-bacia do Rio Grande; e Ilha Solteira (3.444,0 MW), Jupirá (1.551,2 MW) e Porto Primavera (1.540,0 MW) na sub-bacia do Paraná. Nesta bacia foram instalados os primeiros grandes aproveitamentos hidroelétricos brasileiros a partir da década de 1950.

Em 2010, aproximadamente 61,3 milhões de pessoas viviam na região (32% da população do País), sendo 93% em áreas urbanas. A região possui a cidade mais populosa da América do Sul, São Paulo, com cerca de 11,1 milhões de habitantes. Outros importantes centros populacionais são: Brasília, Curitiba, Goiânia, Campinas, Campo Grande e Uberlândia. A maior parte de população se concentra nas unidades

hidrográficas dos rios Tietê e Grande, que, juntas, correspondem a 61% da população total. Além disso, esta é a região com maior número de indústrias instaladas em todo país.

Os represamentos (Billings, Guarapiranga, Edgard de Souza e Ponte Nova) construídos na sub-bacia do Tietê são essenciais no abastecimento de água para a região metropolitana de São Paulo. Nos reservatórios de Billings e Guarapiranga parte do volume represado é destinada à geração hidroelétrica nos aproveitamentos de Edgard de Souza, Ponte Nova e Henry Borden (após transposição) e formam, assim, o chamado sistema Alto Tietê cuja operação é muito complexa e regulada por regras específicas.

Esta região hidrográfica possui a maior demanda por recursos hídricos do País, equivalente a 736 m³/s, que corresponde a 31% da demanda nacional. A irrigação é a maior usuária de recursos hídricos (42% da demanda total), seguida do abastecimento industrial (27%). Mesmo com os níveis de consumo tão elevados, há nessa bacia grande disponibilidade hídrica (5.956 m³/s), porém a falta de cuidados com conservação da qualidade desses recursos leva ao aparecimento de regiões com alto estresse hídrico (ANA, 2013).

O rio Paraná é formado pela confluência dos rios Paranaíba e Grande. O primeiro tem a nascente mais distante no rio São Bartolomeu a 1.148 m de altitude nos arredores de Brasília e até sua foz percorre aproximadamente 1.070 km pelo estado de Goiás. Já o rio Grande nasce na serra da Mantiqueira em Bocaina de Minas e se estende por 1.360 km. Após sua formação o rio Paraná percorre 619 km em território nacional até o local onde existiam as cachoeiras de Sete Quedas, a partir deste ponto ele passa a ser o limite político entre Brasil e Paraguai por mais 190 km até a confluência do rio Iguaçu. Em sua extensão total o rio Paraná possui 4.609 km com uma vazão média em sua foz, como rio da Prata e após receber as importantes contribuições do rio Paraguai e Uruguai, de cerca de 16.000 m³/s.

Os principais afluentes do Paraná, além dos rios que o formam, ao longo de seu percurso em território brasileiro são os rios Tietê, Paranapanema e Iguaçu. Considerando apenas a bacia incremental de da UHE Itaipu destacam-se os afluentes Piquiri e Ivaí na margem direita e o Ivinhema na margem esquerda.

Considerando a grande demanda por recursos hídricos na região e intensa exploração dos potenciais usos em toda a bacia, destaca-se para esta região o importante papel das águas subterrâneas na gestão de suas águas. Nesta bacia está presente a mais importante reserva hídrica subterrânea do Brasil e uma das maiores reservas de água doce do mundo, o aquífero Guarani. Seus limites não se restringem ao Brasil, mas é exatamente na parte brasileira e na bacia do Paraná, que está

localizado a maior parte de sua área. Suas reservas situam-se, com raras exceções (Ribeirão Preto, São José do Rio Preto), em locais de pequena exploração, portanto, constituem reserva estratégica de água para futuras gerações, merecendo especial atenção quanto a sua preservação. Portanto, a gestão desse recurso na bacia do Paraná passa essencialmente pela preservação e manejo de áreas de recarga, proteção sanitária dos poços e o controle de interferências por superexploração (MMA, 2006c).

Originalmente, a bacia hidrográfica do Paraná apresentava os biomas de Mata Atlântica e Cerrado, mas uso do solo na região passou por grandes transformações ao longo dos ciclos econômicos do País. O desmatamento então ocasionado fez com que hoje apenas poucos (16% do total, 18% da área de Cerrado e 15% da de Mata Atlântica) remanescentes isolados por toda a região sejam encontrados (ANA, 2013).

Segundo Zandonadi (2013), que se baseou na classificação de Strahler (1951 *apud* Zandonadi, 2013), realizada de acordo com a influência das massas de ar no Brasil, a bacia hidrográfica do rio Paraná está localizada exatamente numa região de transição entre dois grandes grupos climáticos distintos: (i) o de domínio das massas equatoriais e tropicais; (ii) e o de domínio das tropicais e polares, ou seja a bacia se encontra sob influência dos dois grandes sistemas atmosféricos que afetam o Norte e Sul do Brasil. Zandonadi (2013) ainda explica:

“Essas massas de ar possuem grande mobilidade e dinamismo e são geradoras de correntes atmosféricas que controlam toda a circulação geral atuante no espaço geográfico brasileiro, e suas interações com o relevo configuram as variações pluviométricas existentes no país. Devido à posição geográfica, à heterogeneidade do relevo e à influência de praticamente todas as massas de ar atuantes no Brasil, no decorrer do ano a bacia hidrográfica do rio Paraná concentra grande variabilidade pluviométrica.”

Assim, como esta é, portanto, uma zona de encontro de sistemas atmosféricos com características distintas, é também uma área de instabilidade atmosférica que provoca grande variabilidade pluviométrica (ZANDONADI, 2009). A distribuição pluviométrica ao longo da bacia é de tal forma, que os menores valores anuais médios de chuvas ocorrem em sua parte central (em torno dos 850 a 1450 mm). Os valores pluviométricos aumentam em direção às áreas mais elevadas da bacia, onde as médias podem variar desde 1250 até 1850 mm. E no extremo sul da bacia – nas áreas mais próximas da bacia incremental de Itaipu e da sub-bacia do Iguaçu – é onde ocorrem os maiores volumes médios anuais, entre 1850 e 2050 mm (INMET, 2013).

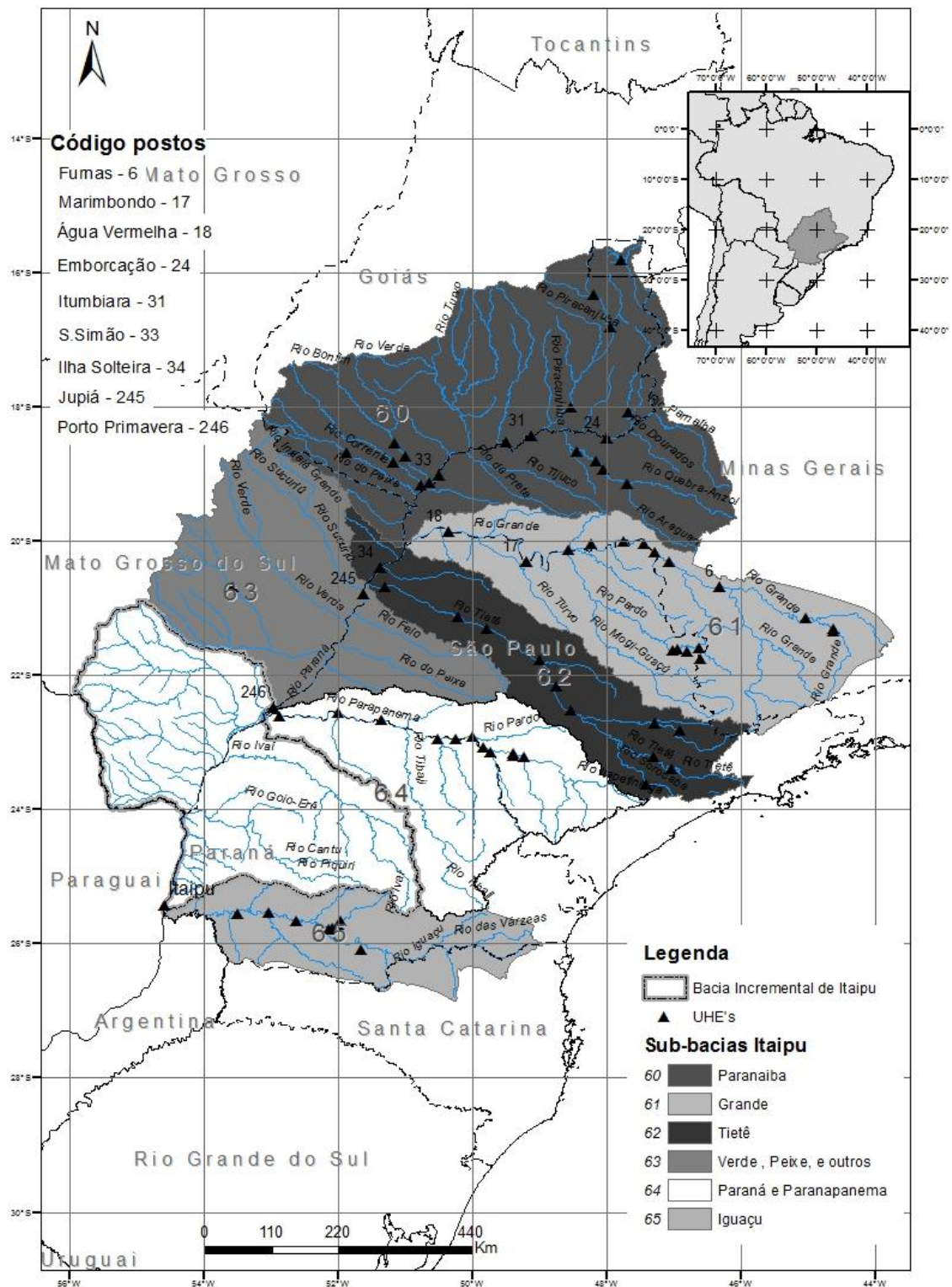


Figura 21. Bacia Hidrográfica do Paraná excluindo-se a Sub-bacia do Paraguai.

De acordo com Souza Filho *et al.* (1997), geomorfologicamente o relevo da bacia hidrográfica do Paraná é acidentado na parte leste e sudeste graças à ocorrência de rochas cristalinas e à taxa de ascensão mais elevada, que formam as

escarpas da Serra do Mar e da Serra da Mantiqueira. Nas demais áreas dominam formas tabulares onduladas, com inclinação suave em direção ao rio Paraná, interrompidas localmente por escarpas das *Cuestas* da Serra Geral.

O Planalto Central da bacia é caracterizado por colinas alongadas com topos abaulados ou tabulares, dispostos em três níveis com altitudes próximas a 1000m, entre 600 e 700m, e a 500m. Como esses níveis encontram-se inclinados, as altitudes diminuem conforme se aproximam da calha principal.

Os solos presentes na bacia são oriundos de derramamentos basálticos e que formaram solos vermelhos argilosos ricos em alumínio, assim na parte central da bacia há majoritariamente presença de latossolos vermelhos e vermelho-amarelos (MMA, 2006c). Nas partes mais altas a nordeste há maior presença de cambissolos háplicos típicos de regiões serranas, tanto que aparecem novamente com boa distribuição na parte sudeste da bacia, região de maior altitude dos planaltos de Paranapiacaba e das Araucárias e nas escarpas da Serra do Mar. Mais informações sobre os solos da região podem ser encontrados em IAC (1999).

4.3. UHE Sobradinho – Bacia do São Francisco

A usina hidroelétrica de Sobradinho localizada no município homônimo e distante 40 km de Juazeiro (Bahia) e Petrolina (Pernambuco) é um obra de extrema importância para toda a região Nordeste do Brasil. Além fornecer energia para atendimento da demanda de sua região, seu reservatório possui papel-chave na regularização do regime fluvial do Rio São Francisco sendo utilizado como manancial para diversos usos de água na região.

O aproveitamento do potencial hidroenergético das vazões do Rio São Francisco fez parte das grandes obras de integração nacional propostas pelo governo militar brasileiro. A cerca de 720 km da foz do São Francisco as obras se iniciaram em Junho de 1973 e em novembro de 1979, sob administração da então criada Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), a usina entrou em operação. Seu reservatório se estende por cerca de 320 km com uma superfície de espelho d'água de 4.214 km² tendo assim uma capacidade de armazenamento de cerca de 34 bilhões metros cúbicos de água. Essas medidas colossais fazem do reservatório de Sobradinho o maior lago artificial do mundo podendo inclusive ser visto do espaço (dados obtidos junto a CHESF disponíveis em <http://www.chesf.gov.br>).

Soma-se a essas estruturas hidráulicas uma eclusa de posse da Companhia de Docas do Estado da Bahia (CODEBA), que permite a continuidade da tradicional

navegação no trecho do rio São Francisco entre as cidades de Pirapora/MG e Juazeiro/BA-Petrolina/PE. A eclusa permite que as embarcações vençam o desnível de 32,5 m criado pela barragem.

A vazão regularizada pelo reservatório de Sobradinho (2.060 m³/s) é ainda utilizada à jusante por uma série de aproveitamentos hidroelétricos localizados na região do Baixo São Francisco. Seguindo as águas do rio e indo em direção ao mar, a primeira usina encontrada é a de Itaparica (hoje renomeada UHE Luiz Gonzaga e com 1.500,0 MW de potência instalada) com seu reservatório de mais de 800 km² de área (3.540 hm³ de volume útil), cuja principal função é a regularização das vazões semanais e diárias para complexo hidrelétrico de Paulo Afonso distante cerca de 50 km a jusante. Após passar pela UHE Moxotó (400,0 MW) as águas do São Francisco vão para as usinas de Paulo Afonso I, II e III (1.417,2 MW) ou podem ser desviadas para Paulo Afonso IV (2.462,4 MW) e seguir para UHE Xingó (3.162,0 MW) a 65 km à jusante.

Somando-se esses aproveitamentos com as usinas de Retiro Baixo (83,7 MW) no rio Paraopeba, Queimado (105,0 MW) no rio Preto e Três Marias (396,0 MW e com reservatório com papel de regularização das vazões que atravessarão o semiárido nordestino) no Alto São Francisco (em Minas Gerais), completam-se todos os aproveitamentos hidroelétricos conectados ao SIN nessa bacia. Dessa forma há ainda grande potencial hidroenergético a ser explorado na região, já que apenas 10.720 dos 22.580 MW estimados (3.800 MW em inventário e 6.140 MW em viabilidade) são aproveitados atualmente. Entretanto, o grande estresse hídrico causado pela baixa oferta de água causa conflitos entre todos os possíveis usos desse escasso recurso.

A hidrologia da bacia do São Francisco é fundamental no contexto socioeconômico e ambiental do Nordeste brasileiro pelo volume de água transportada através do semiárido nordestino. Ela abrange 521 municípios em seis estados: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Goiás, além do Distrito Federal. Com 2.700km, o rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, em Minas Gerais, e escoar no sentido Sul-Norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para o Sudeste, chegando ao Oceano Atlântico na divisa entre Alagoas e Sergipe. Devido à sua extensão e aos diferentes ambientes que percorre, a região pode ser dividida em Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco e estão apresentadas na Figura 22.

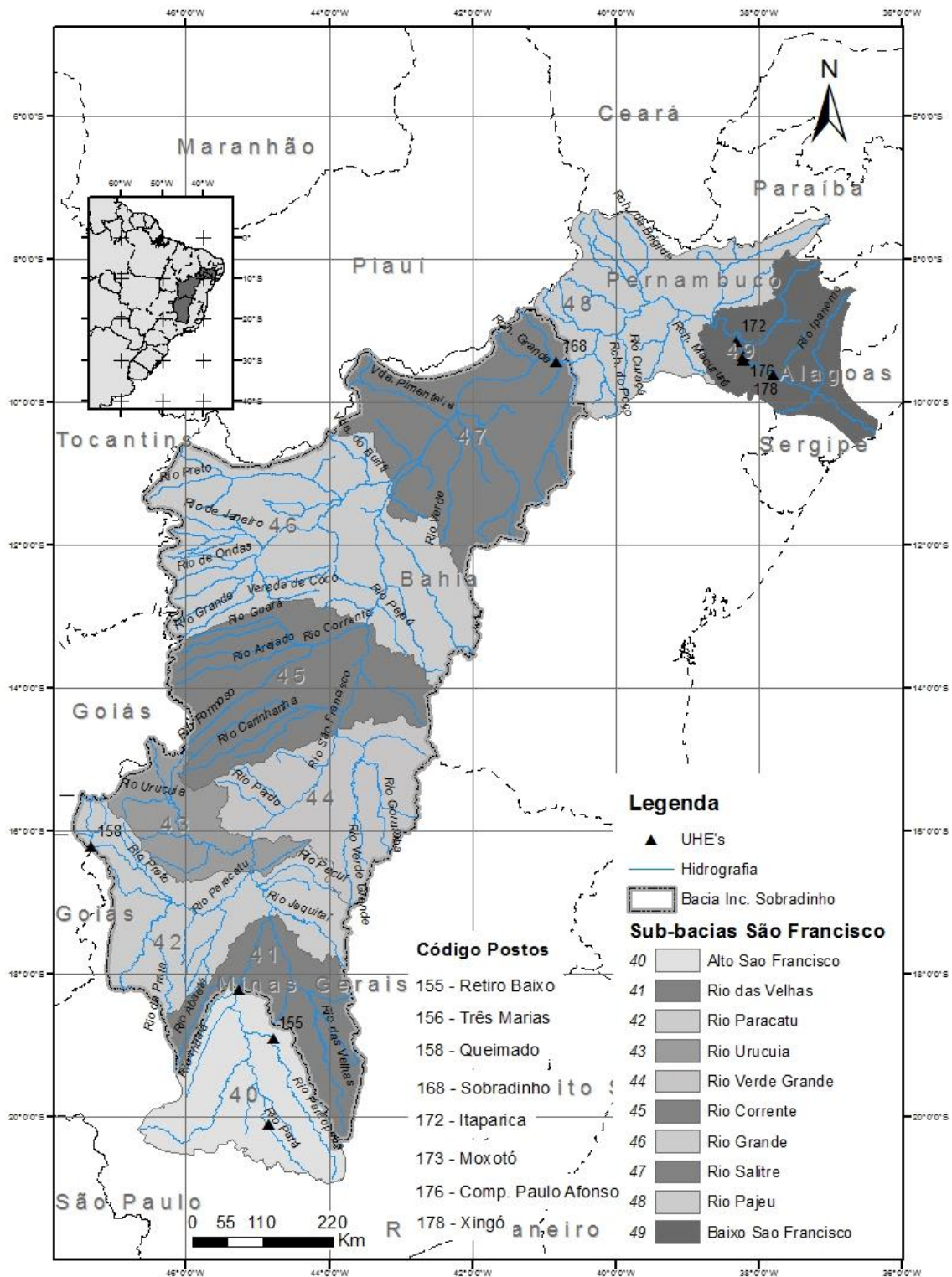


Figura 22. Bacia Hidrográfica do São Francisco.

Os principais afluentes do São Francisco estão localizados na região do Alto São Francisco e são eles os rios Paraopeba, Abaeté, das Velhas, Jequitáí, Paracatu Uruçuaia, Verde Grande e Carinhanha, já os rios Corrente e Grande deságuam após o

longo trecho de semiárido na região do Médio São Francisco. À medida que o São Francisco penetra essa zona, sofre com a intensa evaporação, a baixa pluviosidade e dos afluentes temporários da margem direita, que levam seu volume d'água a diminuir, mas mantém-se perene, graças ao mecanismo de contribuição constante proveniente do seu alto curso e dos afluentes no centro de Minas Gerais e oeste da Bahia.

As partes extremas, superior e inferior, da bacia apresentam bons índices pluviométricos, enquanto o rio São Francisco atravessa em seus cursos médio e submédio áreas de clima bastante seco. Assim, cerca de 70% do deflúvio do São Francisco é gerado em Minas Gerais, cuja área da bacia ali inserida é de apenas 37% da área total (MMA, 2006b). Assim a disponibilidade hídrica nessa bacia é baixa (1.886 m³/s) como também a vazão específica (4,5 L/s/km²), sendo esta uma das regiões com menor quantidade de água em todo o país (ANA, 2013).

A área de drenagem (638.576 km²) ocupa 8% do território nacional e sua cobertura vegetal contempla fragmentos de Cerrado (55% de área original remanescente) no Alto e Médio, Caatinga (51%) no Médio e Submédio e de Mata Atlântica (29%) no Alto São Francisco, principalmente nas cabeceiras (ANA, 2013). Algumas características selecionadas da região em análise estão mostradas na Tabela 3.

Mais de 14,2 milhões de pessoas, o equivalente a 7,5% da população do País, habitavam a região em 2010, sendo a maioria habitante da região metropolitana de Belo Horizonte (ANA, 2013). A agricultura é uma das mais importantes atividades econômicas, mas a região possui fortes contrastes socioeconômicos, com áreas de acentuada riqueza e alta densidade demográfica e áreas de pobreza crítica e população bastante dispersa. Em termos hidrológicos a bacia também apresenta distinções marcantes; o semiárido, que extrapola a Bacia, é vulnerável e sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens, por outro lado, os moradores da região metropolitana de Belo Horizonte enfrentam enchentes frequentes.

A presença de grandes quantidades de água escoando pela calha do São Francisco através de uma região muito seca gera, na própria região semiárida, contrastes marcantes no uso do solo e principalmente na atividade agrícola. Nos arredores de Petrolina/Juazeiro e no Oeste do estado da Bahia a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) mantém projetos de auxílio à agricultura irrigada para produção de alimentos e grãos, respectivamente.

Por outro lado, a maior parte da população do semiárido nordestino, dependente da agricultura de subsistência para sobreviver, permanece à margem das obras de infraestrutura e apoio, permanecendo sujeita aos riscos e prejuízos causados

por períodos de estiagens. Isto ocorreu, por exemplo, entre os anos de 2011 e 2013, nos quais recordes de falta de água foram batidos sucessivamente, e os índices de precipitação acumulada entre abril de 2012 e abril de 2013 ficaram entre 1000 e 500 mm (segundo as normais climatológicas disponíveis no endereço <http://www.inpe.br>).

Assim, a CODEVASF, que desde sua criação na década de 1940 possui dentre suas principais atribuições, apoiar o desenvolvimento econômico do vale do São Francisco, coordena a implantação da maior obra hidráulica já realizada na região. Em 2005, a ANA concedeu outorga para o Projeto de Integração do rio São Francisco (Pisf), que prevê duas captações (Eixo Norte e Eixo Leste) no São Francisco, para complementar a oferta de água local no Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. A captação do Eixo Norte está prevista para ser implantada em Cabrobó (PE), na calha do rio, e a do Eixo Leste, em Floresta (PE), no reservatório da Hidrelétrica de Itaparica e sem dúvida trará alterações significativas no regime fluvial à jusante desses desvios (ANA, 2013).

Tabela 5. Características Hidrometeorológicas por sub-região da bacia do São Francisco (MMA, 2006b).

Característica	Regiões Fisiográficas			
	Alto	Médio	Submédio	Baixo
Clima predominante	Tropical úmido e Temperado de altitude	Tropical semiárido e sub-úmido seco	Semiárido e Árido	Sub-úmido
Precipitação Média Anual (mm)	2.000 a 1.100 (1.372)	1.400 a 600 (1.052)	800 a 350 (693)	350 a 1.500 (957)
Trimestre mais chuvoso	Novembro a Janeiro	Novembro a Janeiro	Novembro a Janeiro	Maió/Junho a Agosto/Setembro
Evapotranspiração média (mm)	1.000	1.300	1.550	1.500
Contribuição da vazão natural média (%)	42	53	4	1
Trecho Principal (km)	702	1.230	550	214

As principais feições geomorfológicas presentes na bacia do Rio São Francisco são as Serras da Canastra e Espinhaço, nas quais se localizam suas nascentes e compõe a área mais elevada, com altitudes variando entre 1.600 a 600 m. Seguindo o

curso do rio ainda é encontrada a Serra Geral a oeste e os chapadões de Diamantina a leste. Quando entra em seu curso médio, as altitudes passam a diminuir (de 800 a 200 m) e as feições das Chapadas do Araripe e as Serras dos Cariris e Cágados moldam a paisagem. Já na parte baixa os principais elementos do relevo são as Serras Redonda e Negra. Em toda a região os solos apresentam baixa fertilidade, elevada acidez e teores de ferro e alumínio sendo as classes de latossolos e argissolos vermelhos as mais comuns.

4.4 UHE Tucuruí - Bacia do Tocantins-Araguaia

A usina hidroelétrica de Tucuruí entrou em operação em novembro de 1984 e a motivação de sua construção partiu da necessidade em suprir a demanda de energia da cidade de Belém em crescente desenvolvimento na época, mas principalmente para viabilizar projetos de indústrias eletrointensivas (siderúrgicas de alumínio) no estado do Pará (CMB, 2000). O projeto foi idealizado para ter uma implantação em etapas, adequando assim a produção de energia à sua demanda e hoje está completamente construída com capacidade instalada total de 8.370 MW, sendo assim a principal usina hidroelétrica em operação no norte do Brasil e fundamental para o suprimento de energia em todo SIN.

A barragem de Tucuruí está localizada aproximadamente na latitude 3° 45' Sul e longitude 49° 41' Oeste na bacia do Rio Tocantins/Araguaia a cerca de 300 km em linha reta da capital do estado do Pará. A montante também no Rio Tocantins estão localizadas as UHE's Serra da Mesa (1.275,0 MW), Cana Brava (450,0 MW), São Salvador (243,2 MW) Peixe Angical (498,75 MW), Lajeado (902,5 MW) e Estreito (1.087,2 MW) que completam os aproveitamentos interligados ao SIN nessa bacia.

A bacia Hidrográfica do Tocantins-Araguaia apresenta grande potencialidade para a agricultura irrigada, especialmente para o cultivo de frutíferas, de arroz e outros grãos (milho e soja). Em 2012 a produção de soja ultrapassou a produção de arroz e passou a ocupar a maior área destinada a produção agrícola na região (<http://www.sagri.pa.gov.br>). Atualmente, a necessidade de uso de água para irrigação corresponde a 62% da demanda total (todos possíveis usos consuntivos, excluindo-se a geração hidroelétrica) da região e se concentra na sub-bacia do Araguaia devido ao cultivo de arroz por inundação. A área irrigável (por inundação e outros métodos) é estimada em 230.197 hectares (ANA, 2013).

A Região possui uma área de 918.822 km² (11% do território nacional) sendo assim a maior bacia hidrográfica compreendida totalmente em território nacional. Os

estados de Goiás (21%), Tocantins (30%), Pará (30%), Maranhão (4%), Mato Grosso (15%) e o Distrito Federal (0,1%) são abrangidos em sua área. Sua configuração é alinhada, com sentido Sul-Norte, seguindo a direção predominante dos cursos d'água principais, os rios Tocantins e Araguaia, que se unem na parte setentrional da região, a partir de onde é denominado rio Tocantins, que segue até desaguar na Baía da Ilha de Marajó.

Em 2010, cerca de 8,6 milhões de pessoas viviam na bacia hidrográfica (4,5% da população nacional), sendo 76% em áreas urbanas. A densidade demográfica era de 9,3 hab./km², bem menor que a densidade demográfica do país (22,4 hab./km²) (ANA, 2013). A figura 23 apresenta a localização da bacia e suas sub-bacias segundo classificação da ANA.

Na bacia do Tocantins-Araguaia estão presentes os biomas Floresta Amazônica, ao norte e noroeste, e Cerrado nas demais áreas. O desmatamento da região se intensificou a partir da década de 70, com a construção da rodovia Belém-Brasília, da hidrelétrica de Tucuruí e da expansão das atividades agropecuárias e de mineração. Atualmente, o desmatamento se deve principalmente à atividade de indústrias madeireiras nos estados do Pará e Maranhão e a expansão da fronteira agrícola para produção de soja nos estados do Pará e Mato Grosso. Assim, a área de cobertura vegetal remanescente na bacia dos seus respectivos biomas naturais é de 39% para o Amazônico e 60% para o Cerrado, que resulta em uma média total de 53% para toda a região. (ANA, 2013).

Há grande disponibilidade hídrica na região quando comparada ao Brasil como um todo; cerca de 10.950 m³/s escoam em média pela bacia ao longo do ano e resultam em uma disponibilidade hídrica de 5.447 m³/s, aproximadamente 6% daquela de todo o país (ANA, 2013). Toda essa água escoar pelo sistema hidrográfico composto pelos rios Tocantins (5.000 m³/s), Araguaia (5.500 m³/s) e seus afluentes, destacando-se entre eles o rio Itaciúma (450 m³/s) e o rio das Mortes, ambos na margem esquerda do Araguaia (ANA, 2013; CMB, 2000).

O rio Tocantins se estende por aproximadamente 2.500 km e se forma na confluência entre os rios das Almas e Maranhão no Planalto de Goiás a mais de 1.000 m de altitude. O rio Araguaia, mesmo sendo considerado um afluente do Tocantins possui mesma importância no conjunto geral da bacia. Ele se estende por aproximadamente 2.115 km e tem sua nascente nos rebordos da Serra do Caiapó na divisa do estado de Goiás com o de Mato Grosso a cerca de 850 m de altitude. Uma faceta marcante do rio Araguaia é a formação da Ilha do Bananal, uma área alagadiça com aproximadamente 350 km de extensão e 80 km de largura ao longo das planícies mais baixas da parte central da bacia. Já próximo ao mar (78 m de altitude) os dois

De maneira geral o clima na bacia do rio Tocantins-Araguaia é homogêneo e suas principais características se devem aos efeitos de sua posição alongada latitudinalmente e sua continentalidade, além da constância das massas de ar quente e úmido associadas à zona de convergência intertropical (ZCIT). Assim há baixa variabilidade dos parâmetros atmosféricos pelas estações ao longo dos anos (CMB, 2000; CAVALCANTI *et al.*, 2009).

As temperaturas são normalmente maiores na parte norte da bacia e vai diminuindo lentamente na direção Sul, chegando ao mínimo no extremo Sul, onde a orografia do Planalto Central garante a certas regiões um clima continental tropical de altitude com temperaturas médias em torno de 22°C (CMB, 2000).

Os níveis pluviométricos também variam no sentido Sul-Norte entre 1.500 a 2.400 mm/ano. Na parte Norte o período seco corresponde aos meses de junho, julho e agosto e no restante da região atinge de cinco a seis meses do ano. Já o período chuvoso corresponde aos meses de setembro/outubro a abril, com cerca de 90% da precipitação anual. A evapotranspiração real média na bacia é de 1.371 mm/ano (CMB, 2000; MMA, 2006d).

Em levantamento realizado pelo MMA (2006d), foram identificados, para a bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia seis macro unidades geomorfológicas:

- Planícies com características fluviais e/ou flúvio-lacustres, que se desenvolveram sobre depósitos sedimentares não consolidados e se apresentam associados aos grandes rios como o Tocantins, Araguaia, das Mortes, Paranã entre outros;
- As principais depressões são as do Xingu e Bananal, associadas às bacias sedimentares dos principais rios da região, e a depressão do Amazonas, sobre a qual está localizada a barragem de Tucuruí;
- Tabuleiros representados, principalmente pelo Tabuleiro Paraense localizada próxima à costa na margem direita do Tocantins;
- Patamares, que correspondem os relevos mais elevados na parte oriental da bacia e de onde nascem os principais rios;
- Chapadas localizadas, principalmente ao longo da divisa entre os estados de Goiás e Bahia e na região de Carolina no Maranhão;
- Planaltos, que representam áreas alçadas em relação as regiões planas circundantes, estão presente na parte sudoeste da região nos planaltos dos Guimarães e Caiapônia. Grandes faixas do Planalto Central estão presentes nas áreas ao norte de Brasília e Goiânia. Há ainda presença de Planaltos Residuais ao longo da depressão da Amazônia Meridional (relevo que forma a

Serra dos Carajás) e ainda os Planaltos Residuais do Araguaia-Tocantins, que se posicionam de maneira alongada na direção Norte-Sul e forma a Serra do Estrondo.

Os solos existentes na região da UHE Tucuruí são ácidos, apresentam baixa fertilidade natural e de textura argilosa em sua maioria. Os principais tipos de solos, que dominam quase totalmente a região, são os Podzólicos Vermelho-Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos e Latossolos Amarelos. Os Latossolos ocorrem quase sempre nos chapadões ou superfícies de erosão estabilizadas mais antigas, assim como, também, nas pediplanícies e fluvioplanícies interiores. No Estado do Pará e parte do Maranhão, esses solos são do tipo amarelo, frequentemente associados à variedade plínticas e relacionados com sedimentos terciários e sub-recentes. (CMB, 2000; MMA, 2006d).

Nessa bacia, assim como em toda a região Norte do Brasil, há grande presença de comunidades e reservas indígenas. Palco de intensas disputas fundiárias a implantação de UHE's nessa bacia passará, invariavelmente, pela discussão acerca de reassentamento dessas comunidades amazônicas. Na bacia do rio Amazonas, onde diversos novos empreendimentos hidroelétricos estão em construção, a questão indígena foi o maior impedimento encontrado pelas empresas vencedoras do leilão para obtenção de licenças ambientais, principalmente para usina de Belo Monte.

Ressalta-se então, que mesmo que seja considerado como a nova fronteira para o crescimento do parque gerador brasileiro, o aproveitamento dos potenciais hidroenergéticos da região Norte do país devem ser analisados com cuidado. Os conflitos fundiários com comunidades tradicionais e os impactos sobre o já fragilizado bioma amazônico terão de ser, sem dúvida, colocados no topo da lista de prioridades durante avaliação da viabilidade desses novos empreendimentos.

5. Resultados e Discussão

5.1. Caracterização dos registros históricos de vazões.

5.1.1. Séries de Vazões Naturais

A interação (e sua variabilidade no tempo e espaço) de fenômenos naturais hidroclimatológicos com o ambiente físico – representado por suas características fisiográficas descritas no capítulo 4 – pode ser observada através do regime fluvial de uma bacia. Nesta seção uma análise das séries históricas de vazões semanais dos postos selecionados será realizada levando-se em consideração seu uso potencial no modelo PREVIVAZ. Assim, a série de vazões naturais para o posto de Itá iniciada em 1940 (código ONS 092) é apresentada na Figura 24.

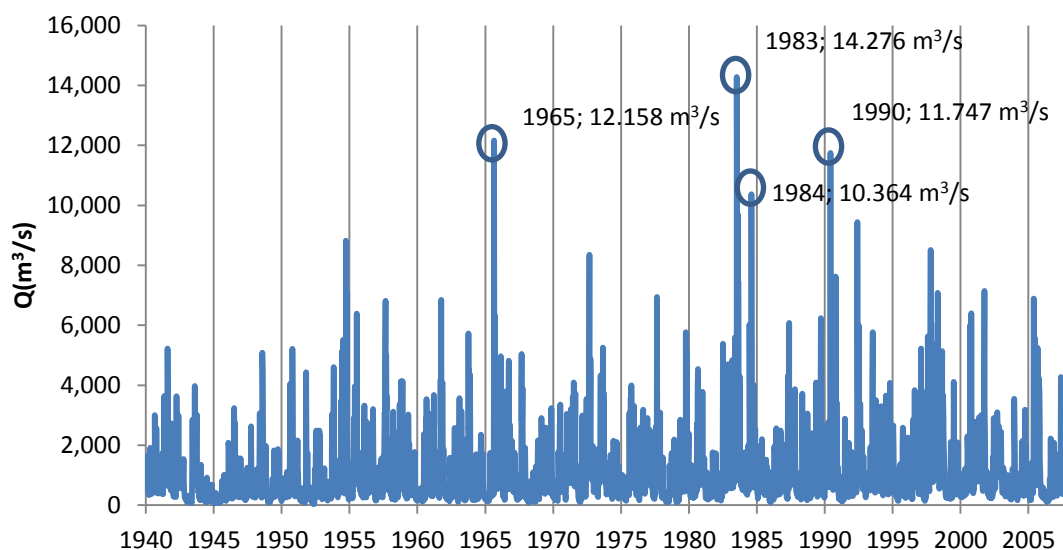


Figura 24.Registro Histórico de Vazões para a UHE Itá - 1940 a 2008.

Segundo o relatório do MMA (2006a), essa bacia se caracteriza pela ocorrência de duas cheias sazonais, situadas entre vazantes pouco acentuadas e que variam de uma sub-bacia para outra, conforme a distribuição anual das chuvas. Como já discutido na seção 4.1, o padrão regional de circulação atmosférica e sua relação com os elementos de relevo presentes aqui definem uma frequência, magnitude e distribuição muito pouco homogêneas ao longo da bacia. Aliado a isso, a UHE Itá se localiza não muito distante das partes mais altas da bacia, onde preponderam solos de pequena espessura (como discutido na seção 4.1) e assim o armazenamento de água no subsolo é pequeno. Assim com relativa frequência ocorrem irregularidades nas vazões associadas às inconstâncias nos eventos de precipitação.

Essas características atribuídas a toda a região Sul do Brasil (CAVALCANTI *et al.*, 2009) são claramente observadas no registro de vazões para a UHE Itá (Figura 23). Há picos distribuídos por vários anos do registro e em diferentes meses do ano. Os níveis de vazão variam normalmente entre 2.000 e 300 m³/s com picos maiores de 10.000 m³/s nos anos de 1965, 1983, 1984 e 1990, com o máximo histórico de 14.200 m³/s em julho de 1983, associado a um evento de chuvas extremas no sul da bacia do Paraná e Norte da bacia do Uruguai, que também será sentido no registro para o posto de Itaipu, apresentado alguns parágrafos abaixo.

Por mais que as cheias históricas tenham ocorrido entre os meses de junho e agosto, não se podem definir as estações úmidas e secas nessa região. Essas observações ficam mais claras quando analisadas comparativamente as séries separadas para cada semana. Na Figura 25 apresenta o diagrama de caixas para cada semana do posto de Itá, na qual se verifica a grande dispersão dos valores ao longo de todas as semanas através da grande quantidade de *outliers*^{XI} na distribuição, principalmente entre aquelas de número 20 e 36.

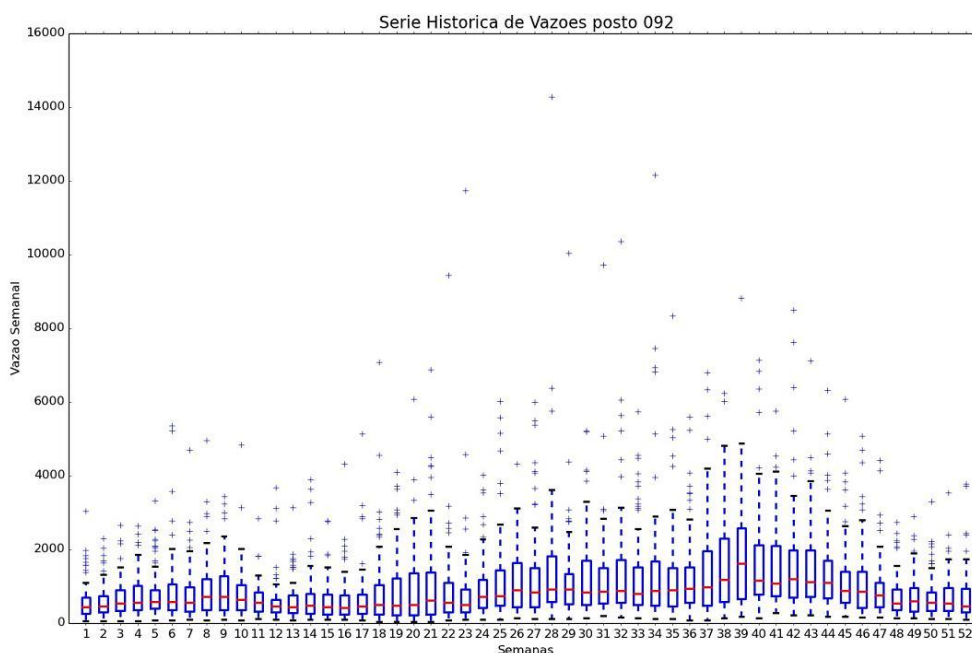


Figura 25. Série Histórica Semanal para o posto de Itá.

^{XI} As caixas apresentadas nos gráficos do tipo *Boxplot* são limitadas pelos primeiro e terceiro quartis da distribuição dos dados. A linha marca a posição da mediana. As cercas são definidas a partir dos limites da caixa, somados a 1,5 vezes a distância entre os 1º e 3º quartis; caso este limite exceda os valores extremos da distribuição, estes últimos definem o tamanho das cercas. *Outliers* são os dados que ultrapassam os limites das cercas.

A grande dispersão encontrada para as vazões do posto de Itá também pode ser observada na diferença de comportamento das curvas de máximos e mínimos anuais apresentadas na Figura 26. A curva de mínimos é bastante constante e indica mínimos anuais pouco variantes como esperado para uma bacia de grande disponibilidade hídrica por área de drenagem (como discutido em 4.1). Por outro lado os picos de cheias são algumas ordens de grandeza maiores e bastante diferentes ao longo dos anos. Este fato, associado à dificuldade de definição de estações secas e úmidas, mostram como o regime fluvial dessa bacia é fortemente influenciado pelos eventos hidroclimatológicos extremos e, de certa forma, frequentes na bacia do Uruguai.

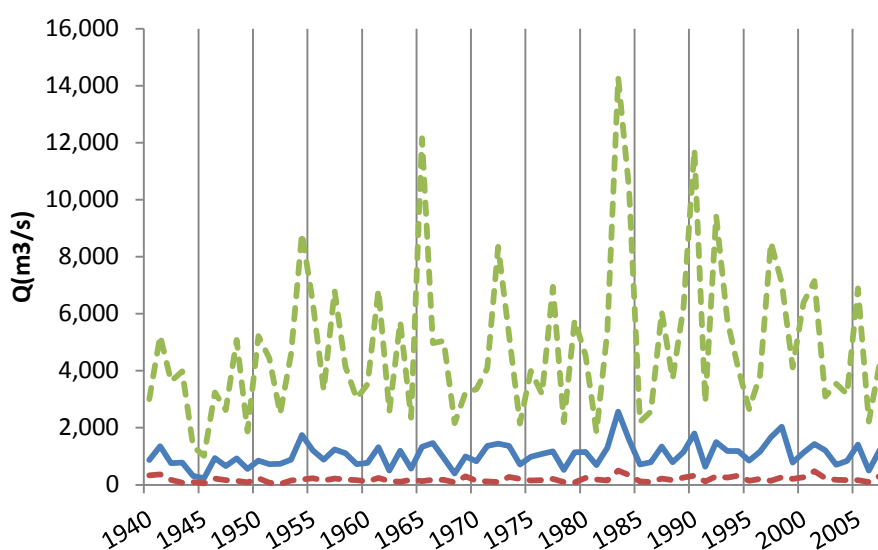


Figura 26. Médias (—), Máximos (- -) e Mínimos (- -) Anuais para posto de Itá.

A série de vazões naturais para o posto de Itaipu é mostrada, desde seu início em 1931, na Figura 27. Apesar de uma relativa constância nas cheias de início de ano, é possível observar para o posto 266 que há com certa frequência picos elevados naquele que seria o período seco (observar *outliers* na Figura 28 para as semanas 21 a 32). Além disso, há grande variação entre cada ano e suas respectivas amplitudes de vazão, ou seja, existem ao longo do registro anos muito úmidos e outros muito secos (Figura 29). Esse comportamento está ligado a grande variabilidade dos fenômenos que ocasionam precipitação na bacia do Paraná, como descrito na seção 4.2, e que dificultam uma definição clara das estações chuvosas e secas. Dessa forma há anos onde a variação dos níveis de vazões fica entre 20.000 e 5.000 m³/s, porém em outros esse intervalo é de 6.000 a 3.000 m³/s.

Os maiores eventos de cheias ocorreram na metade mais recente do registro; nos anos de 1983, 1990 e 1997 as vazões afluentes à usina de Itaipu alcançaram os 35.000 m³/s. O ano de 1983 ainda guardou outras surpresas, uma vez que o pico do verão, apesar de alto (33.512 m³/s na semana 7), não foi o máximo de vazão desse ano, mas este ocorreu durante o esperado período seco. Um evento extremo de chuva em julho daquele ano na região sul da bacia com concentração ao longo da sub-bacia do Paranapanema (ZANDONADI, 2013) e que elevou os níveis do rio Paraná. Nessa ocasião foi registrado o maior nível de vazão (38.000 m³/s) de todos os 77 anos de observações.

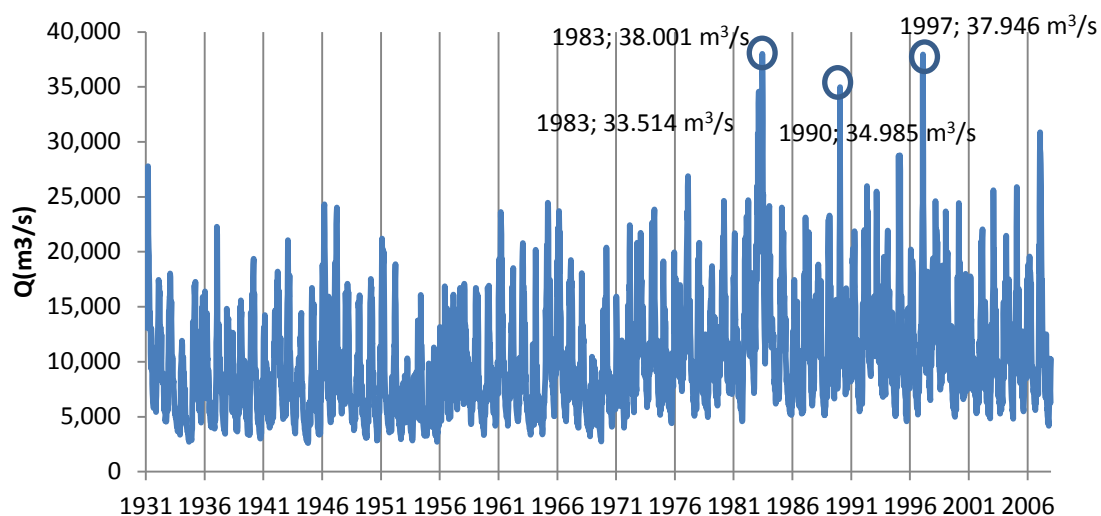


Figura 27. Registro Histórico de Vazões para a UHE Itaipu - 1931 a 2008.

Já na série semanal de Itaipu (Figura 28), verifica-se uma sazonalidade mais bem marcada entre períodos secos e úmidos do que aquela encontrada para Itá, entretanto há ainda grande presença de valores muito superiores nas distribuições de todas as semanas ao longo do ano. Em especial entre as semanas 21 e 32, onde as medianas possuem valores baixos em relação ao resto do histórico, mas existem registros de vazões com valores da ordem dos máximos do período úmido, como o de julho de 1983 mencionado anteriormente e destacados no gráfico.

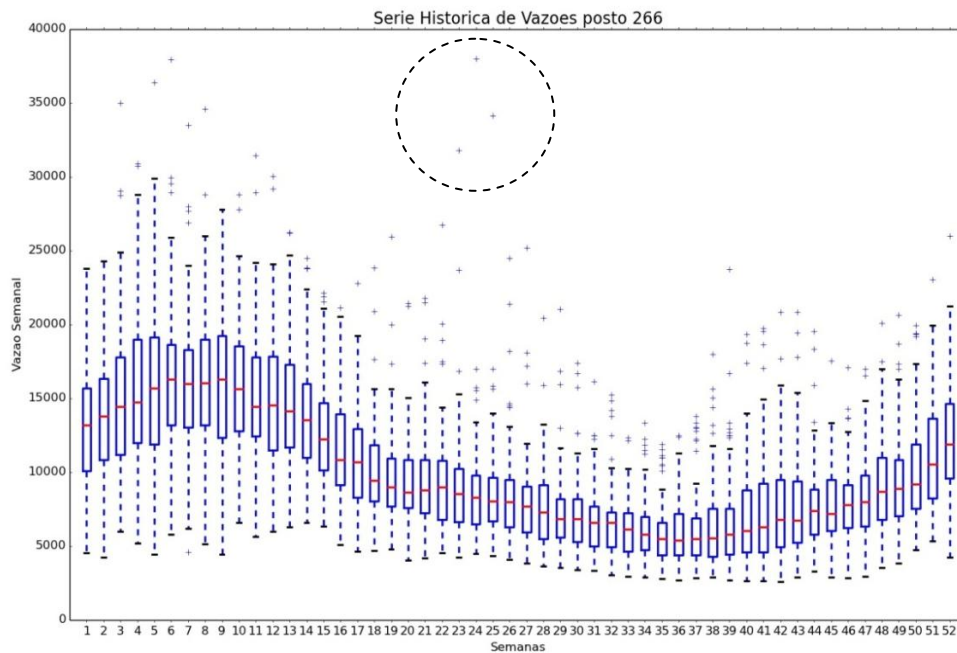


Figura 28. Série Histórica Semanal para Itaipu com destaque para os valores extremos no período usualmente mais seco.

Como já mencionado anteriormente, há uma variabilidade interanual para o registro de vazões de Itaipu. Alguns dos anos mais secos (1953, 1955, 1969, 2001) e os mais úmidos (1983, 1990, 1997) estão destacados na Figura 29. Como pode ser visto ainda na mesma figura, a metade mais recente do histórico abriga os eventos de cheias mais extremas, mas em compensação registra anos tão secos quanto os registrados anteriormente. Destaca-se o ano de 2001 onde os baixos níveis de vazões afluentes a usina de Itaipu (e a outras também associadas às mesmas condições climáticas, mas nenhuma com a importância de Itaipu) levaram o Brasil a uma política de controle no consumo de energia, devido ao alto risco de déficit.

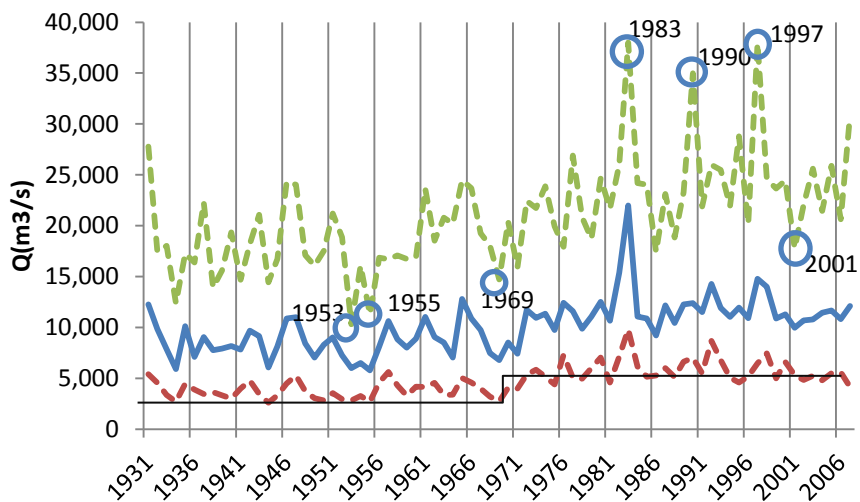


Figura 29. Médias (-), Máximos (- -) e Mínimos (- -) Anuais para posto de Itaipu.

Outro fato interessante que pode ser observado no comportamento da série de mínimos anuais da Figura 29 (como indicado pela linha de tendência desenhada sobre o gráfico) diz respeito à estacionariedade da série histórica para o posto de Itaipu. Segundo MÜLLER *et al.* (1998), as séries de vazões naturais na bacia incremental de Itaipu não são estacionárias e há um aumento nas médias anuais a partir de 1970. Este efeito aumentaria de montante para jusante. Como discutido na seção 2.2.3, a estacionariedade das séries é uma das principais premissas adotadas em modelos hidrológicos clássicos, sejam eles modelos chuva-vazão ou até mesmo aqueles baseados em teoria de séries temporais, como o PREVIVAZ. A este último caso soma-se a necessidade da estrutura de correlação da série de dados também ser estacionária. Assim, trabalhos como de MÜLLER *et al.* (1998) devem ser estendidos para outras bacias e incrementados a fim de avaliar os erros e aplicabilidade de modelos desse tipo à essas séries.

O registro de vazões para a UHE Sobradinho (código de posto ONS 168) se estende desde 1931 e é mostrado na Figura 30. O ciclo anual de cheias e secas é bem marcado e com uma amplitude que varia entre aproximadamente 5.000 m³/s a 1.000 m³/s (Figura 31). O período de cheias está normalmente associado aos primeiros meses do ano. Há anos de cheias mais fortes com máximos de vazão ultrapassando 10.000 m³/s, como nos verões de 1949, 1979 (máximo geral do registro 14.979 m³/s), 1980 e 1992.

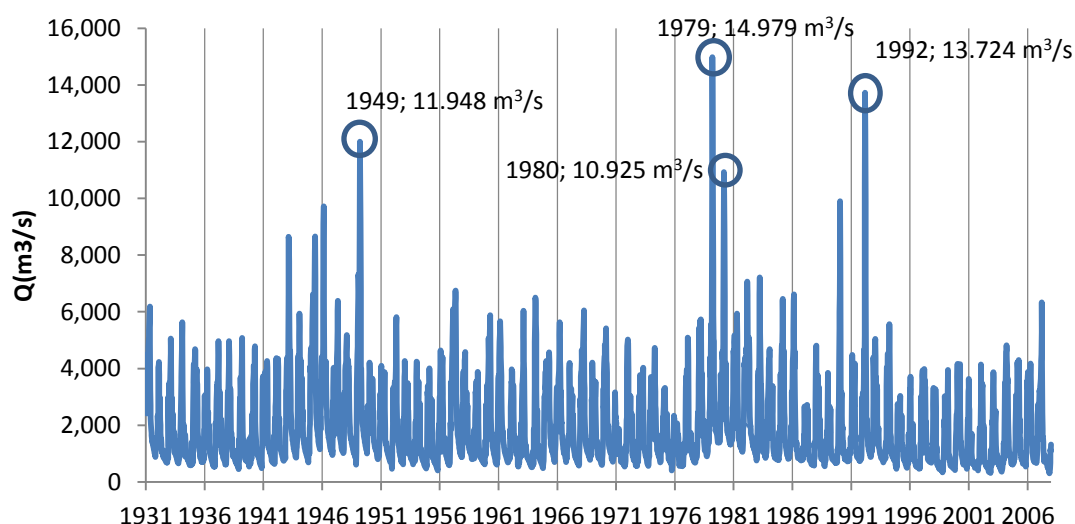


Figura 30. Registro Histórico de Vazões para a UHE Sobradinho - 1931 a 2008

A série semanal, mostrada na Figura 31, para o posto de Sobradinho é ainda mais bem “comportada” do que a para o posto de Itaipu, ou seja, há uma distinção

clara entre os períodos chuvoso e seco. Como as vazões no São Francisco são resultado quase que exclusivo das chuvas no interior de Minas Gerais os picos de vazão variam entre as semanas 4 e 12, período chuvoso característico descrito em 4.3. Além disso, pode-se verificar que há uma grande dispersão nas ocorrências de cheias nesse período. Por outro lado, os períodos secos são muito bem definidos.

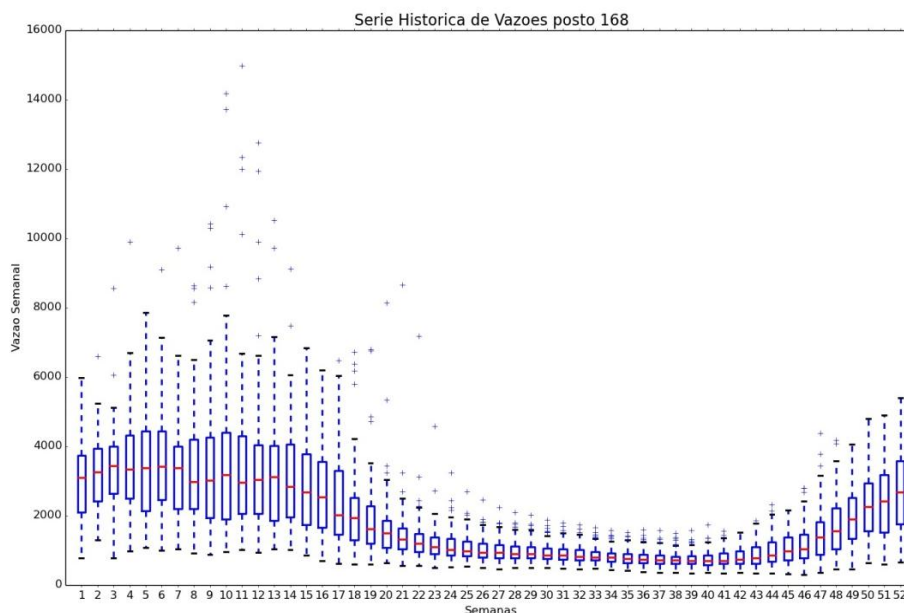


Figura 31. Série Histórica Semanal para Sobradinho.

A variação interanual do regime fluvial para o posto de Sobradinho pode ser observada na Figura 32. Como já discutido os picos de verão são frequentes, porém variam em magnitude ao longo dos anos, possivelmente influenciados por fenômenos macroclimáticos cíclicos como *El Niño* (associado à secas no Nordeste e chuvas intensas no Sul e Sudeste do Brasil durante o verão) e *La Niña* (associado a temperaturas menores do que a média no Sudeste e aumento de chuvas no litoral do Norte e Nordeste) (CAVALCANTI *et al.*, 2009). Entretanto, as mínimas anuais são constantes ao longo dos anos, com pequena variação possivelmente associada aos fenômenos acima citados.

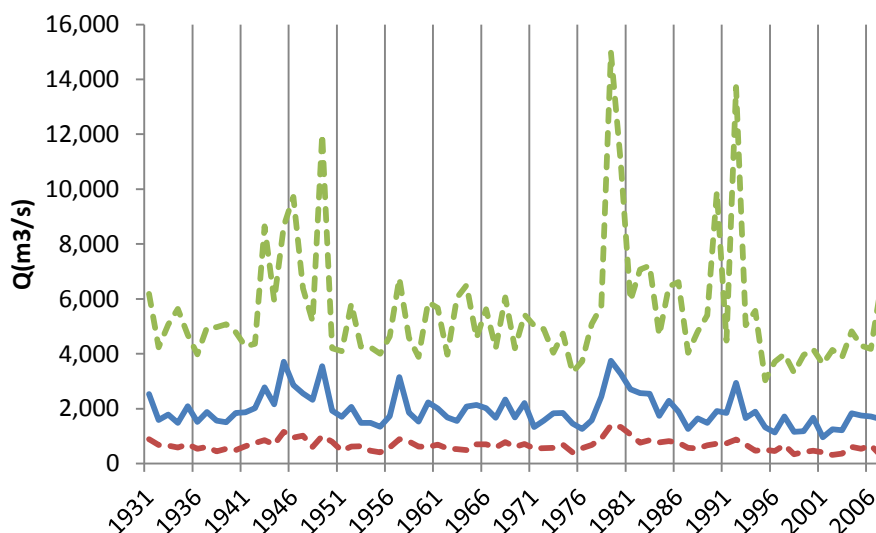


Figura 32. Médias (—), Máximos (- -) e Mínimos (- -) Anuais para posto de Sobradinho.

Na Figura 33 está mostrado o registro para a usina de Tucuruí (código de posto 275). Devido ao menor período de dados disponíveis, a visualização das variações intra-anuais é mais clara do que nos demais gráficos de registro completo. Pode-se observar o mesmo padrão sazonal bem definido encontrado no registro de Sobradinho com as cheias localizadas nos primeiros meses do ano e períodos secos entre os meses de julho e outubro. Também nesse posto a variação anual dos níveis de vazão é razoavelmente constante dentro de um intervalo aproximado de 30.000 a 2.000 m³/s (Figura 34). A maior cheia histórica foi observada no ano de 1980, no qual 63.780 m³/s de água escoaram pelo rio Tocantins naquele ponto.

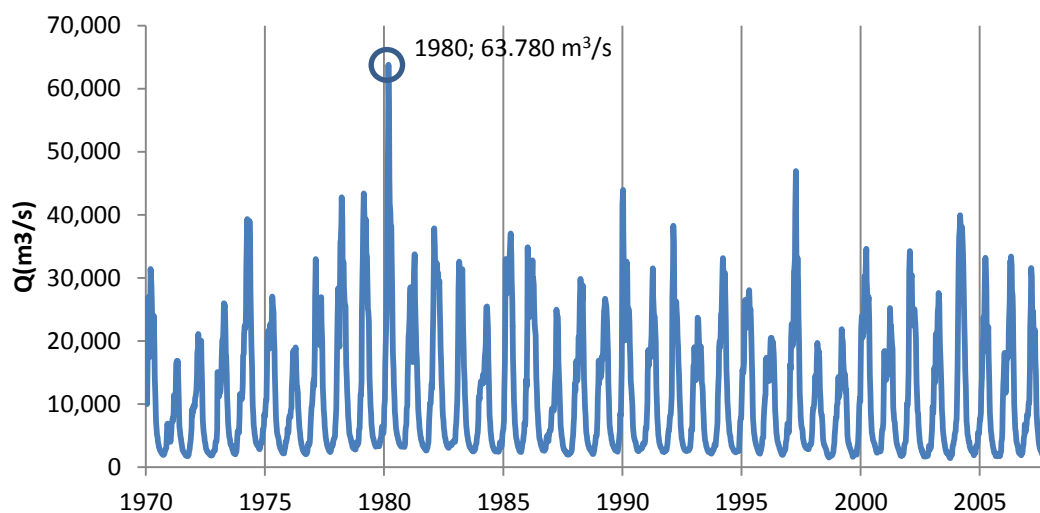


Figura 33. Registro Histórico de Vazões para a UHE Tucuruí - 1970 a 2008.

Já a série agregada semanalmente possui muito pouca dispersão, mesmo no período de cheia, que por sua vez é bem definido entre as semanas 8 e 14. Entretanto, as características fluviais e o grande tamanho da bacia poderiam atuar como um regulador das vazões afluentes e se deve, portanto, olhar com cuidado comportamentos médios. Mesmo assim se pode inferir sobre os fenômenos naturais por trás das características do registro de vazões.

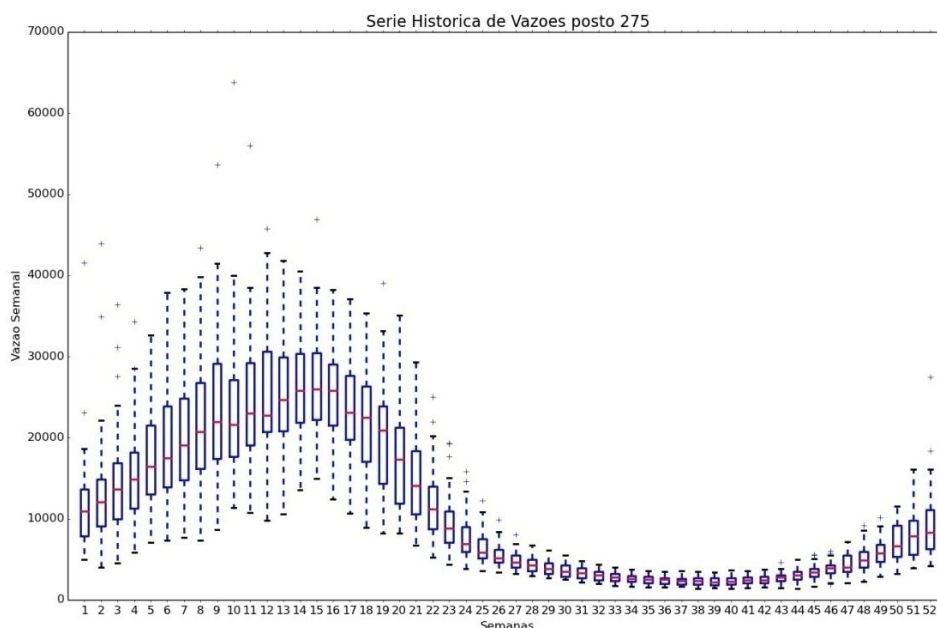


Figura 34. Série Histórica Semanal para Tucuruí.

A menor dispersão encontrada nesse posto poderia estar associada, como descrito na seção 4.4, ao bem definido regime de chuvas da bacia do Tocantins-Araguaia e ocorre entre dezembro e fevereiro com cerca de 90% da precipitação anual de toda bacia ocorrendo nesse período. O retardo causado pela Ilha do Bananal e as grandes distâncias a serem percorridas poderiam atuar como reguladores dos picos de vazão na UHE Tucuruí, que sofreriam assim pouca variação em frequência e magnitude. Entretanto, deve-se atentar para o fato de que o número de observações (40 anos) para o posto de Tucuruí é menor do que para os demais postos anteriormente discutidos, assim, toda a variabilidade dos eventos de cheias poderia não ter sido capturada pelo registro.

Já o período seco é tão bem definido quanto para Sobradinho e sofre variação ainda menor ao longo dos anos (Figura 35). Esse comportamento pode estar associado à concentração dos eventos de chuva em um período específico do ano, como discutido anteriormente.

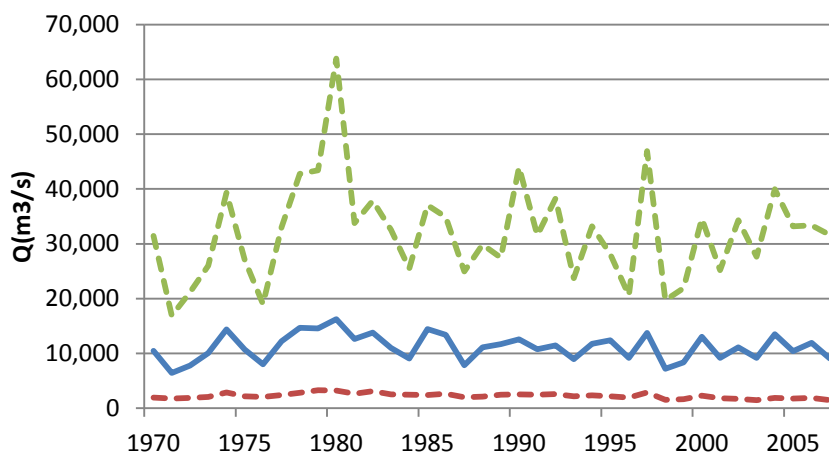


Figura 35. Médias (—), Máximos (- -) e Mínimos (- -) Anuais para posto de Tucuruí.

5.1.2. Assimetria das Distribuições.

A avaliação da assimetria nas distribuições de cada semana mostrou que a grande maioria das semanas eram assimétricas positivas como esperado para séries de vazões. Na Figura 36, onde as semanas estão agrupadas por categoria e a frequência absoluta do número de semanas em cada categoria é mostrada estes resultados podem ser verificados. Apenas para os postos de Tucuruí e Sobradinho (com exceção a duas semanas fracamente assimétricas no período de cheias em Itaipu) foram encontradas semanas nas categorias assimétrica negativa. A partir disto se pode inferir, que a maior parte dos valores dessas distribuições são maiores que a média, indicando semanas onde os níveis de vazão são homogêneos, mas alguns anos mais secos ocorreram.

Para Sobradinho estas semanas foram as de número 2, 3, 5 e 51 (fracamente assimétricas negativas), a de número 1 (moderadamente assimétrica negativa) e a de número 52 (simétrica). Já para Tucuruí a semana 35 foi categorizada como simétrica, as semanas 16, 31, 33 e 45 como fracamente assimétricas negativas e as semanas 18, 36, 37 e 46 como moderadamente assimétricas negativas. Assim, verifica-se que as semanas onde secas (ou “constâncias” em caso de simetria) “anormais” ocorrem em períodos diferentes para cada um desses postos. Para Sobradinho essas semanas se concentraram no fim e início de ano, período de cheias. A falta destas cheias poderia estar associada a verões secos ocasionados por eventos de *El Niño*. Já para Tucuruí essas semanas ocorrem nos períodos de transição, ou seja, nas semanas de mudança entre estação chuvosa e seca, que podem sofrer atrasos ou adiantamentos ao longo dos anos. A variação ao longo do ano dos índices de assimetria pode ser melhor observada na Figura 37.

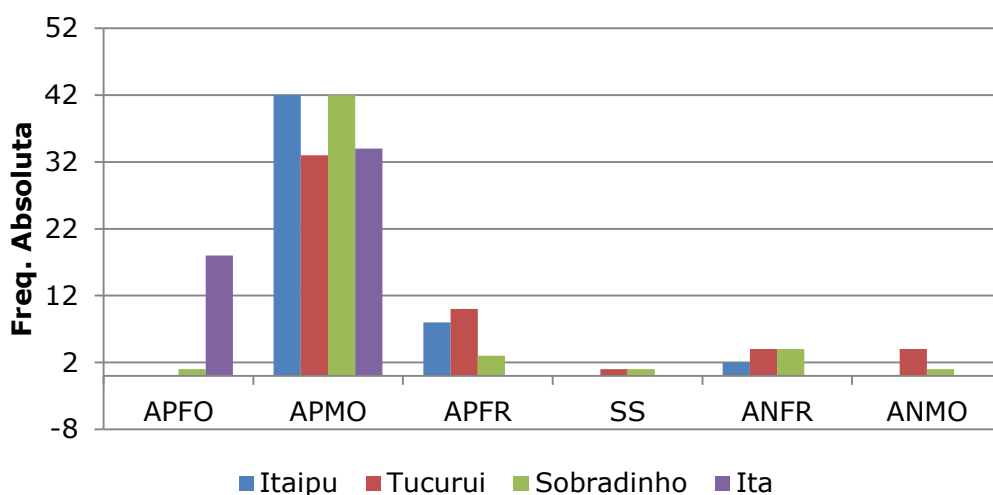


Figura 36. Frequência absoluta de semanas em cada categoria de assimetria. (A) Assimétrico; (SS) Simétrico; (P) Positivo; (N) Negativo; (FO) Forte; (MO) Moderado; (FR) Fraco.

Para o posto de Itá as distribuições das semanas estiveram todas nas categorias fortemente e moderadamente assimétricas positivas, sugerindo que ao longo de todo o registro há picos isolados de vazões. A grande maioria (73%) das semanas foi classificada como assimétrica positiva moderada, resultado esperado, pois anos úmidos fora do padrão são as anomalias mais comuns em séries de vazões. Assim, os valores dos coeficientes de assimetria para este posto estão sempre próximos à unidade, corroborando ao observado anteriormente nos picos distribuídos ao longo de todo o ano e não sendo possível definir estações secas e cheias.

Para o posto de Itaipu há grande variação dos coeficientes de assimetria ao longo do ano, não sendo possível definir qualquer tipo de padrão ou sazonalidade no comportamento deste índice para este posto (Figura 37).

Na estrutura de modelagem adotada pelo PREVIVAZ, considera-se que as séries de vazões seguem uma distribuição normal, mesmo que após necessária transformação para garantia de suas simetrias, como apresentado na seção 3.1.5. Como pôde ser observado, as transformações das séries deveriam ser sempre adotadas, uma vez que a minoria das semanas para os postos considerados esteve inserida na categoria “simétricas”. Além disso, quanto maior a dispersão e assimetria das distribuições de cada semana, menos seguro se deve ficar sobre o cumprimento da premissa básica da modelagem por séries temporais. Seria esperado que em semanas, postos ou períodos onde haja grande assimetria nas distribuições, mais difícil seria escrever as vazões futuras em função de vazões passadas, uma vez que

valores muito distantes das medianas seriam dificilmente previsíveis através de análises univariadas. Tais hipóteses serão testadas e analisadas no decorrer deste estudo.

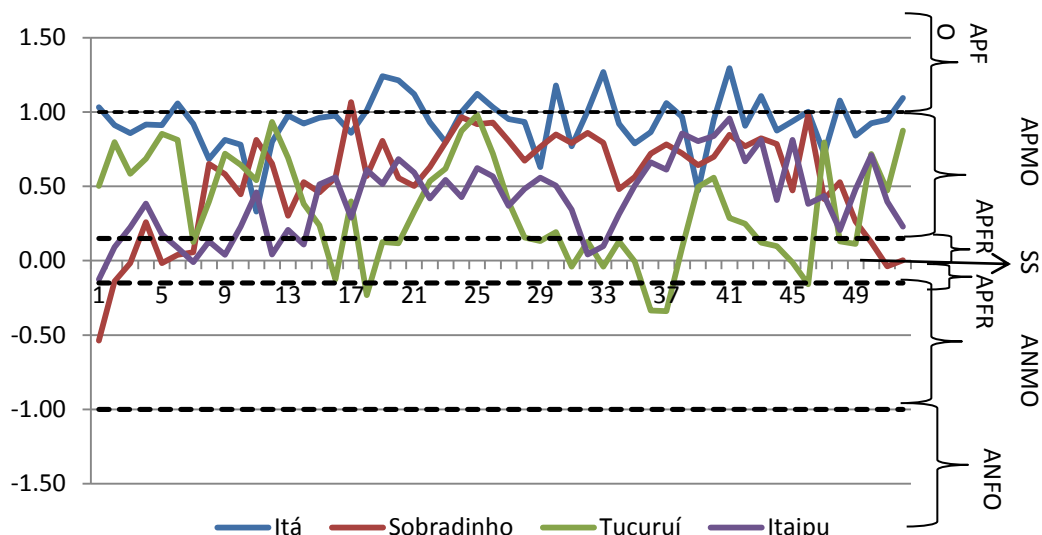


Figura 37. Coeficientes de Assimetria por posto.

5.1.3. Coeficientes de Autocorrelação.

Os gráficos dos coeficientes de autocorrelação das séries para até *lag* 6 foram calculados segundo descrito em 3.2 e estão mostrados nas Figuras 38 e 39. Para o posto de Itá é possível observar que pouca correlação há entre os dados da série, mesmo para *lag* 1, onde apenas para algumas semanas o coeficiente ultrapassa 0,8. Já para o posto de Itaipu, vê-se que para esse mesmo *lag* a correlação é boa para toda a série. Por outro lado, *lag*'s maiores não apresentam a mesma boa correlação, principalmente no período de cheias, nos quais a grande dispersão dos dados colabora para a diminuição do índice.

Já para os postos de Sobradinho e Tucuruí há alta correlação entre os termos da série especialmente para *lag*'s 1 e 2. Mesmo para *lag* 6 no período seco os índices são próximos a 0,9. Este comportamento está intimamente ligado à variabilidade das observações em cada período do ano para cada posto, como discutido anteriormente.

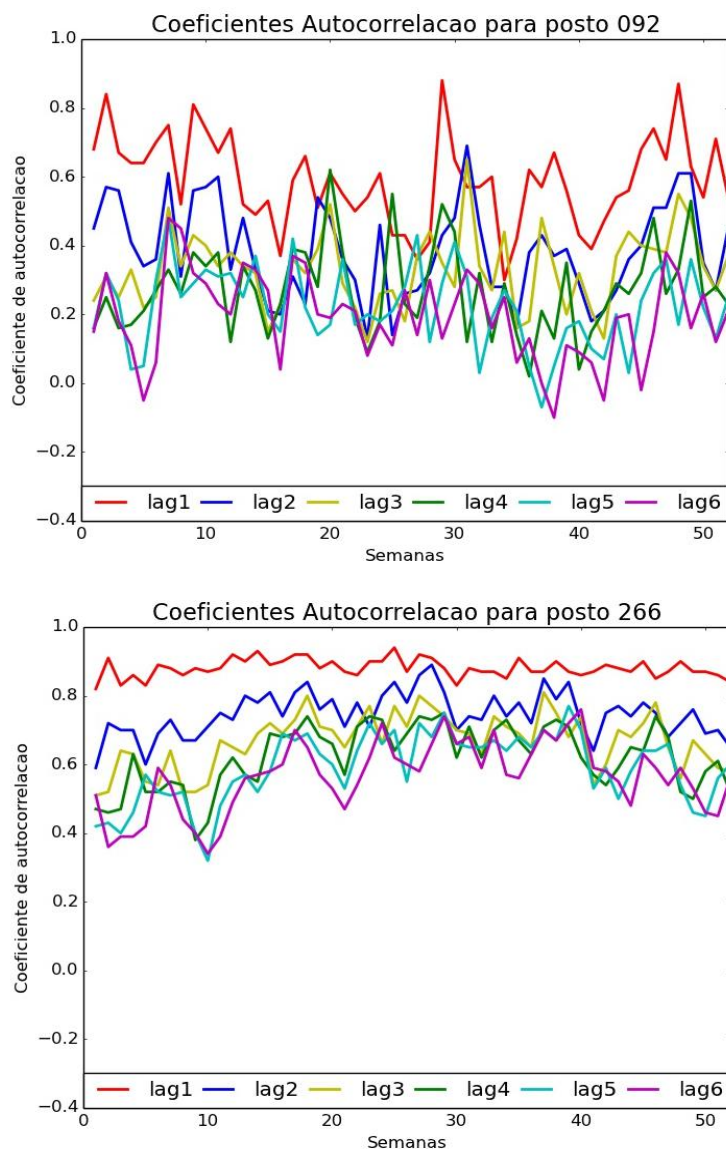


Figura 38. Coeficientes de Autocorrelação para Itá (92) e Itaipu (266).

Além disso, pode-se verificar como que para todos os postos há uma boa correspondência entre os coeficientes de autocorrelação e a dispersão nas séries semanais apresentadas nos gráficos de caixa acima (Figuras 25, 28, 31 e 34), ou seja, nas semanas e postos com grande dispersão nos dados, os coeficientes de autocorrelação são pequenos para *lag's* maiores, o que não ocorre nos períodos com padrões bem definidos. Pode-se conjecturar, a partir disso, que estas semanas apresentariam uma maior previsibilidade em uma estrutura de modelagem por séries temporais. A análise de erros realizada na próxima seção oferecerá mais elementos para esta discussão.

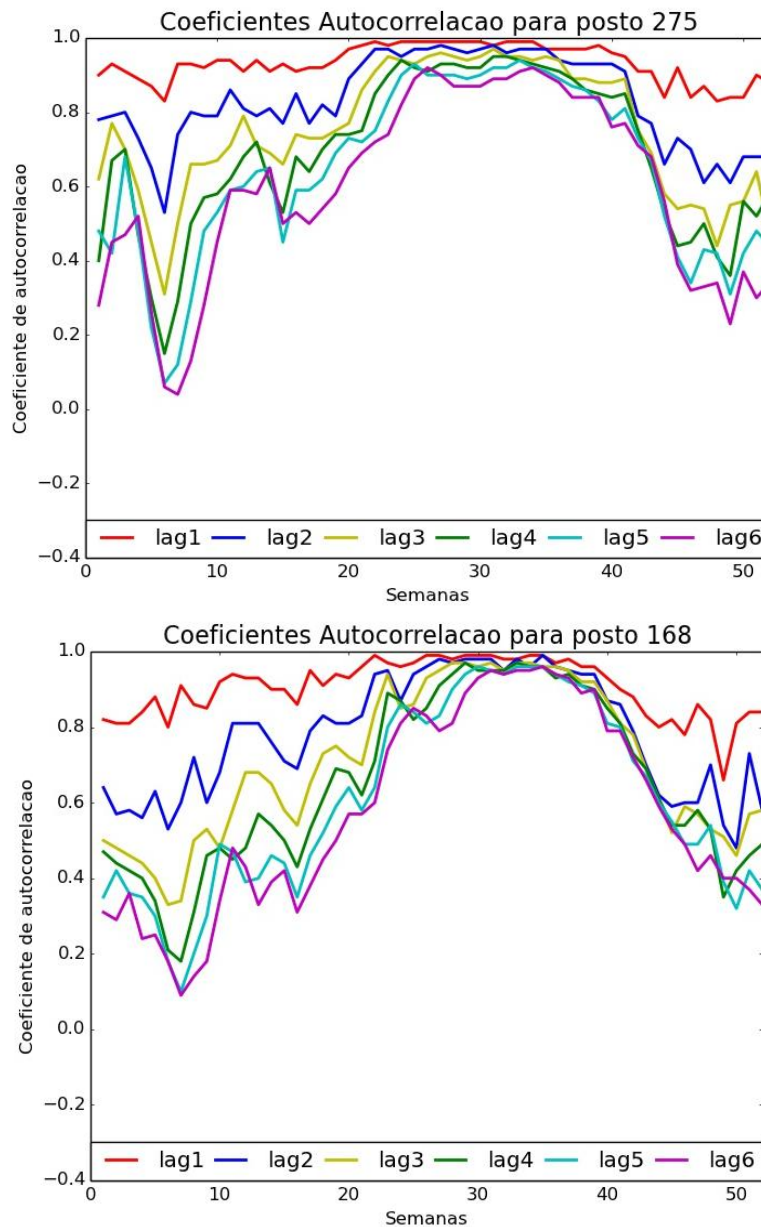


Figura 39. Coeficientes de Autocorrelação para Tucuruí (275) e Sobradinho (168).

O cálculo dos coeficientes de autocorrelação aqui analisados é referente a padrões sazonais discretizados semanalmente, ou seja, calcula-se se há correlação entre semanas consecutivas do ano ou não. Ou ainda se há informação pertinente nas vazões de *lag* semanas anteriores para definição da vazão no tempo *t*. A Figura 40 mostra a razão entre os dados de vazão em duas semanas selecionadas (semanas 2 e 30 representando períodos hidrológicamente opostos) e os dados para uma e duas semanas anteriores para o posto de Itá. Em uma situação ideal, na qual a vazão passada sempre trouxesse informação para a definição da vazão em *t*, seria esperada uma razão constante ou com pouca variação ao longo do registro, situação esta muito diferente daquela observada na Figura 40.

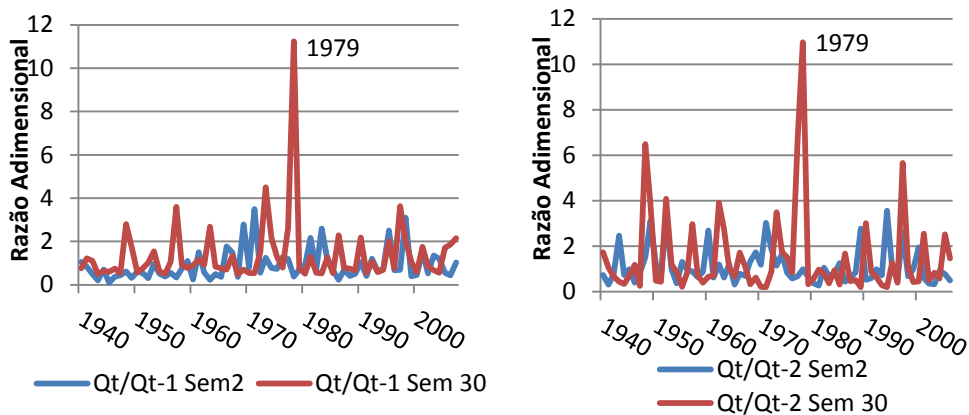


Figura 40. Razão entre Vazão no tempo t e em $t-1$ e $t-2$ para semanas selecionadas do registro de vazões de Itá.

O mesmo exercício, porém realizado para o posto de Tucuruí (Figura 41) mostra que no período de estiagem (semana 30) para este posto uma situação próxima à ideal é encontrada. Fato que já não pode ser observado para o período de cheias onde há uma grande variação da razão entre os dados, mesmo que muito menor do que a variação observada para o registro de Itá. No ano de 1979 para o posto de Itá ocorreu uma cheia na semana 30, cuja relação com as vazões anteriores no registro é pouco significativa, uma vez que a razão desta com os dados de uma e duas semanas anteriores é praticamente a mesma. Neste caso, um evento de precipitação intensa (vazão mais de dez vezes maior que as anteriores!) e de curta duração elevou os níveis do rio Uruguai e ilustra perfeitamente o caso onde vazões passadas nada dizem sobre o regime futuro de um rio.

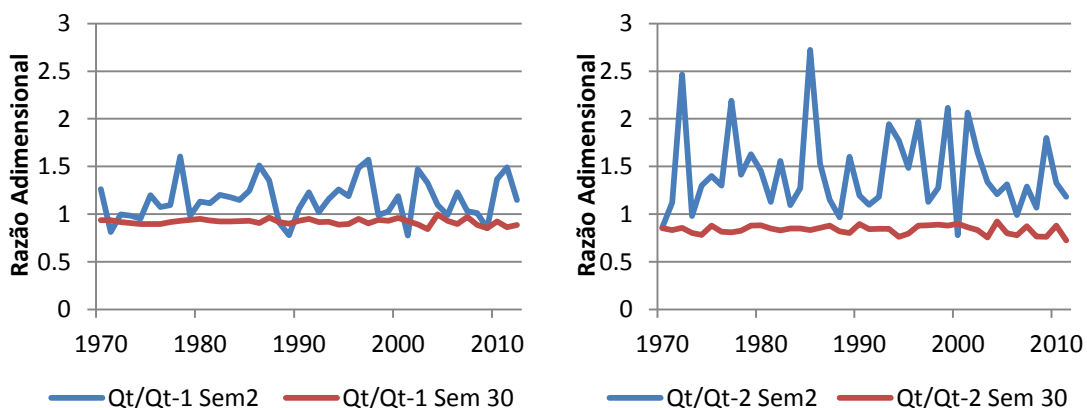


Figura 41. Razão entre Vazão no tempo t e em $t-1$ e $t-2$ para semanas selecionadas do registro de vazões de Tucuruí.

Outra questão interessante, que pode ser vista nestes gráficos é que há grande diferença na magnitude das razões tanto entre Itá e Tucuruí e também quando comparados os resultados para *lag* 1 e 2. Quanto maior a distância temporal entre os dados, maiores são as possíveis diferenças entre os valores de vazão. Essas duas bacias são bastante distintas em termos de regime pluviométrico e de suas respectivas respostas a eventos de precipitação. A proximidade com as partes altas da bacia, os solos pouco espessos e suas baixas capacidades de armazenamento encontrados à montante do posto de Itá fazem com que as variações ocasionadas por eventos de precipitação sejam rapidamente observadas no posto de Itá; em intervalos menores do que a semana, como sugerem os gráficos apresentados na Figura 40. Já a bacia de Tucuruí, responderia mais lentamente a eventos deste tipo, uma vez que possui características opostas àquelas apresentadas para Itá.

Portanto a situação considerada ideal (razão constante) para se escrever uma função linear entre observações futuras e passadas seria esperada em situações onde as variações no hidrograma acontecessem de maneira suave e recorrente ao longo dos anos. Porém o que se vê são grandes recargas pontuais relacionadas a episódios de precipitação na bacia, assim em períodos e postos onde tais ocorrências são mais frequentes e fortes é de se esperar que a vazão passada pouca relevância tenha para definição das vazões futuras (na próxima seção os resultados do modelo PREVIVAZ são avaliados e tal discussão enriquecida). Em outras palavras, quando fatores exógenos assumem papel importante na determinação do deflúvio, é de se esperar que a FAC da série temporal de vazões assumam valores pequenos.

É importante ressaltar, que dentro da modelagem aqui analisada, os parâmetros estimados são inteiramente baseados nos coeficientes de autocorrelação das séries. Assim, é de se esperar que quanto menores forem tais índices, pior a previsibilidade das vazões e conseqüentemente maiores serão os erros do modelo; mais uma vez, essas hipóteses serão analisadas e serão apresentadas no capítulo 4.

5.2. Análise geral dos erros de previsão

Como exposto na seção 3.3, os resultados do modelo PREVIVAZ para a primeira semana dos cinco últimos anos (2008 a 2012) do registro histórico de vazões naturais – com parâmetros ajustados segundo o restante da série de cada posto – foram avaliados através do cálculo do erro relativo entre a vazão prevista e aquela de fato observada. Adotaram-se as séries transformadas (como discutido na seção 3.1.5) segundo as mesmas alternativas utilizadas e definidas através de estudos próprios

realizados pelo ONS. Assim, as séries de Itá e Sobradinho sofreram transformação do tipo logarítmica e as de Itaipu e Tucuruí do tipo Box-Cox. A escolha da alternativa de transformação (ou até mesmo se alguma será utilizada) é uma escolha do usuário do modelo PREVIVAZ. De forma a se manter dentro de um contexto específico, as escolhas do ONS foram aqui mantidas, entretanto nada impede que em trabalhos futuros tais transformações sejam avaliadas.

As Figuras 42 e 43 mostram a comparação entre as vazões observadas em cada posto e as previsões realizadas pelo PREVIVAZ para a primeira semana operativa do mês ($t+1$). De maneira geral, pode-se afirmar que o modelo consegue capturar o comportamento fluvial geral para todos os postos e se confirmando como uma boa alternativa, do ponto de vista da engenharia, para a modelagem de vazões fluviais. Entretanto, como será discutido a seguir, erros relevantes foram observados em alguns dos postos estudados.

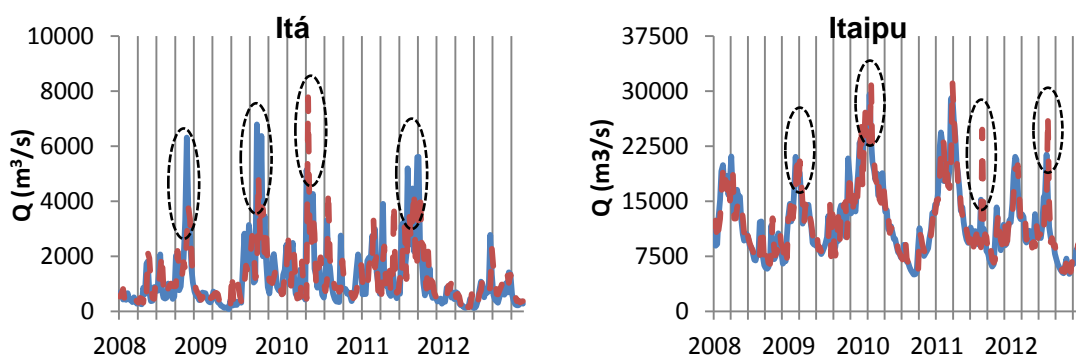


Figura 42. Vazão Observada (azul) e Vazão prevista (vermelho) para Itá e Itaipu.

Preliminarmente, pode-se afirmar que o modelo erra mais vezes nos trechos de ascensão dos hidrogramas do que nos trechos de recessão para todos os postos. Tal resultado é esperado para um modelo com uma estratégia baseada exclusivamente por séries temporais de vazões naturais, onde fatores exógenos, que influenciam a realização de afluências, não são considerados. Ainda pode-se observar que, para os postos de Itá e Itaipu, há uma frequência maior de erros grandes do que para os postos de Tucuruí e Sobradinho (Figura 43). Entretanto, apenas analisando a série de erros obtida tais observações poderiam ser confirmadas.

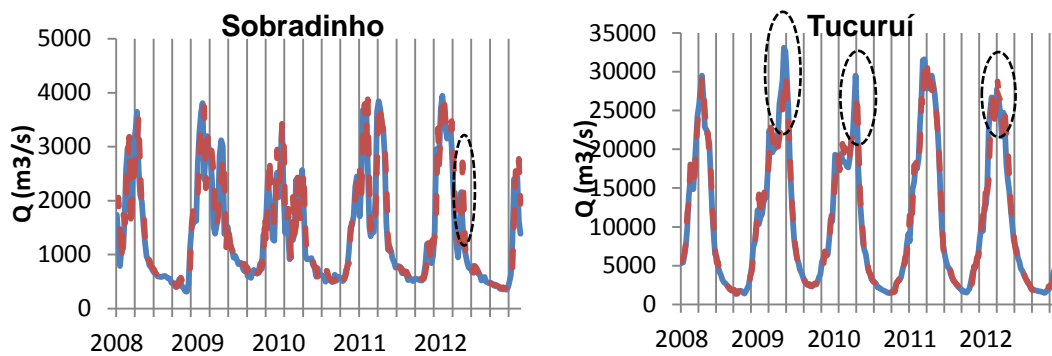


Figura 43. Vazão Observada (azul) e Vazão prevista (vermelho) para Sobradinho e Tucuruí.

Para o posto de Itá (Figura 44) o modelo se mostrou mais impreciso entre as séries testadas, com erro médio absoluto de 59%. A vazão prevista para a semana 21 de 2009 foi quase 7 vezes maior do que a observada (575% de erro). Para Itá, os erros positivos (nesta seção, quando a vazão observada for menor do que aquela prevista pelo modelo) foram mais frequentes e maiores em magnitude. Considerando, arbitrariamente, uma margem aceitável de 5% (em módulo) de erros para a previsão, das 260 semanas analisadas, em 166 (64%) foram encontrados erros positivos e acima da margem estabelecida, cuja magnitude média foi de 73%. Já os erros negativos (81 ocorrências representando 31% do total) encontrados foram menores, com média de 38%. Assim, em apenas 5% (13) das semanas o erro de previsão para o posto de Itá, em módulo, encontrou-se na faixa admissível definida arbitrariamente de 5% de erro. Mesmo que tal margem possa ser considerada de certa forma rigorosa e distante da realidade cotidiana da previsão de vazões, para o posto de Itá a adoção de um critério mais leniente, não alteraria muito o quadro geral das interpretações resultantes.

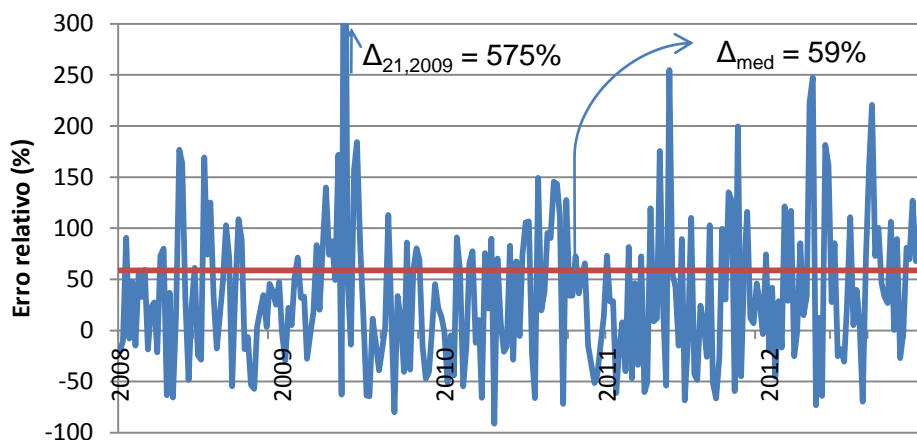


Figura 44. Erros para a previsão da primeira semana para o posto de Itá com destaque para o erro médio (59%) ao longo do período.

Quando separados por semana (Figura 45) os erros para o posto de Itá se mostram bastante dispersos em relação à média semanal. A mesma indefinição sobre períodos secos e úmidos encontrada na análise do registro histórico deste posto, também pode ser observada aqui. A grande variabilidade das vazões observadas ao longo de todo ano e a incapacidade do PREVIVAZ em representá-la, leva a resultados pouco precisos e suscita questionamentos quanto à aplicabilidade de modelos com tal estrutura em bacias com comportamento hidroclimáticos semelhantes a do Uruguai. Este ponto será rediscutido ao fim deste capítulo.

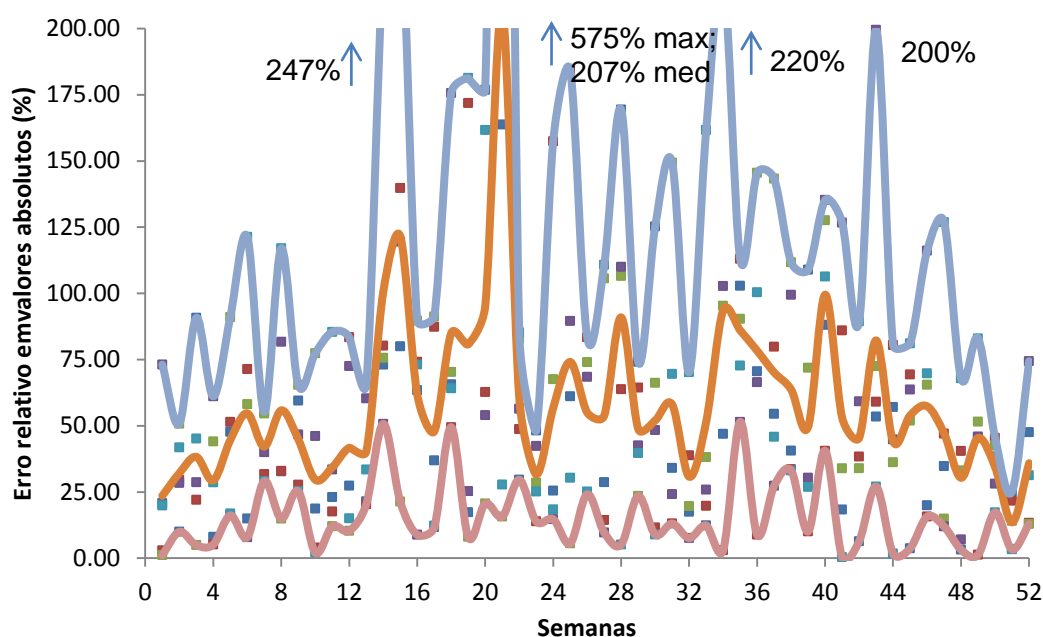


Figura 45. Erros em valores absolutos e separados por semana com envoltórias de máximos, mínimos e médias semanais para Itá.

Na Figura 46 os erros relativos à previsão para primeira semana da série de Itaipu são mostrados. Em média, o erro encontrado foi significativamente menor do que para Itá (13%). Entretanto, picos isolados de erro acima de 50% ocorreram para as semanas 33 (2011), 27 (2012), 41 (2008) e 30 (2009) e estão destacados no gráfico.

O aparecimento desses erros grandes pode estar associado à estratégia de modelagem adotada pelo PREVIVAZ e a influência de fatores exógenos na determinação da vazão na bacia a ser modelada. Em todos estes casos se pode observar, que na semana imediatamente anterior um erro importante negativo ocorreu. Assim, neste período de grande variabilidade da série (Figura 28) o modelo acaba por subestimar ou superestimar com grande frequência suas previsões.

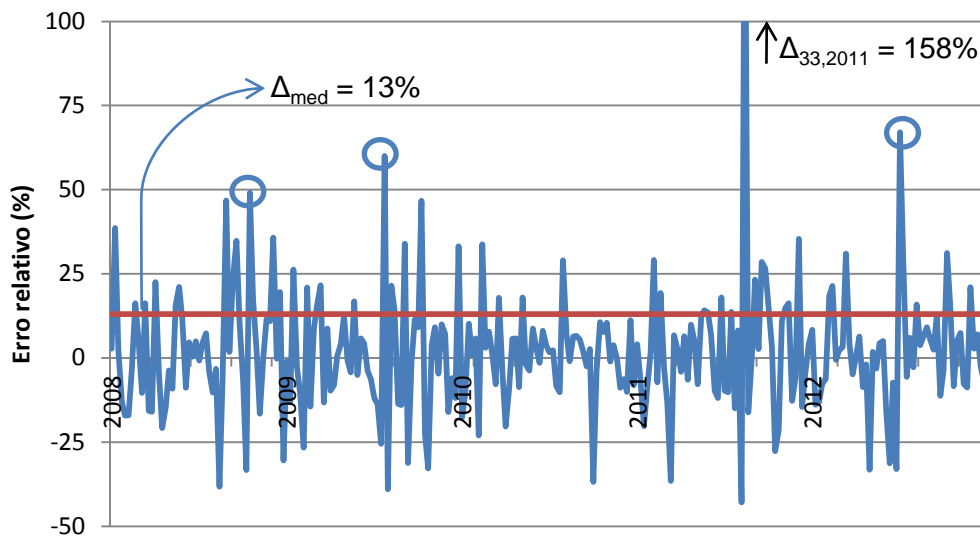


Figura 46. Erros para a previsão da primeira semana para o posto de Itaipu com destaque ao erro médio (13%) ao longo do período.

Em se tratando de afluições naturais, ambos (erros positivos e negativos elevados nesse período) os fatos poderiam estar relacionados com eventos isolados de chuva, de curta duração e abrangência espacial pequena. Quando o modelo, influenciado pelo padrão observado no histórico, é induzido a prever que haverá um pico de vazão e isto não se realiza, erros positivos acontecem. Quando o modelo não prevê que um pico ocorrerá e este, porém, ocorre um erro negativo se apresentará. Tais possibilidades podem estar intimamente relacionadas com o regime pluviométrico da região e a consequente resposta da bacia, no qual (como discutido ao longo do capítulo 4) eventos assim são comuns na bacia do Paraná e responsáveis pela grande dispersão encontrada na série de vazões de Itaipu.

Quando separados os erros negativos dos positivos não se observa, para Itaipu, a grande diferença antes encontrada para Itá, tanto para a magnitude dos erros quanto em sua frequência. Considerando a mesma margem arbitrária para um nível aceitável de erro de 5%, as vazões previstas foram maiores do que suas respectivas observações em 38% dos casos (100 entre as 260 semanas analisadas) e tiveram média de 18% (lembrando que este valor equivale à média dos valores positivos de erros maiores que 5%), enquanto 33% das previsões foram menores do que a vazão observada e com erro médio de 15%. Ou seja, apenas em 29% das semanas analisadas o erro de previsão esteve contido na faixa admissível considerada, valor expressivo e significativamente superior ao observado para o posto de Itá. Se eliminados os quatro valores extremos de erro comentados anteriormente e indicados

na Figura 46, a média de erros positivos para o posto de Itaipu se iguala aos mesmos 15% dos erros negativos e tal resultado se assemelha ao encontrado para a bacia mais “comportada” aqui analisada e apresentada por último neste capítulo.

Portanto, para o posto de Itaipu, onde eram esperados erros grandes devido à acentuada dispersão das observações do registro histórico, a maior parte daqueles encontrados no processo de previsão esteve associada a outras limitações intrínsecas à modelagem. É possível que nos cinco anos escolhidos para análise de erros apenas quatro eventos (ou menos) de chuvas intensas localizadas e capazes de alterar significativamente as respostas históricas da bacia aconteceram. No restante do período o comportamento da bacia foi “estável” e o modelo respondeu com um erro médio recorrente.

Se separados por semana (Figura 47) a constância dos erros encontrados para Itaipu fica ainda mais evidente. Excepcionalmente para semana 33, na qual em 2011 um erro muito elevado ocorreu (158% como mostrado na Figura 46), para todas as semanas deste posto o modelo PREVIVAZ errou com margens razoavelmente constantes, como poderia ser suposto através da FAC bem definida na maior parte do ano e mostrada em 5.1.2 (Figura 38 posto 266). Ressalta-se que entre as semanas 27 e 42 há, potencialmente, maiores incompatibilidades entre o resultado do modelo e a realidade. Este coincide com boa parte do período de maior dispersão do registro de vazões para este posto, onde eventos de chuva intensos são mais comuns na bacia do Paraná (capítulo 4.2), cujas consequências sobre os resultados do PREVIVAZ seriam, provavelmente, muito ruins, mesmo com boa correlação dos dados do registro histórico.

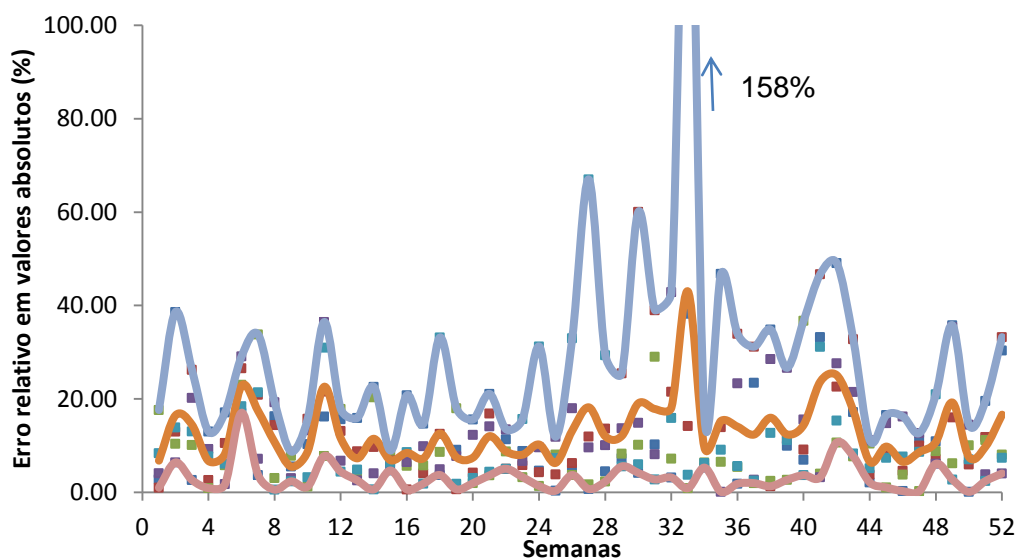


Figura 47. Erros em valores absolutos e separados por semana com envoltórias de máximos, mínimos e médias semanais para Itaipu.

A grande dispersão dos dados do registro histórico para o posto de Sobradinho (fora do período de estiagem, entre as semanas 1 e 16 principalmente) se mostrou potencialmente importante para os erros encontrados no processo de previsão de suas vazões (Figura 48). A média geral encontrada foi de 18% de erros, com picos ao longo de todo o período maiores do que 50%. Nas semanas 3 de 2008, 18 de 2009, 15 e 51 de 2012 os erros ultrapassaram 70%. Esses picos de erros estão localizados majoritariamente no período de cheias da bacia do São Francisco. A variabilidade ao longo dos anos das precipitações do interior de Minas Gerais, região responsável por importante parcela da vazão na bacia do São Francisco, traria grande incerteza sobre a disponibilidade hídrica nessa região e tal inconstância é sem dúvida refletida na variabilidade hidrológica observada no histórico.

A importância desses picos é ainda mais evidente quando separados os erros em positivos e negativos; para previsões subestimadas (entre aqueles maiores em do que 5% em módulo) o erro tem média de 17%, enquanto que para erros positivos a média é de 26%. Em termos de frequência, tal diferença também é evidente, uma vez que os erros positivos (maiores do que 5%) correspondem a 43% (113) das ocorrências, enquanto os negativos correspondem a 28% (73). Observa-se que a proporção de semanas com erro dentro da faixa “aceitável” considerada (de 5%) foi idêntica à de Itaipu (29%); entretanto, enquanto para este posto a distribuição do erro (em proporção) mostrou-se aproximadamente simétrica (38 e 33% de erros positivos e negativos, respectivamente), para o posto de Sobradinho essa distribuição é claramente assimétrica (43 e 28%).

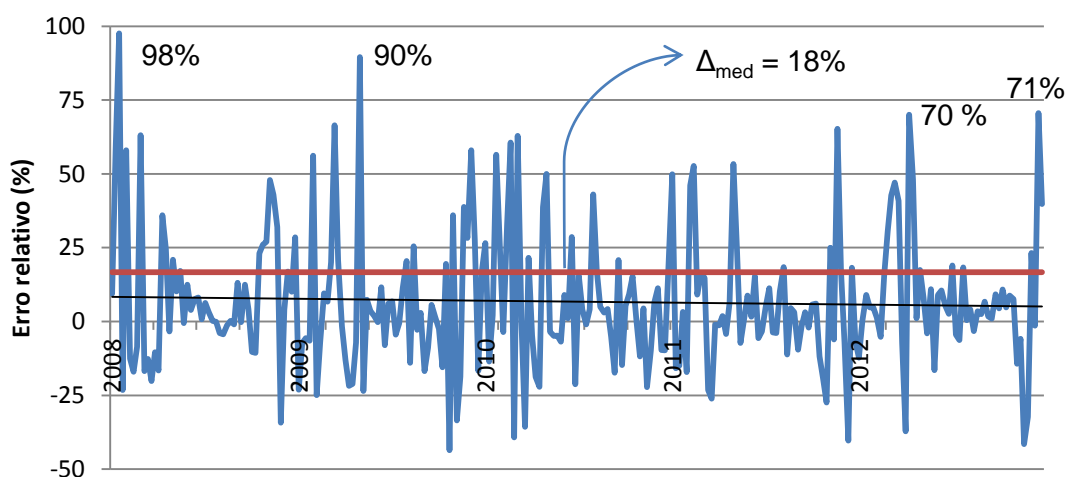


Figura 48. Erros para a previsão da primeira semana para o posto de Sobradinho com destaque ao erro médio (18%) no período.

Para o posto de Sobradinho a mesma sazonalidade bem marcada e expressa em sua FAC (seção 5.1.2) é observada quando agrupados os erros por semana (Figura 49). Pode-se observar que os grandes picos de erros nos períodos chuvosos comentados anteriormente não elevam muito suas respectivas médias semanais, exceto para a semana 18, na qual a recorrência de erros eleva a média a 46%. Apesar dos níveis muito baixos de erros para o período de estiagem (como esperado) neste posto, a semana 31 de 2010 um erro de 43% (positivo) ocorreu e esta associado a uma vazão de estiagem não prevista, uma vez que a vazão afluyente esteve em níveis comuns (494 m³/s) para esse período.

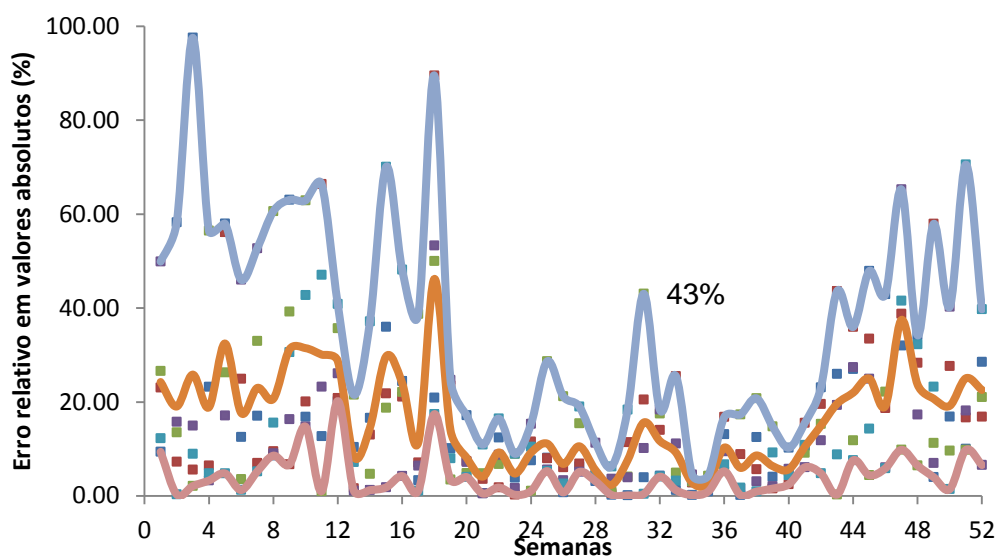


Figura 49. Erros em valores absolutos e separados por semana com envoltórias de máximos, mínimos e médias semanais para Sobradinho.

Para o posto de Tucuruí, o período de chuvas bem definido, as características hidrológicas da bacia assim como suas grandes dimensões (discutidas nas seções anteriores) foram determinantes para os bons resultados apresentados pelo PREVIVAZ nessa bacia. Como pode ser verificado na Figura 50, os erros encontrados foram muito menores do que aqueles de outros postos. A média geral de erros foi de 8% com máximo de 42% para a semana 1 de 2011, na qual a vazão de 8.125 m³/s foi superestimada. Outra boa medida de como o “bom” comportamento da série de Tucuruí colabora para o melhor desempenho do PREVIVAZ, é a diferença mínima encontrada para os erros negativos e positivos. Neste posto foi ainda considerada a mesma margem de erros aceitáveis de 5% para se manter a coerência na análise entre os postos, mesmo que neste posto ela possa representar um corte demasiado grosseiro. Os negativos representaram 27% (70 entre 260) das ocorrências com média

de 12%. Já os erros positivos totalizaram 86 (33%) entre as 260 semanas analisadas, com média de 13%. E como esperado, a maior parte (40% ou 104 das 260 observações) das semanas analisadas estiveram dentro da margem aceitável de erro.

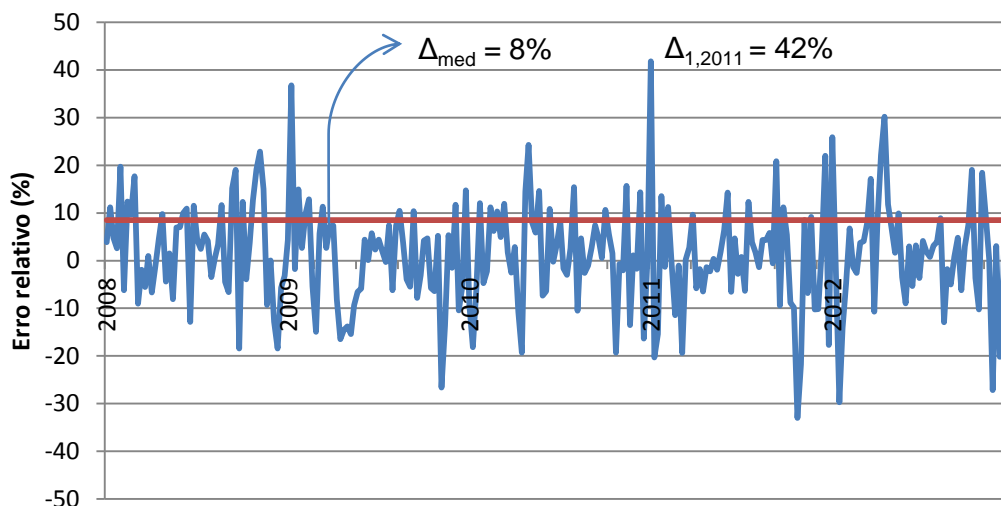


Figura 50. Erros para a previsão da primeira semana para o posto de Tucuruí com destaque para o erro médio (8%) para o período.

Se separados por semana (Figura 51), os resultados para Tucuruí mostram como os baixos níveis de erro se realizam ao longo de todo o ano. Mesmo que pequenos picos de erros sejam verificados nas semanas de verão (semanas 44 a 16). A envoltória de máximos demonstra uma sazonalidade na magnitude dos erros de previsão, ou seja, no período de estiagem (semanas 20 a 36) o modelo erra menos do que no período mais chuvoso. Este resultado está de acordo com o esperado após a análise de dispersão das observações do registro histórico e da definição da FAC desta mesma série realizados anteriormente.

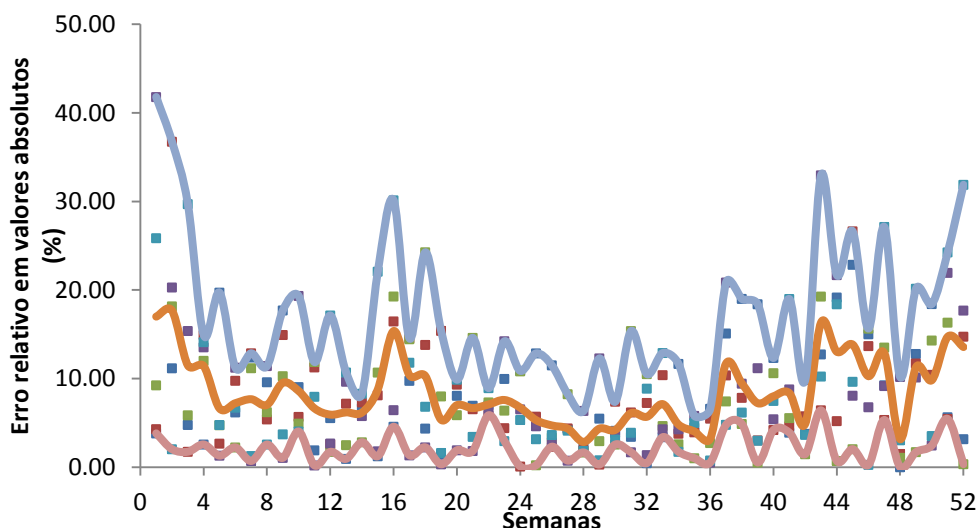


Figura 51. Erros em valores absolutos e separados por semana com envoltórias de máximos, mínimos e médias semanais para Tucuruí.

5.3. Acurácia dos Intervalos de Confiança Teóricos

Na análise de acurácia dos intervalos de confiança teóricos (IC) seus limites foram testados quanto a conter ou não a vazão observada para o mesmo período de análise anterior. Além da frequência em que as vazões observadas estiveram fora dos IC, a distância entre a vazão observada e o limite mais próximo também foi calculada. Não será discutido neste trabalho a adequação ou precisão do cálculo dos intervalos de confiança, mas apenas uma simples conferência da capacidade deste índice, cujo cálculo é sempre realizado e disponibilizado pelo PREVIVAZ, em capturar e representar melhor a resposta do modelo em uma potencial abordagem não determinística.

O nível de confiança adotado neste estudo foi o mesmo daqueles utilizados pelo ONS no PMO e suas revisões de 68% de confiança. Entretanto, tal índice também pode ser determinado pelo usuário trazendo assim liberdade e abrindo portas para futuras análises mais aprofundadas sobre novas abordagens na aplicação deste índice.

É importante ressaltar que, aqui, um erro negativo significa que a vazão observada esteve abaixo do limite inferior do IC. Quando positivo o erro está associado à vazões observadas maiores do que o limite superior. A interpretação de tais resultados é um pouco distinta daquela apresentada na seção anterior, uma vez que quando estiver fora por ser menor do que o limite inferior do IC (erro negativo) o modelo terá superestimado sua previsão. Por outro lado, quando Q_{obs} for maior do que

o limite superior do respectivo intervalo, a previsão terá subestimado o real comportamento do rio no posto em questão.

Cabe lembrar, que como os limites do intervalo de confiança são função do valor esperado previsto, quanto maior o erro durante a previsão, maior seria a chance do intervalo não conter a vazão observada. Além disso, a amplitude do IC depende também da variância do erro do modelo (calculada para cada alternativa de modelagem) conforme formulação apresentada em CEPEL (2009)

A figura 52 mostra o gráfico com os limites do IC e a vazão observada para o período estudado no posto de Itá. Como pode ser visto há grande dispersão e variabilidade nas amplitudes calculadas para o IC para todo o ano e ao mesmo tempo em que há previsões com limites inferiores muito pequenos (até mesmo zero), há semanas onde o modelo estima níveis altíssimos de vazão.

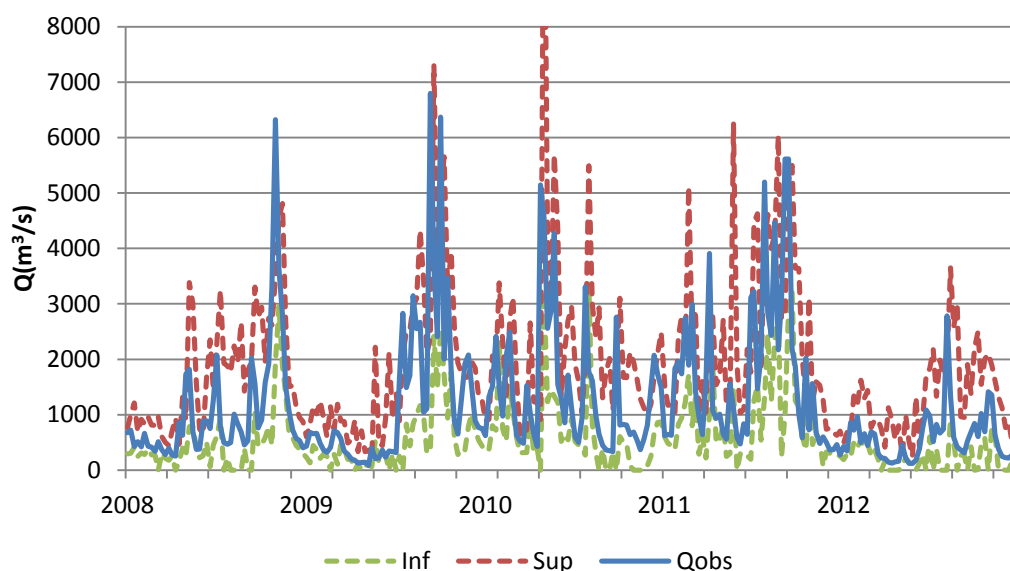


Figura 52. Intervalos de confiança e vazão observada para Itá.

Para o posto de Itaipu (Figura 53) já se observa uma amplitude mais constante ao longo do ano nos limites do IC. Há picos bem definidos nos períodos chuvosos e em algumas semanas o modelo parece ter sido induzido pelo valor atípico de vazão observada na semana anterior a calcular níveis desproporcionais de vazão, como já discutido na seção anterior.

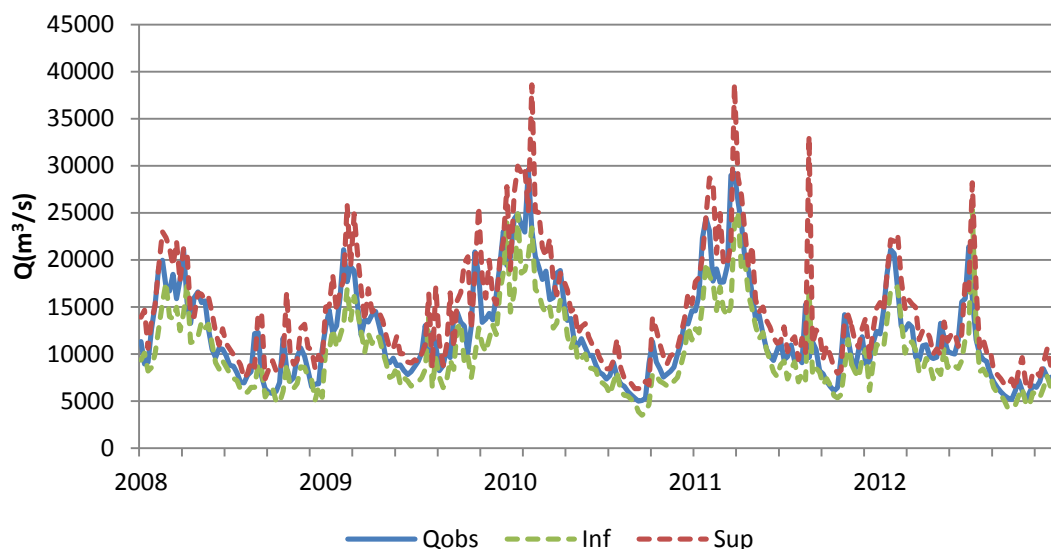


Figura 53. Intervalos de confiança e vazão observada para Itaipu.

A figura 54 mostra os mesmos resultados, porém para o posto de Sobradinho, no qual se observa grandes amplitudes de IC nos períodos chuvosos e não tão grandes assim nos de estiagem. Essa diferença está intimamente ligada à dispersão e qualidade da FAC estimada para estas diferentes semanas neste posto. A menor amplitude do IC está associada à menor variância do ruído do algoritmo selecionado (como descrito em 3.1.4), que, por sua vez, também dependerá dos valores dos coeficientes da FAC (conforme apresentado em CEPEL, 2009).

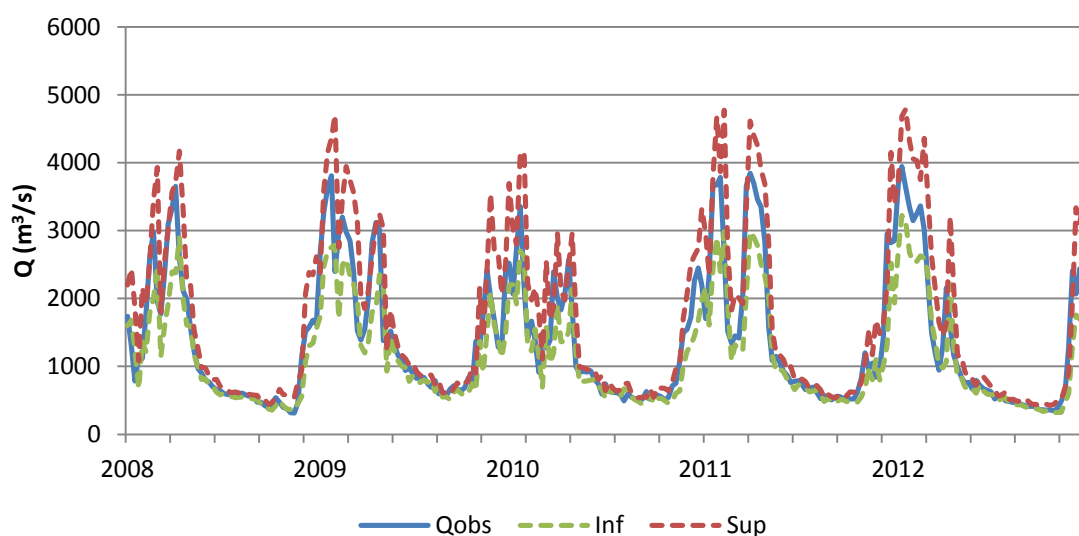


Figura 54. Intervalos de confiança e vazão observada para Sobradinho.

Para Tucuruí (Figura 55), essa diferença nas amplitudes de períodos de estiagem e chuvosos é ainda mais evidente. Ressalta-se ainda que, como observado para os postos de Itaipu e, sobretudo, Sobradinho os intervalos são “estritos” no período de estiagem desse posto. Já nos períodos de maior dispersão das vazões e, por conseguinte, menor autocorrelação dos dados os IC's apresentam maior amplitude.

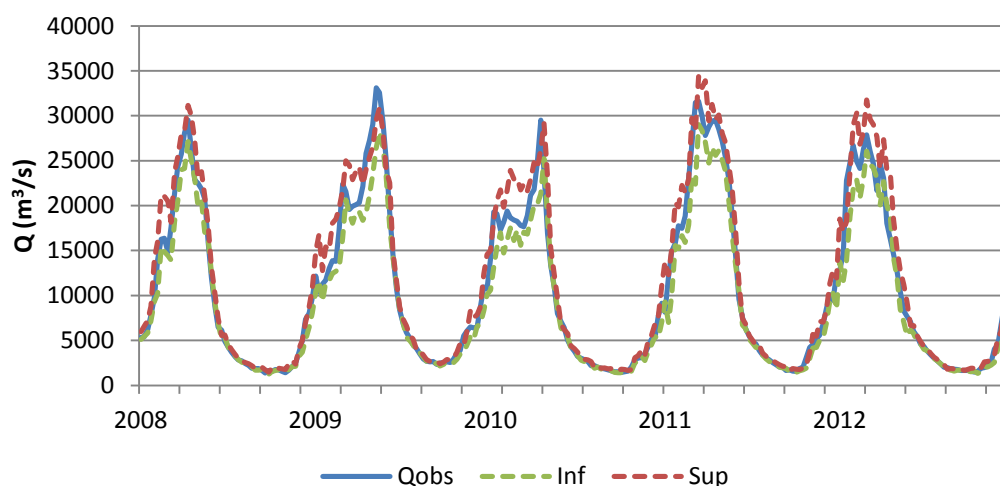


Figura 55. Intervalos de confiança e vazão observada para Tucuruí.

As figuras apresentadas anteriormente dão uma ideia geral do comportamento geral dos intervalos de confiança calculados pelo PREVIVAZ, mas uma análise mais precisa necessita da quantificação das discrepâncias verificadas. Dessa forma, a Tabela 6 mostra os resultados gerais para cada posto nas duas categorias aqui analisadas: frequência (quantas vezes foram ultrapassados os limites de IC); e erro relativo percentual (quão longe esteve a vazão observada do limite ultrapassado).

Para os postos de Itá e Itaipu o valor observado foi inferior, mais frequentemente, ao IC calculado (16% das 260 observações para Itá e 15% em Itaipu) a vazão observada do que o contrário (9% em Itá e 11% em Itaipu). Isto pode estar associado a eventos de cheia não previstos (ou subestimados) pelo PREVIVAZ e comuns nessas bacias, que causam, inclusive, a grande dispersão encontrada nesses postos, especialmente em Itá.

Em termos gerais, nesses postos a vazão observada esteve mais vezes fora dos IC's do que para Sobradinho (38% no geral) e Tucuruí (42%). Entretanto, os erros associados aos eventos em Itá (principalmente) e Itaipu foram maiores. Em Itá os erros estiveram em média em torno de 30% com máximo de 157% associado à mesma semana 21 de 2009, na qual o modelo previu com erros de mais de 500%

(seção 5.2). Já em Itaipu a média de erros foi de 11% no geral e com pouca diferença em magnitude para sub ou superestimação.

Tabela 6. Frequência e Magnitude de erros para os intervalos de confiança

Q_{obs}	Itá		Itaipu	
	Frequência	$\Delta_{médio}$ (%)	Frequência	$\Delta_{médio}$ (%)
Abaixo do L. Inf. (Superestimação)	23 (9%)	31	29 (11%)	12
Acima do L. Sup. (Subestimação)	42 (16%)	30	38 (15%)	11
Total	65 (25%)	30	67 (26%)	11

Q_{obs}	Sobradinho		Tucuruí	
	Frequência	$\Delta_{médio}$ (%)	Frequência	$\Delta_{médio}$ (%)
Abaixo do L. Inf. (Superestimação)	62 (24%)	14	60 (23%)	5
Acima do L. Sup. (Subestimação)	36 (14%)	11	48 (18%)	7
Total	98 (38%)	13	108 (42%)	6

Como já adiantado, em Sobradinho e Tucuruí ocorreram com mais frequência eventos relacionados a não inclusão das vazões realizadas nos IC's. Além disso, os erros nesses postos se configuraram com maior frequência como sendo de superestimação na previsão da vazão semanal, ou seja, os limites inferiores dos IC's foram maiores do que a vazão observada. Isto pode estar associado à pequena amplitude dos IC's nos períodos de estiagem comentados acima, ou seja, o modelo prevê vazões levemente maiores do que aquelas realizadas (comum em períodos de estiagem), porém esse pequeno desvio é suficiente para que os limites do IC's não contenham o valor real de vazão. Para o posto de Tucuruí, isto pode ser especialmente observado devido à grande quantidade de erros nos intervalos de confiança, mas todos com pequena diferença em relação ao valor observado. Para este posto ressalta-se ainda, que apenas nele foram encontrados erros associados a subestimações maiores (7% em média) do que por superestimação (5%).

Para o posto de Sobradinho, a magnitude dos erros relativos aos IC's foi semelhante àquela encontrados em Itaipu para subestimações. Entretanto, para eventos de vazão prevista bem maior do que aquela observada, os erros neste posto foram um pouco maiores, em média 14%. Os erros em Sobradinho estão

potencialmente associados a eventos de cheia esperados pelo modelo (baseado no registro histórico), porém não concretizados durante o verão. Tal hipótese poderá ser corroborada pelo gráfico dos erros agrupados por semana, que será mostrado a seguir.

A Figura 56 mostra para os postos de Itá e Itaipu a magnitude média percentual das distâncias entre vazão observada e limites de IC agrupadas por semana. Foram computadas no cálculo apenas as semanas onde o intervalo não continha a vazão observada, ou seja, as médias podem estar contemplando de 1 a 5 valores dependendo de quantas vezes naquela semana específica os limites de IC não contiveram o valor real da vazão no posto estudado.

Para os dois postos apresentados na Figura 56, não se pode observar sazonalidade bem marcada nos erros. Apenas que os maiores picos de erro estão associados a superestimções (erros negativos) realizadas pelo modelo. Em outras palavras, os erros são maiores quando valores altos de vazão são previstos e não se realizam e isto ocorre potencialmente para todo o ano em Itá e no inverno para Itaipu, como destacado no gráfico.

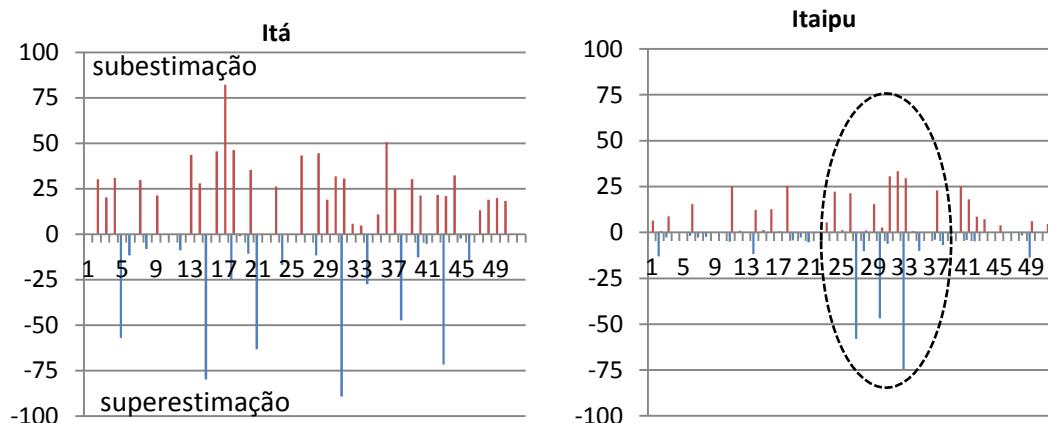


Figura 56. Distâncias percentuais da vazão observada em relação aos limites dos intervalos de confiança para Itá (esquerda) e Itaipu (direita) agrupados por semana.

Para os postos de Sobradinho e Tucuruí os erros associados aos IC's e agrupados por semanas estão mostrados na Figura 57. Para Sobradinho pode se observar o comportamento sazonal, no qual maiores erros são encontrados na estação chuvosa. Por outro lado, os erros não seguem um padrão, há semanas com erros predominantemente positivos outras, predominantemente negativos nesse mesmo período. De toda forma, há um aumento nos erros de previsão associados a grande dispersão dos dados e a dificuldade de definição da FAC para este posto no período chuvoso. Já para Tucuruí os níveis de erros encontrados foram sempre baixos

e não seguem padrão bem definido, mesmo que haja picos de erros de subestimação nas semanas 3 e 45 (período chuvoso) associadas possivelmente a eventos de cheias maiores do que as esperadas pelo modelo.

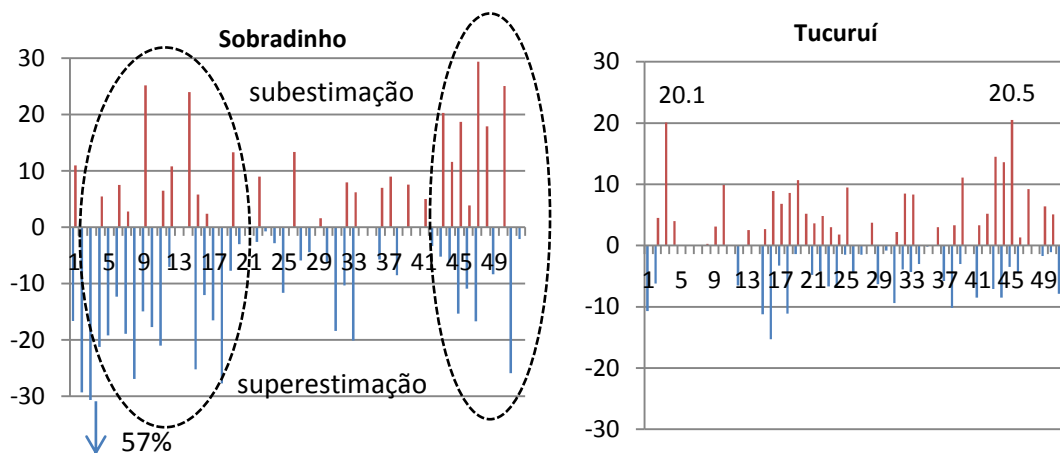


Figura 57. Distâncias percentuais da vazão observada em relação aos limites dos intervalos de confiança para Sobradinho (esquerda) e Tucuruí (direita) agrupados por semana

5.4. Síntese dos resultados

Os resultados mostraram que nos períodos de maior dispersão no registro histórico o modelo PREVIVAZ encontrou maiores dificuldades em capturar o comportamento do regime fluvial em todos os postos. É interessante notar que análise dos erros positivos e negativos em respeito ao valor esperado e com uma margem de erro arbitrária de 5%, indicou que em todos os postos o modelo superestimaria as vazões mais vezes e em maior grau. Por outro lado, a verificação análoga realizada a partir dos intervalos de confiança teóricos, indicou que o mesmo ocorria, mas somente para os postos de Tucuruí e Sobradinho. Já para Itá e Itaipu o mais frequente foi a subestimação (não captura valores elevados) das vazões observadas. Tal diferença indica que considerar os IC's na estrutura de modelagem poderia trazer mais confiança na interpretação e representatividade de seus resultados do que adotar simplesmente o valor esperado da distribuição.

Pode-se inferir, através dos resultados apresentados, que a diferença no comportamento da estrutura de erros nos postos de Itá e Itaipu em relação a Sobradinho e Tucuruí se deva a uma forte influência do já destacado regime pluviométrico local combinado com as características das bacias. Entretanto, apenas a

análise das séries de chuvas médias nessa bacia poderá subsidiar o avanço nesta discussão.

Ressalta-se que análise aqui realizada considerou a previsão para a primeira semana e construída a partir apenas de dados observados. No uso cotidiano do modelo pelo ONS, a semana em curso é preenchida (já que, usualmente, a análise se inicia na quarta-feira, no caso do PMO e na quinta-feira em suas revisões) com resultados de modelos de previsão diários para então compor a média desta semana. Além disso, ao longo dos últimos anos modelos determinísticos diários dos mais diversos tipos foram desenvolvidos para a previsão de vazões da primeira semana (consultar lista completa dos modelos e seus respectivos postos em ONS (2013)). Tais modelos de previsão diária, em sua maioria, consideram como dado de entrada a chuva prevista pelo modelo de previsão de tempo ETA (<http://etamodel.cptec.inpe.br/>) desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Para a maioria dos postos associados aos aproveitamentos do SIN, o PREVIVAZ é normalmente utilizado para prever as vazões a partir da segunda semana e tomando os resultados dos modelos determinísticos como tendência hidrológica. Segundo o exposto anteriormente, para a primeira semana do PMO (ou de suas revisões), a previsão de vazões é feita com base na previsão de chuva diária em um período de até 10 dias à frente. Portanto, ao se utilizar o modelo PREVIVAZ como normalmente é feito para elaboração do PMO, seria esperado que os erros fossem ainda maiores e que provavelmente não apresentassem um padrão identificável, uma vez que seriam fortemente dependentes de uma possível 'estrutura de erro' dos demais modelos determinísticos (que por sua vez dependeriam da "estrutura de erros" da chuva prevista pelo ETA). Por fim, os erros aqui apresentados podem ser entendidos como resultado exclusivo das limitações da estratégia de modelagem do PREVIVAZ.

Deve-se lembrar ainda, que, conforme apresentado na seção 3.1, o modelo adotado é, na verdade, um conjunto de possibilidades de algoritmos ou estratégias de modelagem, cuja seleção se dá pelo melhor conjunto (apresenta menor erro) de parâmetros aplicados as séries históricas. Seria essa a melhor forma de se escolher o melhor modelo? Uma pequena diferença em termos de erro médio pode significar a rejeição de uma alternativa de modelagem, porém seria ela realmente pior que a outra? BEVEN (2006a) defende a tese da equifinalidade ao considerar que superado um critério previamente estabelecido, todas as alternativas de modelagem (ou parâmetros) são igualmente bons para representar o fenômeno de interesse. Seria tal abordagem compatível com o PREVIVAZ e em suas aplicações?

Além disso, dentre as 260 semanas avaliadas, é possível que cada resultado obtido possa ser fruto de uma alternativa de modelagem. Entretanto, seria possível que em determinados postos e épocas do ano, por exemplo, um modelo seja sempre escolhido o melhor? Haveria um melhor modelo de acordo com épocas do ano, posto ou semana? Dentre as opções testadas existem aquelas que nunca são escolhidas? Essas e outras questões poderiam ser respondidas com a continuidade da pesquisa aqui iniciada e poderia trazer melhor clareza sobre os resultados obtidos pelo modelo.

Portanto, os possíveis caminhos e desdobramentos para o diagnóstico aqui realizado são muitos. A análise estatística sempre pode ser aperfeiçoada, porém entende-se que entender e identificar as principais fontes de incerteza na modelagem adotada é um bom começo para se estabelecer planos de ação que busquem, concretamente, a melhoria.

6. Conclusões e recomendações

O planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro requer um sistema de previsões eficiente e que contribua com o mínimo de erros possível. Como tal tarefa não é nada fácil, devido às limitações intrínsecas à modelagem hidrológica, lidar com as incertezas deveria ser a questão principal na aplicação de modelos hidrológicos no planejamento da operação do SIN. Tais limitações, associadas à imprevisibilidade das condições hidroclimáticas, trazem incerteza sobre a disponibilidade futura de afluências e tornam muito complexo o problema da operação de um sistema hidrotérmico, como o SIN. No desenvolvimento da estratégia de resolução deste problema, decidiu-se representar no médio prazo (até 5 anos) da melhor forma possível a variável hidrológica. Já no curto prazo (até 1 mês) a abordagem adotada foi bem mais simplificada em detrimento da representação das demais restrições e limitações (como apresentado na seção 2.1) do problema operativo. Assim, conhecer as fontes de erro e ter capacidade de aprimorar a modelagem adotada na etapa de curto prazo é primordial para se diminuir a incerteza das decisões operativas tomadas, apoiar projetos de expansão do sistema, tornar o mercado de energia mais equilibrado, entre diversos outros ganhos.

Pode-se discutir, entretanto, quais seriam os limites da modelagem hidrológica, quão preciso um modelo poderia ser. Ao longo deste trabalho diversos problemas foram discutidos em relação à aplicação e adequação de modelos hidrológicos na representação do fenômeno hidrológico. Tais problemas, extensivamente reportados na literatura, foram encontrados independentemente da formulação ou estrutura do modelo uma vez que a falta de dados adequados em qualidade e/ou quantidade, por exemplo, afeta todo e qualquer modelo, sejam eles de sistemas naturais ou não. Claro que quando se fala em sistemas naturais os problemas são sempre potencializados. A questão principal que surge é, deve-se aceitar a incapacidade da ciência em entender por completo sistemas e fenômenos naturais complexos ou tais obstáculos são exatamente a motivação das perguntas que movem a ciência?

Do ponto de vista pragmático da engenharia os esforços podem se concentrar na busca em se aumentar a confiabilidade das previsões. No caso do modelo PREVIVAZ e da programação semanal da operação do SIN, pôde-se verificar que as premissas adotadas na estrutura do modelo devem ser testadas para cada bacia e diferentes épocas do ano. As características hidroclimáticas (e, conseqüentemente, os regimes fluviais) são muito distintas ao longo das bacias do país e aplicar a mesma

estratégia de modelagem a todas não seria adequado, seja qual for a abordagem adotada.

Foi verificado que nos períodos de cheias (chuvas) o modelo errou mais em todas as bacias analisadas, sobretudo para o posto de Itá, no qual os erros estiveram em patamares muito elevados e longe de aceitáveis. Nessa bacia é também onde o regime pluviométrico é influenciado por processos atmosféricos de caráter locais e de formação muito rápidos, como complexos convectivos de mesoescala e efeitos orográficos (CAVALCANTI *et al*, 2009). Mesmo para o posto de Tucuruí, onde o regime fluvial tem pequena variabilidade (também devido às características da bacia como já discutido em 5.1) os erros, mesmo que pequenos, estiveram associados ao mesmo fenômeno.

Dessa forma, é notório que a adição de informação sobre o regime pluviométrico é imprescindível para o aprimoramento das previsões realizadas pelo PREVIVAZ. Entretanto, deve-se estar atento às questões levantadas acerca da confiabilidade de dados de previsão de chuva em traduzir, de fato, informação. Em outras palavras, dados de chuva que mais fontes de incerteza trazem, tornarão o modelo apenas mais complexo e não melhor, muito pelo contrário. Questões sobre a compatibilidade de escala, qualidade e fonte (dados de satélite e sua calibração?; estações meteorológicas?) desses dados deverão estar em pauta. Portanto, apenas com a continuidade de pesquisas no tema se avançará no seu real aprimoramento.

O modelo PREVIVAZ se vale da simples premissa de se escrever a vazão futura como uma função linear de n vazões passadas somado a um termo aleatório que depende da distribuição dos dados da série. Portanto é uma alternativa de simples aplicação que depende de poucos e simples dados de entrada. No fim apenas o valor esperado dessa previsão é considerado como informação para os modelos energéticos no problema de planejamento da operação. Adotar apenas este resultado para previsões de 6 semanas à frente dificulta a obtenção de previsões confiáveis, face as incertezas envolvidas. Mesmo para a primeira semana, grandes erros podem ocorrer nas diversas bacias que compõe o SIN, como mostrado ao longo deste estudo.

Da mesma forma, os extensivamente utilizados modelos determinísticos do tipo chuva-vazão também possuem grandes incertezas em sua aplicação. Tais questões deveriam ser sempre apresentadas e discutidas, de forma a contribuir para uso consciente dos modelos. Os dados necessários a essa estratégia de modelagem, como séries estimadas de evapotranspiração ou previsões de chuva, possuem grandes fontes incerteza, que, normalmente, não são consideradas. Como PAPPENBERGER E BEVEN (2006) colocam, por que tais incertezas não seriam adequadamente consideradas?

Computacionalmente falando trabalhar com cenários de aflúncias semanais, como o GEVAZP para vazões mensais, não seria ainda viável com a presteza necessária à programação semanal. Entretanto, outras formas de se utilizar os resultados do PREVIVAZ poderiam ser possíveis. Como foi visto neste trabalho, a partir da análise dos intervalos de confiança teórico que já são calculados pelo modelo, poder-se-ia diminuir a magnitude dos erros, principalmente aqueles de natureza recorrente; o uso de valores esperados da previsão deveria ser precedido de estudos de sensibilidade e análise das características dos IC's.

Em termos de dados pluviométricos, especialmente, a estimação das incertezas envolvidas não é uma tarefa simples. A pobre base de dados disponíveis e a dificuldade em se prever chuva em horizontes maiores do que alguns dias dificultam uma análise adequada. Entretanto, por que há tão poucos esforços no sentido de subsidiar a aquisição e disponibilização de mais dados? Considerando outros tipos de dados, como os necessários para a determinação da evapotranspiração, essa situação é ainda mais precária.

Erros muito acentuados e possivelmente associados a problemas numéricos deveriam ser investigados mais a fundo. Certamente, esta é uma constatação bastante simplificada e fruto de uma análise superficial do problema. De toda a forma, considerar a natureza aleatória na definição da estrutura do modelo PREVIVAZ mas utilizar como produto apenas o valor esperado das vazões semanais também parece inadequado. Uma das grandes vantagens em se utilizar uma abordagem estocástica como a do PREVIVAZ é se obter facilmente informação sobre a incerteza em suas previsões. Entretanto, ao se utilizar apenas o valor esperado destas previsões, os potenciais benefícios da estratégia estocástica de modelagem são perdidos. Assim, pode-se dizer que o modelo, apesar de suas limitações, poderia ser melhor explorado e utilizado de forma mais adequada.

Ressalta-se que a análise aqui empreendida já foi expandida para todos os postos do SIN e garante a possibilidade do acompanhamento da qualidade das previsões para todo o sistema, além da verificação da consistência das hipóteses aqui levantadas sobre o comportamento das bacias e os erros encontrados. O caminho natural de análise de dados pluviométricos e sua correlação com os erros encontrados deverá ser tomado o mais breve possível, como continuação deste diagnóstico. Consolidando, assim, este estudo como um sólido esforço para o aprimoramento do PREVIVAZ.

7. Bibliografia

ABBOTT, M.B., BATHURST, J.C., CUNGE, J.A., O'CONNEL, P.E., RASMUSSEN, J. "An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modelling System". **Journal of Hydrology**. n. 87, pp. 45-59, 1986a.

ABBOTT, M.B., BATHURST, J.C., CUNGE, J.A., O'CONNEL, P.E., RASMUSSEN, J. "An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System". **Journal of Hydrology**. n. 87, pp. 61-77, 1986b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil 2013**. ANA, Brasília, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas da Energia Elétrica no Brasil 3ª edição**. ANEEL, Brasília. 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em 24 de outubro de 2013, 09:15:12.

BARROSO, L.A., LINO, P., PORRUA, F. *et al.* "Cheap and Clean Energy: Can Brazil Get Away with that?", **IEEE General Meeting**, Pittsburgh – EUA, Julho de 2008.

BEVEN, K., CLOKE, H.L., "Comment on Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water". **Water Resources Research**. v. 48, W01801, 2012.

BEVEN, K. "On doing better hydrological science". **Hydrological Processes (HPToday)**. 22, p. 3549-3553, 2008.

BEVEN, K. "A Manifesto for the equifinality thesis". **Journal of Hydrology**. 320, p. 18-36, 2006a.

BEVEN, K. "On Undermining the Science?". **Hydrological Processes (HPToday)**. 20, p. 3141-3146, 2006b.

BEVEN, K. "How far can we go in distributed hydrological modeling?". **Hydrology & Earth System Sciences**. n. 5, v. 1, pp. 1-12, 2001.

BEVEN, K. "Linking parameters across scales: sub-grid parameterizations and scale dependent hydrological models". **Hydrological Processes**. n.9, pp. 507-526, 1995.

BOX, G.E.P., COX, D.R. "An Analysis of Transformations", **Journal of the Royal Statistical Society**. A127, p. 211-252, 1964.

BOX, G.E.P., JENKINS, G.M., REINSEL, G.C., **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. Wiley, 4ed., 784p., 2008.

CANEDO, P.M., "Hidrologia Superficial". In: RAMOS, F. *et al.*, **Engenharia Hidrológica**. 1ª ed. cap. 4. Rio de Janeiro. ABRH, Editora da UFRJ, 1989.

CAVALVANTI, I.F.A., FERREIRA, N.J., JUSTI, M.G.A.S., *et al.* (org), **Tempo e Clima no Brasil**. 1ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, 2009.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Modelo de Previsão de Vazões Semanais Afluentes aos Aproveitamentos Hidroelétricos do Sistema Brasileiro – Manual de Metodologia – PREVIVAZ**. Relatório Técnico 21374, DEA/CEPEL, Rio de Janeiro. 2009

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Modelo de Previsão de Vazões Semanais Aplicado ao Sistema Hidroelétrico Brasileiro – Modelo PREVIVAZ**. Relatório Técnico 125/97 CEPEL, Rio de Janeiro, Brasil. 1997.

COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS (CMB). **Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Brasil) – Relatório Final**. CMB, Cidade do Cabo – África do Sul, 2000. Disponível em <<http://www.dams.org>> Acesso em 24 de novembro de 2013, 13:15:00.

COSTA, F.S., MACEIRA, M.E.P, DAMÁZIO, J.M. "Modelos de Previsão Hidrológica Aplicados ao Planejamento da Operação do Sistema Elétrico Brasileiro", **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, n.3, p. 21-30 Jul/Set. 2007.

DINIZ, A.S.L., de SOUSA, L.C.F., ROMERO, S.P. *et al.*, "Estratégia de Representação DC da Rede Elétrica no Modelo de Despacho da Operação Energética – DESSEM". **VII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE)**. Brasília, Brasil, 2002.

DOOGE, J.C.I., "Hydrologic Models and Climate Change". **Journal of Geophysical Research**. V. 97, n.D3, p. 2677-2686, 1992.

DOOGE, J.C.I. "Hydrology in perspective". **Hydrological Sciences Journal**. v. 31, n.1. p-61-85, 1988.

DOOGE, J.C.I., **Scale Problems in Hydrology**. Tucson: University of Arizona, 63pp. 1986.

DOOGE, J.C.I., "Mathematical Models of Hydrology Series", In: Biswas, A.K. (Org), **Modelling of Water Resource Systems**. Ed. A. Biswas Montreal, Harvest House, v. 1, 1972.

EAGLESON, P.S., "The evolution of modern hydrology (from watershed to continent in 30 years)", **Advances in Water Resources**. n.17, p-3-18. 1994.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS (ELETROBRAS). **Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT**. Rio de Janeiro, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese**. EPE, Rio de Janeiro. 2013. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>> Acesso em 23 de outubro de 2013, 13:08:15.

FADIGA, F.M.J., LOPES, J.E.G., MARTINS, J.R.S. *et al.*, Modelos de Previsão de Vazões para a Bacia Incremental à UHE Itaipu. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 13, n. 2, p. 65-75, 2008.

FORTUNATO, L.A.M., NETO, T.A.A., ALBUQUERQUE, J.C.R., *et al.* **Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica**. 1ª ed. Niterói – Rio de Janeiro, EDUFF, 1990.

HIPEL, K.W., MCLEOD, A.I., **Time Series of Water Resources and Environmental Systems**. Amsterdam, Holanda, 1994.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS (IAC). **Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico**. São Paulo, Boletim científico, n. 45, 1999.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET), **Normais Climatológicas: Pluviosidade Anual Acumulada**. INMET, Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>> acesso em 13/12/2013, 10:00:00.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy Statistics: Report**. IEA, Paris – França. 2013. Disponível em: <<http://www.iea.org/statistics>> Acesso em: 23 de outubro de 2013, 13:15:48.

ITAIPU BINACIONAL (ITAIPU). **Bê-Á-Bá de Itaipu**. Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, 2012. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/publicacoes>> Acesso em 12/12/2013, 9:08:15.

JARDIM, D.L.D.D, MACEIRA, M.E.P, FALCÃO, D.M. “Stochastic Streamflow Model for Hydroelectric Systems Using Clustering Techniques”. In: **Anais do IEEE Porto Power Tech Conference**. v.3, Porto - Portugal. 2001.

KELMAN, J. “Modelos Estocásticos no gerenciamento dos recursos hídricos”. In: BARTH, F.T. *et al.* (Org.), **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. 1ª Ed., São Paulo, Nobel, p. 325-424, 1987.

KELMAN, J. Geração de Séries Sintéticas de Vazões. In: **Curso de Engenharia Hidrológica**. EPUSP, DAEE, ABRH, São Paulo, 1983. p. 1-32.

KELMAN, J. “A Stochastic Model for Daily Streamflow”. **Journal of Hydrology**. v. 47, pp. 235-249, 1980.

KITE, G.W., PIETRONIRO, A., “Remote sensing applications in hydrological modelling”. **Hydrological Sciences Journal**. v. 41, issue 4, p. 563-591, 2009.

KONIKOW, L.F., BREDEHOEFT, J.D., “Groundwater models cannot be validated”. **Advances in Water Resources**. V.15 (1), p. 75-83, 1992.

KRAJEWSKI, W.F., SMITH, J., FOUFOULA, E. “Radar hydrology: Rainfall estimation”. **Advances in Water Resources**. v. 25, pp. 1387-1394, 2002.

LIVINO, A.R.C. **Previsão de Afluências Diárias Considerando Horizonte de 1 a 7 Dias Através de uma Abordagem Estocástica – Modelo PREVIVAZH**. Dissertação de M.Sc, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro - RJ, Brasil. 2001.

MACEIRA, M.E.P., **Operação Ótima de Reservatórios com Previsão de Afluências**. Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 1989.

MACEIRA, M.E.P., DAMÁZIO, J.M., GHIRARDI A.O., DANTAS, H.M. “Periodic ARMA Models Applied to Weekly Streamflow Forecast”. **Proceedings of the 1999 IEEE Powertech**. Budapeste – Hungria. 1999.

MACEIRA, M.E.P., MERCIO, C.M.V.B. “Stochastic Streamflow Model for Hydroelectric Systems”. In: **Anais do V International Conference PMAPS – Probabilistic Methods Applied to Power Systems**. Vancouver – Canada. 1997.

MACEIRA, M.E.P., TERRY, L.A., DINIZ, A.S.L. *et al.*, “Despacho de geração Horário com Representação Detalhada de Restrições Hidráulicas”. In: **VII Seminário de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE)**, Curitiba, Brasil, 2000.

MACEIRA, M.E.P., TERRY, L.A., DAMÁZIO, J.M. *et al.* “Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System”. In: **Power Systems Computation Conference (PSCC)**. Sevilla – Espanha. 2002.

MACEIRA, M.E.P., PENNA, D.D.J., DAMÁZIO, J.M. “Geração de Cenários Sintéticos de Energia e Vazão para o Planejamento da Operação Energética”, In: **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa, Paraíba – Brasil. Novembro de 2005.

MILLY, P.C.D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., *et al.*, Stationarity Is Dead: Whiter Water Management?. **Science**. V. 319, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai**. Brasília, 128p., 2006a.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco**. Brasília, 148p., 2006b.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caderno da Região Hidrográfica do Paraná**. Brasília, 240p., 2006c.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caderno da Região Hidrográfica do Tocantins - Araguaia**. Brasília, 132p., 2006d.

MÜLLER, I.I., KRÜGER, C.M., KAVISKI, E., “Análise de Estacionariedade de Séries Hidrológicas na Bacia Incremental de Itaipu”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**. v. 3, n.4. pp. 51-71, 1998.

NORBIATO, T.S., DINIZ, A.S.L., “A Dynamic Piecewise Linear Model for DC Transmission Losses in Optimal Scheduling Problems”. **IEEE Transactions in Power Systems**. V. 26, n.2, pp.508-519, 2011.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS). **Submódulo 23.5 – Critérios para estudos hidrológicos**. ONS, 2011.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS). **Submódulo 7.3 – Programação Mensal da Operação Energética**. ONS, 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS, **Relatório Anual de Avaliação das Previsões de Vazões – 2012**, 2013. Disponível em: <<http://www.ons.org>> Acesso em: 01 de junho de 2013, 14:00:25.

ORESQUES, N., SHRADER-FRECHETTE, K., KENNETH, B., “Verification, validation and confirmation of numerical models in the earth sciences”. **Science**, v. 263, p.641-646. 1994.

PAPPENBERGER, F., BEVEN, K.J., “Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis”. **Water Resources Research**, v. 42 (5), W05302, 2006.

RAMOS, F., “Hidrologia”. In: RAMOS, F. *et al.*, **Engenharia Hidrológica**. 1ª ed. cap. 1. Rio de Janeiro. ABRH, Editora da UFRJ, 1989.

ROTUNNO FILHO, O.C. **Comparação de Dois Métodos de Otimização em Modelos Hidrológicos do Tipo Chuva-Vazão**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 1989.

SCHMUGGE, T.J., KUSTAS, W.P., RITCHIE, J.C., JACKSON, T.J., RANGO, A. “Remote sensing in hydrology”. **Advances in Water Resources**. v. 25, pp. 1367-1385, 2002.

SCHULTZ, G.A., “Remote sensing in Hydrology”. **Journal of Hydrology**. v. 100, issues 1-3, p. 239-265, 1988.

SHAH, S.M.S., O’CONNEL, P.E., HOSKING, J.R.M. “Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 1. Formulation and calibration of a stochastic rainfall field model”. **Journal of Hydrology**. v. 175, pp. 67-88, 1996a.

SHAH, S.M.S., O’CONNEL, P.E., HOSKING, J.R.M., “Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 2. Experiments with distributed and lumped models”. **Journal of Hydrology**. v. 175, pp. 89-111, 1996b.

SHUMWAY, R.H., STOFFER, D.S. **Time series Analysis and Its Applications – With R Examples**. 2ª ed. Nova Iorque – Estados Unidos da América. Springer. 2006.

SILBERSTEIN, R.P. “Hydrological models are so good, do we still need data?”. **Environmental Modelling & Software**. n. 21, pp. 1340-1352, 2006.

SILVA, E.L., **Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica**. 1ª ed. Porto Alegre – Rio Grande do Sul, Editora Sagra Luzzatto, 2001.

SINGH, V.P., WOOLHISER, D.A. “Mathematical Modeling of Watershed Hydrology”. **Journal of Hydrologic Engineering**. V.7,n.4, p. 270-292, Julho/2002.

SOUZA FILHO, E.E., STEVAUX, J.C., JABUR, I.C. **A História Quaternária do Rio Paraná**. In: VAZZOLER, A.E.A.M., AGOSTINHO, A.A., HAHN, N.S. (Org). A Planície de inundação do Alto Rio Paraná. 1ª ed., Maringá – PR. EDUEM, p.46-62, 1997.

TERRY, L.A., PEREIRA, M.V.F., SILVA, L.F.C.A., *et al.*, “Coordinating the Energy Generation of the Brazilian National Hydrothermal Electrical Generating System”. **Interfaces**. v. 16 (1), pp. 16-38, 1986.

WOOD, E.F., ROUNDY, J.K., TROY, T.J., *et al.*, “Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth’s terrestrial water”. **Water Resources Research**. v. 47, W05301, 2011.

WOOD, E.F., “Scaling, soil moisture and evapotranspiration in runoff models”. **Advances in Water Resources**. n. 17, p. 25-34, 1994.

YEVJEVICH, V., “Fluctuations of Wet and Dry Years Part 1: Research Data Assembly and Mathematical Models”. **Hydrology Papers**. Colorado State University, Fort Collins, Colorado – EUA, 1963.

YEVJEVICH, V., **Probability and Statistics in Hydrology**. 1ª ed. Fort Collins – Colorado, Water Resources Publications, 1972.

ZANDONADI, L., **As chuvas na bacia do Paraná: aspectos temporais, espaciais e rítmicos**. Dissertação M.Sc., UNESP – IGCE, Rio Claro, São Paulo, 2009.

ZANDONADI, L., As Chuvas na Bacia do Paraná: Análise Espaço-Temporal dos Anos de Padrão Habitual, Seco e Chuvoso. **Encuentro de Geógrafos de América Latina**. Peru, 2013.