

**MODELO HEURÍSTICO DE PREVISÃO DE VAZÕES NATURAIS MÉDIAS**

**SEMANAIS APLICADO À USINA DE FOZ DO AREIA**

Luiz Guilherme Ferreira Guilhon

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

Aprovada por :

---

Prof. Lúcio Guido Tápia Carpio, Ph. D.

---

Prof. Jorge Machado Damázio

---

Prof. Luiz Fernando Legey

---

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2002

GUILHON, LUIZ G. F.

Modelo de Previsão de

Vazões Naturais Médias Semanais

[Rio de Janeiro] 2002

XXVII, YYY p., 29,7 cm

(COPPE/UFRJ, M.Sc.,

Planejamento Energético, 2002)

Tese - Universidade Federal

do Rio de Janeiro, COPPE

1. Modelos Hidrológicos

2. Previsão de Vazões

3. Regressão

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o reconhecimento ao Professor Lúcio Guido Tápia Cápio, pela sua orientação, pelas críticas durante a elaboração deste trabalho e pela sincera paciência e amizade.

A Manoel Emílio e Carmelita, meus pais, pela educação e afeto que sempre souberam me proporcionar, a qual considero o legado mais precioso que os pais podem deixar a um filho.

A Lucas e Leonardo, meus filhos, e a Ana Luiza e Gustavo, meus entiados, pelo carinho enorme que têm para comigo, pelo companheirismo e pela compreensão acima de tudo durante a execução deste trabalho.

A Luiza Cristina, minha doce companheira, pelo apoio, pela compreensão, pela cumplicidade, pela luz, pela inspiração e acima de tudo pelo amor mais intenso que jamais sonhei existir.

A meus amigos, companheiros de trabalho no ONS e colegas do Setor Elétrico, pela compreensão de minhas ausências, pelo convívio enriquecedor e pelas diferentes idéias que em muito enriqueceram este trabalho de pesquisa.

Agradecimento especial aos amigos Jorge Machado Damázio e Fernanda Serra Costa pelo apoio, por estes anos de ensinamentos e principalmente por pensarem na ciência acima de tudo.

Agradeço aos professores Eduardo Alvim e Alexandre Guetter, pelos dados, a mim cedidos, sem os quais esta pesquisa dificilmente teria seguido seu curso.

Ao corpo docente do PPE, funcionários e demais colegas de turma, pela convivência agradável destes anos e pelos ensinamentos, base para minha formação como ser humano.

A todos os membros desta banca.

Resumo da tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**MODELO HEURÍSTICO DE PREVISÃO DE VAZÕES NATURAIS MÉDIAS  
SEMANAIS APLICADO À USINA DE FOZ DO AREIA**

Luiz Guilherme Ferreira Guilhon

Novembro/2002

Orientador : Lúcio Guido Tápia Cárpio

Programa : Planejamento Energético

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo de previsão de vazões naturais médias semanais, utilizando metodologia indireta considerando a informação advinda de diferentes postos fluviométricos distribuídos num certo trecho de bacia hidrográfica a montante de um aproveitamento hidrelétrico, bem como a informação de afluências passadas como variáveis de entrada e baseia-se em técnicas de regressão polinomial múltipla. Apresenta-se um estudo de caso para a usina hidrelétrica de Foz do Areia (Governador Bento Munhoz da Rocha Neto) localizada na cabeceira do rio Iguaçu, na bacia do rio Paraná e compara-se o resultado obtido com outros modelos estocásticos conhecidos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Master of Science (M.Sc.)

**HEURISTIC NATURAL WEEKLY FORECAST INFLOWS MODEL APPLY TO FOZ  
DO AREIA PLANT**

Luiz Guilherme Ferreira Guilhon

November/2002

Advisor : Lúcio Guido Tápia Cárpio

Department : Planejamento Energético

This work presents the development of a mean natural weekly forecast model using undirected considerations basin on information for different rain stations located up-stream a hydro power plant and information for the past historical data inflows, basing on multiple regression method. The study case is apply to the hydro power plant nominated Foz do Areia (Governador Bento Munhoz da Rocha Neto) locate up-stream in Iguaçu river, in Paraná basin and the results are comparing with other stochastic models.

"A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido, não na vitória"

**Mahatma Gandhi**

"Caminante no hay camino, se hace camino al andar"

**Manuel Machado**

"O homem sensato adapta-se ao mundo. O insano tenta exatamente o contrário.

Portanto, todo o progresso depende dos loucos."

**Max Weber**

## ÍNDICE DO TEXTO

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO DAS AFLUÊNCIAS .....	1
1.2 – HORIZONTES DE PREVISÃO DE VAZÕES .....	6
1.3 – O ESTADO DA ARTE EM PREVISÃO DE VAZÕES .....	9
1.4 – OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	17
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>20</b>
<b>PROPOSTA METODOLÓGICA .....</b>	<b>20</b>
2.1 - DADOS NECESSÁRIOS À APLICAÇÃO DA METODOLOGIA .....	20
2.2 - DESCRIÇÃO DA PROPOSTA METODOLÓGICA .....	24
2.3 - ALGORÍTMO .....	29
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>31</b>
<b>APLICAÇÃO PARA A USINA DE FOZ DO AREIA .....</b>	<b>31</b>
3.1 - CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA .....	31
3.2 - O APROVEITAMENTO DE FOZ DO AREIA .....	34
3.3 - ESTUDOS ANTERIORES .....	37
3.4 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A FOZ DO AREIA .....	45
3.4.1 – DADOS UTILIZADOS .....	45
3.4.2 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO .....	51
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>61</b>
<b>COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DE OUTROS MODELOS .....</b>	<b>61</b>
4.1 – APLICAÇÃO DO MODELO HEURÍSTICO EM OUTROS PERÍODOS HIDROLÓGICOS .....	61
4.2 – OUTROS MODELOS SELECIONADOS .....	64
4.2.1 – O MODELO AR(2) .....	64
4.2.2 – O MODELO PREVIVAZ .....	65
4.2.3 – O MODELO PREVIVAZH .....	68
4.3 – COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	70
4.3.1 – COMPARAÇÃO ENTRE JANEIRO E MARÇO DE 2001 .....	70
4.3.2 – COMPARAÇÃO ENTRE ABRIL DE 2000 E MARÇO DE 2001 – ANO MÉDIO .....	73
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>80</b>
<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>80</b>
5.1 – CONCLUSÕES .....	80
5.2 – RECOMENDAÇÕES .....	83
<b>REFERÊNCIAS NA INTERNET .....</b>	<b>88</b>

## CAPÍTULO 1

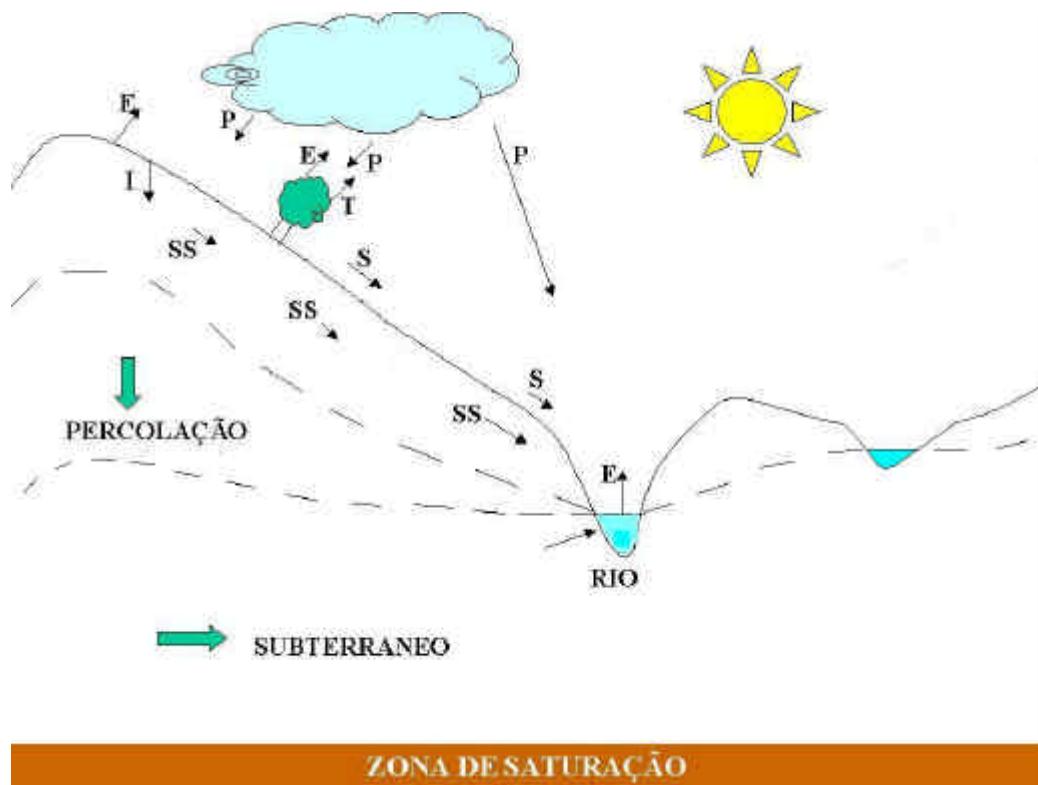
### INTRODUÇÃO

#### 1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO DAS AFLUÊNCIAS

Ao longo de várias décadas as diferentes tecnologias de modelagem vem evoluindo rapidamente, propiciando ao homem a oportunidade de ampliar seu conhecimento sobre a natureza e compreender seus processos físicos e biológicos.

Na hidrologia discute-se e aprimora-se a cada instante o conhecimento sobre os diferentes fenômenos naturais que constituem o ciclo hidrológico. Dada a enorme complexidade destes processos o homem optou por estudar as variáveis hidrológicas através de dois métodos. Um primeiro método, denominado de método prático, ou de modelo reduzido, para o qual é preparado uma réplica do meio biótico em tamanho menor onde são realizados experimentos que permitem simulações e medições dos fenômenos hidrológicos na tentativa de posteriormente extrapolar-los ao tamanho natural. Um segundo método, denominado método teórico, que tem por objetivo modelar os processos hidrológicos através de equações matemáticas que permitam simular o comportamento da natureza determinando o estado das diferentes variáveis hidrológicas a cada instante.

Para que possa ser compreendida a enorme complexidade envolvida nos processos hidrológicos passaremos a descrever de forma simplificada o ciclo hidrológico retratado no Figura 1.1 (TUCCI, 1993), onde cabe destacar que para quantificar as diversas parcelas que participam da composição da vazão num curso d'água não pode-se esquecer da precipitação direta sobre o rio e no solo da bacia, com a formação de um escoamento superficial S, um escoamento subsuperficial SS formado pela infiltração I, um lençol freático ou subterrâneo formado pela percolação, sem esquecer da evaporação sobre os rios e lagos e as retiradas de água para os mais diferentes usos como a irrigação, o abastecimento e a dessedentação de animais.



## FIGURA 1.1 – O CICLO HIDROLÓGICO - UMA VISÃO SIMPLIFICADA

Há diversos fatores intervenientes na determinação das afluências num curso d'água, os quais são descritos a seguir.

- Declividade da Bacia : É um fator que influencia diretamente na velocidade da água e por tanto na conformação da vazão em si. Esse fator sofre alterações periódicas devidas ao assoreamento e à erosão topográfica do curso d'água e das margens do rio, devendo ser reavaliado periodicamente.
- Evaporação : É importante quantificar a evaporação líquida nos reservatórios, isto é, a diferença entre a evaporação de lago atual e a evapotranspiração que havia antes da implantação do reservatório. Para tal este fator é influenciado diretamente pela vegetação da bacia e da mata ciliar, o vento, a temperatura e umidade do ar e a temperatura da superfície do lago. Quantifica-se a água

perdida para a atmosfera e após algumas décadas, seja por modificação nas normais climatológicas, seja por mudanças climáticas significativas, este fator deve ser recalculado.

- Infiltração : É um fator associado fortemente ao uso do solo, isto é, bastante dependente da umidade, permeabilidade e temperatura da superfície do rio e da profundidade do trecho impermeável, da mesma forma que a declividade, este fator também deve ser reavaliado periodicamente ou sempre que houver indícios de alteração destes parâmetros na bacia em estudo.
- Precipitação : É sem dúvida o principal fator interveniente na formação das vazões. É um fator extremamente dependente das normais climatológicas e das mudanças climáticas. É a variável que acaba imputando a característica aleatória no processo hidrológico.
- Recarga do Aqüífero : Mede a capacidade de retorno da água do lençol freático subterrâneo aos rios, lagos e lagoas. Este fator está diretamente ligado às mudanças nas camadas do solo e ao uso deste.
- Percolação : Mede a capacidade do escoamento subsuperficial se tornar aqüífero subterrâneo, ou seja, está diretamente ligado com dois fatores fundamentais que são a formação geológica do solo e o uso desse solo tanto na composição da vegetação quanto na capacidade de permeabilização do mesmo.

Os modelos hidrológicos, na tentativa de representar o comportamento dos fenômenos naturais, utilizam como um dos insumos fundamentais para sua perfeita execução as vazões naturais médias diárias, semanais ou mensais, dependendo do horizonte de estudo e da aplicação desejada. Algumas vezes se faz necessário utilizar um histórico de série de vazões naturais e outras vezes se utiliza simplesmente alguns valores previstos para períodos à frente, principalmente para analisar a operação dos reservatórios através de uma simulação ou até mesmo determinar qual deverá ser sua

operação ótima para atender uma determinada condição de armazenamento e demanda para os diferentes usos a partir dessa afluência prevista.

A reconstituição de vazões naturais, isto é, o processo de obtenção das vazões nos trechos de rio correspondentes aos barramentos das usinas hidroelétricas em condições naturais, é um processo bastante difícil, demorado, muito caro e por vezes sem sucesso. Para tal basta observarmos as inúmeras parcelas acima citadas, componentes das afluências, muitas delas mal medidas, ou até mesmo estimadas por métodos aproximativos, e outras bastante evolutivas no tempo, acompanhando as mudanças fisiográficas da bacia e o uso do solo na mesma.

Existem fundamentalmente dois processos de reconstituição de vazões naturais. O primeiro é o balanço hídrico onde consideram-se os dados de afluência e evaporação no reservatório, variação de volume e evaporação nos reservatórios a montante deste, o tempo de viagem da água entre os reservatórios de montante e o reservatório para o qual se quer calcular e dependendo do local até mesmo a propagação das vazões no trecho a montante do reservatório em questão. O segundo método é obter informações em postos fluviométricos no trecho incremental a montante do reservatório em questão e que não possuam aproveitamentos a montante, ou seja, que tenham sua vazão natural preservada e transferir essa vazão para o local do barramento em questão através de regra envolvendo relação entre áreas de drenagem. Neste segundo método são realizadas campanhas de medição nas quais são levantados pares de pontos operativos de nível e vazão, a partir dos quais são geradas com metodologias conhecidas as curvas-chave, isto é, as curvas que relacionam essas duas variáveis. A partir desse momento somente se utilizam os valores medidos de níveis e com auxílio dessas curvas-chave obtém-se as afluências nos locais desejados, até que se faça uma nova campanha de medição que sinalize a necessidade da modificação da curva-chave anteriormente obtida.

Em ambos os métodos os dados estão sujeitos a inúmeros erros, dentre os quais podem ser citados, leitura em horário diferente, danificação de equipamento,

erro de leitura, ondas e oscilações de nível, mudança de local da régua, erro na estimativa de evaporações, erro em extração de curva-chave e diferentes aproximações (FILL, 2001), muitos desses erros decorrentes da dificuldade de realizar as medições efetivamente, conforme apresentado na Figura 1.2.



**FIGURA 1.2 – MEDIÇÃO DE DESCARGA**

Por todos os fatores citados, deve-se tomar muito cuidado ao trabalhar com séries de vazões, procurando-se tomar sempre o controle sobre a qualidade dessas séries, a forma como foram obtidas e conhecer os erros inerentes ao tipo de dado e de local que se está estudando.

Para que haja evolução nos processos de reconstituição das vazões naturais deve-se ser ousado para inovar nos processos porém sem ser incoerente nas formulações matemáticas utilizadas, procurando justificá-las à luz do fenômeno hidrológico.

## 1.2 – HORIZONTES DE PREVISÃO DE VAZÕES

Dentre os vários objetivos que levam o ser humano a tentar modelar matematicamente o comportamento da natureza e neste caso mais concretamente o comportamento das vazões nos rios, encontra-se o de realizar previsões de vazões. A obtenção de previsões de vazões permite que os diferentes modelos de operação, otimização e simulação energética possam avaliar as condições operacionais das usinas hidrelétricas no futuro, propiciando subsídios para a tomada de decisões em relação à melhor forma de operar o Sistema Interligado Nacional, explorando toda sua complementariedade hidrológica e provocando ganhos sinérgicos. Estas previsões de afluências podem permitir também uma tomada de decisão no sentido de minimizar os efeitos de uma cheia excepcional, desde que feita com relativa precisão e antecedência.

As previsões de afluências servem como subsídio a outros setores usuários da água como são a irrigação, a pesca, o turismo, o lazer e a navegação. Estes setores se utilizam destas previsões de afluências para programar suas atividades à luz dos recursos hídricos disponíveis nas diferentes bacias hidrográficas.

Conforme o uso que se faça das previsões de vazões, trabalha-se com diferentes horizontes e diferentes intervalos de discretização. No Setor Elétrico, há, na verdade, três horizontes de previsões de vazões, a saber : previsões de longo prazo, previsões de médio prazo e previsões de curto e curtíssimo prazo.

Na previsão de vazões de longo prazo, a partir de um histórico de vazões naturais médias mensais e de diferentes modelagens, geralmente utilizando técnicas de hidrologia estocástica, realizam-se estimativas de vazões naturais médias mensais para os meses seguintes, normalmente abrangendo um horizonte de até um ano à frente. Conhecem-se ainda algumas metodologias, que vêm apresentando resultados

promissores, baseadas em tecnologias de Redes Neurais Nebulosas (BALLINI, 2000) ou ainda baseadas em Redes Neurais Construtivas (LUDERMIR et al, 2001 e 1999), bem como metodologias de geração de séries sintéticas de afluências futuras gerando cenários para os quais se estabelecem probabilidades de ocorrência associadas a estes. Esses resultados utilizam-se para avaliar o impacto do enchimento de novos reservatórios de hidrelétricas e subsidiar as tomadas de decisão relativas ao planejamento da operação para o horizonte anual, sinalizando o comportamento armazenamento dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional - SIN, o risco de déficit de energia para cada subsistema e as perspectivas de entrar e sair de um rationamento de energia elétrica. De um modo geral, principalmente em relação aos modelos estocásticos de previsão, observa-se que, independentemente do ponto de partida, isto é, da última vazão natural média mensal observada, após um determinado número de passos à frente a previsão se aproxima da média de longo termo - MLT. Se o ponto de partida encontra-se próximo à MLT, usualmente após alguns poucos meses à frente as previsões ficam em torno da média enquanto que se o ponto de partida encontra-se distante desta média o modelo levará mais de cinco ou seis passos à frente para ficar próximo a essa média. Este fato aproxima qualitativamente as diferentes tecnologias e os correspondentes modelos tornando as diferenças entre seus erros médios absolutos bastante reduzidos (VALENÇA, 1997) (LUDERMIR et al, 2000). Acredita-se que somente uma evolução das previsões climáticas e a incorporação de suas informações aos atuais modelos de previsão possam proporcionar ganhos qualitativos e quantitativos significativos às previsões de vazões naturais médias mensais.

No horizonte de previsão de médio prazo, a partir de um histórico de vazões naturais médias semanais e utilizando modelagem estocástica são realizadas estimativas de vazões naturais médias semanais para um horizonte de seis semanas. Estas previsões tem por objetivo subsidiar o Programa Mensal de Operação - PMO, realizada pelo ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, e suas revisões

semanais, realizadas às quartas-feiras, auxiliando no processo de tomada de decisão operativa para a otimização dos recursos naturais nos reservatórios, no uso múltiplo dos reservatórios, como navegação, controle de eventos extremos, abastecimento, turismo e lazer. Acredita-se que possa haver um ganho bastante elevado nos resultados das previsões de vazões semanais, na medida em que houver uma evolução nas tecnologias de previsão de precipitação que permita ampliar o horizonte atual de somente alguns poucos dias para duas a três semanas à frente, posteriormente incorporando essa informação aos modelos estocásticos existentes, ou até mesmo, no uso de modelos determinísticos chuva-vazão para as primeiras semanas à frente.

No horizonte de previsão de curto prazo, a partir de um histórico de vazões naturais médias diárias, em sua grande maioria baseado em dados de balanço hídrico, utilizando tecnologia determinística com modelos chuva-vazão, ou até mesmo, utilizando modelos estocásticos, são realizadas estimativas de vazões naturais médias diárias para um horizonte de até 14 dias à frente. Acredita-se que também possa haver um ganho bastante elevado nos resultados das previsões de vazões diárias, sempre que houver uma evolução nas tecnologias de previsão de precipitação que permita ampliar o horizonte atual de somente alguns poucos dias para duas a três semanas à frente, posteriormente incorporando essa informação aos modelos estocásticos existentes, ou até mesmo, no uso de modelos determinísticos chuva-vazão para as primeiras semanas à frente com discretização diária. As previsões de vazões de curto prazo, em nível diário destinam-se à programação diária da operação do Sistema Interligado Nacional - SIN, ao monitoramento e controle de eventos extremos (cheias e secas) e no auxílio à tomada de decisão para promover o uso múltiplo da água.

Além desse curto prazo em base diária existe também a possibilidade de se trabalhar com previsão de vazões em tempo real, denominado de curtíssimo prazo, no qual a programação diária pode sofrer uma correção de rota caso apareçam novos

fatores exógenos que levem a operação a caminhar em descompasso com as metas que foram estabelecidas na programação diária. Estes fatores geralmente se devem a contingências não previstas em linhas de transmissão, à sobrecarga em equipamentos, à saída forçada de alguns equipamentos de diversas naturezas bem como a restrições inesperadas que possam surgir ao longo do dia.

### **1.3 – O ESTADO DA ARTE EM PREVISÃO DE VAZÕES**

Os modelos de previsão de vazões podem ser classificados como estocásticos ao introduzir o conceito de probabilidade de ocorrência das vazões (CHOW, 1964) ou determinísticos caso o modelo não siga a lei das probabilidades (TUCCI, 1998). Podem também ser conceituais caso suas funções considerem os processos físicos ou empíricos caso sua formulação utilize funções sem nenhuma relação com os processos físicos, ficando conhecidos também como caixa-preta. Também podem ser caracterizados como modelos concentrados, quando não se leva em conta a variabilidade espacial de seus dados, ou distribuídos, quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e do tempo.

Os modelos estocásticos de previsão de vazões tomam como base o histórico de afluências para um determinado aproveitamento e a partir desse histórico, teoricamente consistido, divide-o em duas partes. Com a primeira parte estima os parâmetros para os modelos incluídos em sua família por diferentes métodos de estimação. Para a segunda parte do histórico faz uma verificação dos erros associados ao uso desses modelos com os parâmetros estimados e seleciona aquele de menor erro médio quadrático. Alguns modelos mais sofisticados não se limitam a selecionar os modelos baseando-se somente numa única verificação mas, utilizam a segunda parte do histórico também para estimar os parâmetros e verifica os erros com a primeira metade, escolhendo como melhor modelo aquele cuja média dos erros médios quadráticos nos dois processos seja menor.

Os modelos determinísticos, por sua vez, caracterizam-se por utilizarem como entrada diversas variáveis que possuem forte relação com a bacia hidrográfica e com o rio no qual se desejam realizar as previsões, tentando estabelecer um relacionamento mais direto entre as previsões de ocorrência das variáveis externas como chuva e neve, os diferentes reservatórios por onde passa a água e suas interdependências, as condições de uso do solo na bacia e a formação das afluências propriamente ditas.

No que se refere ao Estado da Arte da previsão de vazões no Brasil, para o horizonte de longo prazo, em base mensal, tradicionalmente era utilizado pela ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. e posteriormente pelo ONS o modelo PREVAZ (ELETROBRÁS, 1980) baseado em modelagem estocástica de séries temporais utilizando técnicas misturando as abordagens tradicionais com modelos autoregressivos (Box & Jenkins, 1976) e o método de Yevjevich de análise da estrutura periódica da série transformada (YEVJEVICH, 1972). O programa funcionava em computador de grande porte na Eletrobrás e a partir de agosto de 2001 passou a não funcionar ficando sem manutenção. Neste ano de 2002, o ONS contratou junto ao CEPEL o modelo PREVIVAZM que é baseado na mesma metodologia do modelo PREVIVAZ, ou seja, numa combinação de diferentes tipos de transformação, estrutura de correlação estacionária ou periódica e métodos de estimação de parâmetros. Esse modelo já foi entregue e está em fase de testes pelo ONS, devendo ser validado em 2003, passando a fazer parte das ferramentas hidrológicas utilizadas para análise de longo prazo. Também foi contratado junto à Universidade Federal de Pernambuco - UFPE um modelo de previsão de vazões mensais baseado em técnicas de Redes Neurais Construtivas (LUDERMIR, 2001) o qual deverá ser utilizado em breve pelo ONS em suas avaliações e seu desempenho deverá ser acompanhado.

Quanto aos modelos de previsão de vazões para o médio prazo, isto é, para um mês em base semanal, houve uma evolução quando partiu-se da simples desagregação do modelo PREVAZ para a utilização do PREVIVAZ pelo ONS na

Programação Mensal da Operação já a partir de maio de 2000 (ONS, 2001), pois enquanto o primeiro era mais simplificado o segundo possui uma sofisticação bastante grande na modelagem. Não se tem conhecimento de outros modelos em base semanal que façam previsões para até seis semanas à frente noutras empresas do Setor Elétrico, mas é possível que existam porém sua existência e seus resultados não teriam sido suficientemente divulgados.

Quanto aos modelos de previsão de vazões para o curto prazo, isto é, para duas semanas à frente em base diária há no Brasil inúmeras metodologias existentes, algumas já sendo aplicadas pelas empresas do Setor Elétrico e outras ainda em fase de teste para algumas bacias hidrográficas. Primeiramente podem-se citar os modelos físicos ou determinísticos baseados na relação entre chuva e vazão, conhecidos também como modelos chuva-deflúvio. Estes modelos possuem diversas formulações matemáticas todas bastante semelhantes no sentido de tentar modelar os diferentes componentes do ciclo hidrológico e a variabilidade espacial de seus possíveis inter-relacionamentos considerando parâmetros que possuem forte significado físico.

Esse modelos surgiram pela necessidade de se obter séries de vazões mais longas do que o período de existência de dados fluviométricos o permitia. As séries de precipitação eram de um modo geral bastante mais longas que as de vazões e a precipitação é um fator fundamental na formação das afluências conforme já se apresentou no ciclo hidrológico.

Os parâmetros desses modelos deverão ser calibrados primeiramente com uma parte do histórico passado de chuva equivalente média na bacia incremental e de afluências para que possam ser dimensionados da forma correta. Em seguida de posse dos parâmetros já calibrados procede-se à verificação da previsão de vazões para outro trecho menor do histórico passado, avaliando-se os erros médios quadráticos obtidos com as previsões. Caso haja necessidade de retornar ainda ao processo de calibragem para algum ajuste fino nos parâmetros deverá ser feito e em seguida deverá ser recalculado o novo erro médio quadrático até que este seja

satisfatório. A partir daí poderá se proceder a realizar previsões de afluências futuras a partir de previsões de precipitação equivalente média na bacia incremental. Existem, alguns modelos bastante conhecidos que vem sendo utilizados por algumas empresas de geração de energia elétrica.

FURNAS utiliza para a previsão de vazões em todos seus aproveitamentos o modelo SSARR - Streamflow Syntesis and Reservoir Regulation (US ARMY ENGINEER DIVISION, 1972) desenvolvido em 1972 pelo US Army Corps of Engineers que se baseia em três módulos principais, sendo estes, o módulo de precipitação-vazão numa bacia, o módulo de escoamento em rios e reservatórios e o módulo de regularização de reservatórios.

A CEMIG utiliza alguns modelos igualmente conhecidos como são o SMAP (LOPES et al, 1982), desenvolvido em 1981 por João Lopes, Benedito Braga e João Conejo, que utiliza uma estrutura simples de separação do escoamento baseada nos parâmetros do US Soil Conservation Service, sendo utilizado não só para previsão de cheias simples mas também para simular séries contínuas de previsão de afluências e para o preenchimento de falhas em séries hidrológicas. Também utiliza o modelo IPH-III, que é uma variante do modelo IPH II (baseado em algoritmo de separação do escoamento usando equação de continuidade combinada com a equação de Horton e função empírica para a percolação), adicionando-se o método de propagação da onda cinemática e de Muskingun-Cunge para os rios e método de Pulz para reservatórios.

A COPEL por sua vez utiliza em suas previsões de afluências os resultados obtidos com o modelo Sacramento Modificado, calibrado pelo SIMEPAR para União da Vitória, estação localizada a montante da usina hidrelétrica de Foz do Areia, transferindo para o local do aproveitamento por regressão linear simples.

A TRACTBEL, que opera dentre outras as usinas de Itá, Passo Fundo e Machadinho no rio Uruguai, possui para suas avaliações o modelo SMAP calibrado para aquela bacia.

O ONS por sua vez calibrou o modelo SMAP para o trecho incremental entre a usina hidrelétrica de Marimbondo e a usina hidrelétrica de Água Vermelha, com excelentes resultados nos parâmetros obtidos, mas até agora ainda não conseguiu iniciar o processo de previsão em si pois deve adequar a calibragem à Rede Telemétrica existente e contratar um sistema capaz de realizar as previsões de afluências futuras baseado em previsões de precipitação e também capaz de atualizar automaticamente as variáveis de estado do modelo. Além desse modelo de precipitação vazão o ONS calibrou para 44 locais de aproveitamentos hidrelétricos o modelo estocástico de previsão de vazões naturais médias diárias PREVIVAZH, desenvolvido em 1999 pelo CEPEL (LIVINO, 2001), baseado em previsões de vazões naturais médias semanais, desagregando-as em vazões diárias utilizando as séries sintéticas de vazões diárias geradas pelo modelo DIANA.

A CHESF assim como o ONS utilizam o modelo CPINS, baseado em rotina de propagação do modelo SSARR, para realizar as previsões de afluências no trecho incremental entre as usinas hidrelétricas de Três Marias e Sobradinho no rio São Francisco. Além disso sabe-se o ONS também vem utilizando experimentalmente a mesma rotina de propagação do modelo SSARR para o curso do rio Tocantins, realizando previsões para os trechos incrementais entre os aproveitamentos de Serra da Mesa, Cana Brava, Lajeado e Tucuruí.

Para que se possam implementar técnicas de previsão de vazões determinísticas, baseadas em modelagem chuva-vazão é necessário que haja uma boa cobertura da bacia selecionada com estações fluviométricas e pluviométricas, cujos dados deverão ser telemedidos para uso na operação do modelo.

Nesse sentido algumas iniciativas vem sendo desenvolvidas, no Instituto de Pesquisa Hidráulicas – IPH da UFRGS-RS, na aplicação de modelo chuva-vazão distribuídos, ou seja com discretização em subacias e uso de informações topológicas mais detalhadas e das características físicas mais detalhadas de cada subacia (COLLISCHONN e TUCCI, 2001).

A UNICAMP-SP desenvolveu modelo de previsão de vazões em base mensal, baseado em Redes Neurais Nebulosas e a UFPE-PE desenvolveu modelo, também em base mensal, para previsão de vazões, baseado em Redes Neurais Construtivas, constituindo-se em duas alternativas realmente promissoras de evolução tecnológica do processo de previsão de vazões.

A FCTH ligado à USP-SP também desenvolveu o SAISP - Sistema de Alerta a Inundação de São Paulo, para previsão de incremento de afluências para o próximo estágio de tempo baseado numa combinação linear de chuvas passadas nas isócronas e incrementos passados de afluências.

Sabe-se ainda que outros Agentes de Geração possuem diferentes metodologias de previsão de vazões baseadas em regressões lineares simples ou múltiplas, curvas de recessão características e previsão a sentimento utilizando a sabedoria dos hidrólogos de suas empresas, profundos conhecedores do comportamento das bacias hidrográficas nas quais situam-se seus aproveitamentos.

O MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia, através dos fundos de investimentos por ele geridos (CT-HIDRO e CT-ENERG), já iniciou, em parceria com a USP e o IPH, um projeto para a previsão de vazões utilizando variáveis climáticas como entrada de dados.

Noutros países há muitas iniciativas no sentido de aplicar diferentes metodologias que vão desde a simples relação de regressão linear múltipla até uma variada gama de modelagem chuva-vazão, passando por toda a sofisticada modelagem estocástica.

Nos Estados Unidos dentre outros aplica-se o HFAM - Hydrocomp Forecast and Analysis Modeling (página da HYDROCOMP) modelo que a partir de dados históricos de variáveis meteorológicas gera cenários de previsão de afluências futuras diárias e estima funções de distribuição de probabilidade para essas vazões futuras, sendo utilizado pela Minnesota Power and Light Company (página da MNPOWER). O National Weather Service Ohio (páginas da NOAA1 e NOAA2) utiliza para prever as

afluências, um modelo físico com uso de previsão de chuva e de neve baseado em previsão de luminosidade, temperatura do ar, uso do solo, urbanização das bacias, previsão de chuva e de evaporação, utilizando para tal o API - Antecedent Precipitation Index. A Hymet Company (página da HYMET) utiliza para previsão de vazões no rio Columbia, o modelo HMCRF - Hymet Modelo Columbia River Forecast, sendo este baseado em modelagem física baseado em previsão de chuva e temperatura. O USGS - United States Geological Survey (página da USGS) aplica o conhecido modelo SSARR (US ARMY ENGINEER DIVISION, 1972) para a bacia do rio Puyallup. Em agosto de 2001, o Georgia Water Resources Institute aplicou com sucesso o modelo ESP - Extended Streamflow Prediction Method baseado em regressão linear múltipla para previsões em base diária (GEORGAKAKOS e YAO, 2001).

No Canadá, em Vernon – British Columbia, utiliza-se para previsão da vazões (página da CWRA) afluentes ao lago de Okanagan também modelagem baseada no ESP – Extended Streamflow Prediction Method que utiliza uma variante da clássica regressão linear múltipla. A Hydro Quebec (página da HYDROSOFT) aplica um modelo chuva-vazão para a previsão de vazões, baseado numa combinação do modelo Stanford (CRAWFORD and LINDSLEY, 1966) com o modelo SSARR (US ARMY ENGINEER DIVISION, 1972). A própria Hydro Quebec aplicou com sucesso, para a bacia do rio St. Maurice metodologia de previsão de enchentes baseada em Análise de Correlação Canônica e regressão múltipla de variáveis meteorológicas e hidrológicas (OUARDA, 2000).

Na África do Sul, a cidade de Pretória utiliza (página da WRC) dois modelos chuva-vazão conhecidos como SPLASH e KOVACS para realizar as previsões de vazões no rio Orange.

A EDF vem utilizando com sucesso as imagens de satélite e radar para aprimorar os resultados de suas previsões tanto baseadas em hidrologia estocástica quanto em modelagem chuva-vazão (GARÇON, 2002). Para o rio Garonne, nos

médios Pirineus, utiliza-se para previsão de vazões utiliza-se o sistema SOPHIE que é baseado em diferentes técnicas de previsão chuva-vazão para pequenas bacias com uso de radar pluviométrico para melhoria da qualidade das previsões de precipitação (CORNNAU et VIDAL, 2002). Também na França, a Cemagref, na província de Lyon, utiliza para previsão de vazões uma modelagem simplificada de chuva-vazão onde assume-se que toda a água que cai se transforma em escoamento superficial, assumindo-se por tanto uma relação linear entre chuva e vazão o que deixa as curvas de probabilidade de chuva e de vazão paralelas à curva de Gumbel (OUARDA et al, 1997).

No rio Zaire, utiliza-se modelo estocástico autoregressivo e periódico de previsão de vazões em base mensal e semanal, com resultados promissores para um mês à frente entre 6% e 9% e para uma semana à frente entre 2% e 4,5%, possuindo este rio uma variação muito suave ao longo do tempo (WANG et al, 1994).

Na Groenlândia, na Dinamarca, no Reino Unido na Indonésia nas Filipinas e na América Central, foi aplicado com sucesso o MIKE 11 (página da DHI), que é um modelo chuva-vazão para previsão de cheias com parte hidrológica e parte hidrodinâmica.

Considerando ainda a necessidade de realizar previsões de curtíssimo prazo, em tempo real (em base horária), principalmente ligado às atividades voltadas para a operação, o controle e a previsão de cheias, podem ser destacados alguns programas computacionais e sistemas com uso de diversas tecnologias aplicadas em diferentes países do mundo (página da ROYAL SOCIETY), conforme descreve-se a continuação.

São utilizados atualmente na Tchecoslováquia o ERM - Empirical Regressive Model, na Dinamarca o chuva-vazão de nome NAMS II e o modelo NAMKAL baseado em filtro de Kalman, na Hungria o modelo chuva-vazão com uso da distribuição gamma denominado GAPI, na Irlanda o modelo chuva-vazão de nome SMAR, na Itália o modelo CLS - Constrained Linear System, na Suíça o modelo chuva vazão que usa

previsão de neve denominado SRM - Snowmelt Runoff Model e nos Estados Unidos o modelo SSARR.

Em resumo, há uma enorme variedade de modelos existentes, alguns estocásticos e outros físicos ou determinísticos, alguns mais simplificados e outros mais sofisticados, alguns com bons resultados e outros com resultados piores. Não será escopo deste trabalho uma comparação entre esses modelos pois eles trabalham em bacias hidrográficas diferentes e possuem parâmetros de entrada diferentes, sendo aplicados até em espaço de tempo distintos.

#### **1.4 – OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Algumas direções de melhoria podem ser apontadas para os métodos de previsão de longo prazo, em base mensal, no sentido de que incorporem variáveis e tendências macroclimáticas em sua modelagem para que possam ganhar em qualidade na presença de fenômenos associados ao clima. Para melhoria de previsões de vazões de médio prazo, em base semanal, deve-se trabalhar no sentido de incorporar previsões de precipitação para a primeira semana e informações sobre o surgimento de frentes frias na região sul que permitam uma maior aderência dos processos de previsão de vazões aos fenômenos climáticos e seus efeitos sobre a hidrologia. Por último, para a previsão de curto prazo de vazões, em base diária, deve-se aumentar o monitoramento dos diferentes cursos d'água de interesse para melhorar os resultados dos modelos chuva-vazão e poder aplicar modelos distribuídos, ou seja, com maior separação em pequenas subbacias, com a confiabilidade de que os dados utilizados possam produzir boas previsões de afluências.

O ONS em sua atribuição de despacho centralizado do Sistema Interligado Nacional - SIN, necessita realizar previsões de afluências em base semanal no sentido de subsidiar o Programa Mensal de Operação e suas revisões realizadas às quartas-feiras. Os valores obtidos a partir dessas previsões utilizam-se como entrada do

modelo DECOMP, modelo energético que após executado fornece a operação ótima para todos os aproveitamentos do sistema, dadas suas condições iniciais (ponto de partida dos reservatórios) e as restrições operativas às quais está sujeito o SIN.

Nessa missão de despacho centralizado pelo ONS torna-se fundamental previsões semanais, principalmente para a primeira semana, que não sofram um descolamento muito grande da realidade hidrológica pela qual atravessa o sistema, para que haja uma minimização das correções de rota na operação diária. Hoje não há nenhum modelo especializado em previsão de uma semana à frente e algumas pesquisas vêm sendo realizadas no sentido de ampliar o horizonte de previsão dos modelos chuva-vazão, como o SSARR, o SMAP e outros para horizontes maiores que somente alguns poucos dias.

Isto tudo, aliado ao fato de que trabalhar com dados semanais gera uma expectativa de conforto em relação a que a média semanal corrija os possíveis erros advindos do balanço hídrico, levou-nos a pesquisar um modelo de previsão de vazões semanais para uma semana à frente utilizando como entrada chuvas e vazões naturais médias semanais passadas.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um modelo de previsão de vazões naturais médias semanais empírico, estatístico e físico, baseado no histórico de chuva equivalente acumulada na bacia incremental a montante de um local desejado e no histórico as vazões naturais médias semanais no mesmo local.

Selecionou-se o aproveitamento de Foz do Areia, na bacia do rio Iguaçu, que opera essencialmente para atendimento ao subsistema Sul, no sentido de que os maiores erros obtidos hoje com os modelos estocásticos clássicos são para os aproveitamentos daquele subsistema.

Quanto à organização e apresentação do trabalho este divide-se em seis capítulos com o seguinte conteúdo :

capítulo 1 – Introdução – objetiva apresentar o ciclo hidrológico e suas peculiaridades, os horizontes das previsões de vazões e seu estado da arte e por último a forma de organização do trabalho;

capítulo 2 – Proposta metodológica – objetiva apresentar todos os passos da metodologia proposta de forma genérica a ser aplicada a qualquer trecho de bacia desejado;

capítulo 3 – Aplicação a Foz do Areia – objetiva contextualizar a bacia hidrográfica do rio Iguaçu, mais particularmente o trecho até Foz do Areia, apresentando o resultados obtidos na aplicação da metodologia;

capítulo 4 – Comparação com resultados de outros modelos - objetiva apresentar a comparação do modelo utilizado com outros modelos existentes apresentando os desvios em relação aos valores verificados;

capítulo 5 – Conclusões e Recomendações – objetiva apresentar as conclusões do trabalho, suas limitações e possibilidades de evolução futura.

Referências Bibliográficas – objetiva apresentar as referências bibliográficas utilizadas na elaboração do trabalho.

Referências na Internet - objetiva apresentar as páginas na Internet utilizadas e o respectivo ano no qual a consulta foi realizada.

## CAPÍTULO 2

### PROPOSTA METODOLÓGICA

#### 2.1 - DADOS NECESSÁRIOS À APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia proposta poderá ser aplicada a algumas bacias hidrográficas, mas deve-se levar em conta alguns fatores bastante importantes para que o resultado desta aplicação seja verdadeiramente satisfatório e não se venham a obter valores de previsão de afluências que possam ocasionar distorções durante seu uso.

Esta metodologia poderá ser aplicada tanto a previsão de vazões em local de barramentos, em postos fluviométricos e em outros eixos localizados em trechos de bacias hidrográficas.

Uma das considerações fundamentais no processo de calibragem inicial dos parâmetros a serem utilizados é de que mais importante que uma série longa é trabalhar-se com uma série de vazões naturais confiável, cujas informações estejam homogêneas e consistidas.

Poucas bacias possuem essas características pois apesar de nossa extensão territorial ser bastante ampla, o custo de instalação e principalmente de operação de postos fluviométricos e pluviométricos para a medição, aparentemente pode ser demais para algumas empresas, principalmente pela falta de visão da importância de se obter os dados com alta confiabilidade. As empresas, em sua grande maioria somente conseguem se conscientizar da importância do dado básico bem aferido quando descobrem o que isso poderá lhes trazer de retorno financeiro e isso na maioria das vezes é muito difícil de ser avaliado. Na realidade trabalha-se com a idéia contrária, ou seja, de que poderão haver prejuízos para a empresa, caso esta não possua as vazões e a chuva no trecho incremental a montante do barramento muito bem monitoradas e quantificadas. Poderá ser feita uma operação que desestoque indesejável de água no reservatório ou até mesmo poderá haver vertimentos não esperados por falta de uma previsão mais adequada (Figura 2.1)

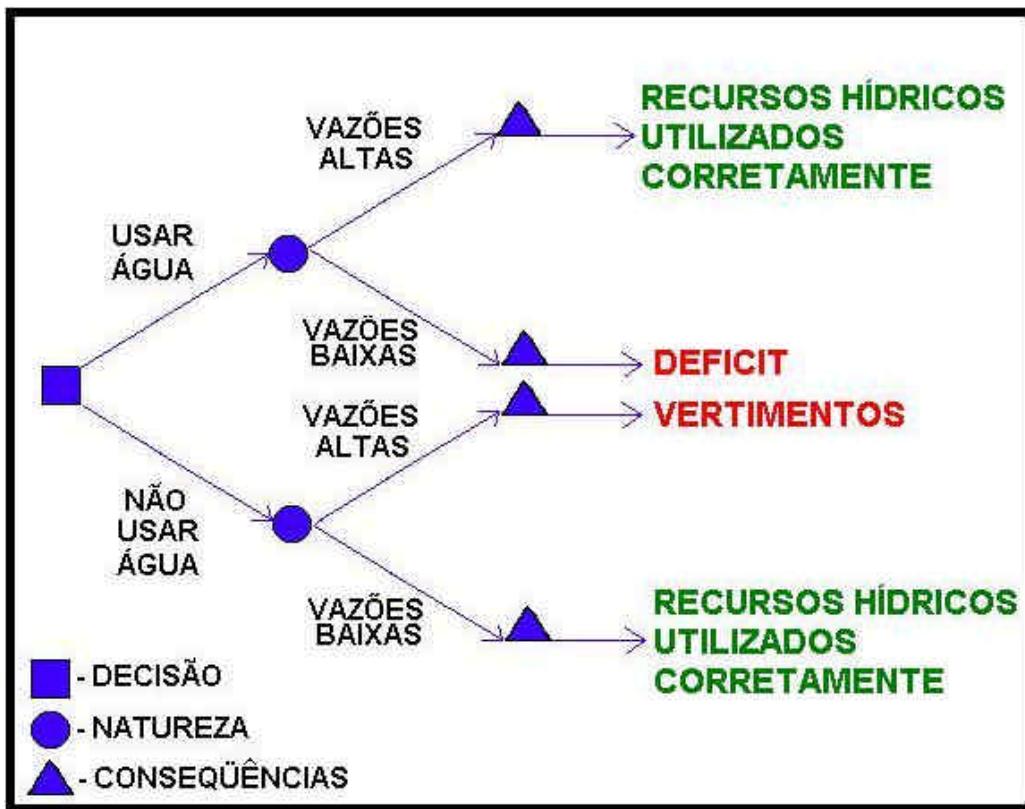


FIGURA 2.1 – ÁRVORE DE DECISÕES

Não deve-se esquecer da responsabilidade civil das empresas proprietárias no caso de rompimento de barragens ocasionado por cheias não previstas e não amortecidas e para as quais não houve uma alocação prévia de volume de espera.

Inicialmente deve-se tratar dos dados de chuva na bacia incremental a montante do barramento. Deverá existir um número de estações suficientes a dar uma cobertura adequada à bacia incremental, sendo que esse número deverá variar conforme o aproveitamento com o qual se está trabalhando e a bacia hidrográfica na qual ele está inserido. A OMM Organização Meteorológica Mundial recomenda o uso de uma tabela de densidades conforme a localização da bacia hidrográfica que resumidamente se traduz numa área de drenagem de 1875 km<sup>2</sup>/estação. Esse número de estações não deve ser utilizado que antes se faça uma análise criteriosa e detalhada do trecho de bacia que se vai estudar de modo a verificar se há uma

distribuição espacial adequada desses postos e se efetivamente eles são significativos para a constituição das vazões por serem representativos do trecho incremental a montante do barramento. Caso essa cobertura seja adequada mesmo que não atinja o critério proposto pela OMM pode-se considerar apta a passar à fase seguinte. Não deve-se esquecer que, se após o processo de calibragem do modelo deseja-se aplicá-lo para realizar previsões de afluências essas estações deverão ser telemetrizadas ou automatizadas para que a informação possa chegar em tempo hábil a que seja realizada essa previsão.

Em seguida, encontra-se a fase de coleta das informações, a qual deverá ser realizada junto aos órgãos responsáveis pela operação e manutenção dos postos pluviométricos, sejam estes empresas de geração de energia hidroelétrica, seja a Agência Nacional de Águas - ANA, responsável pela rede hidrometeorológica nacional, seja pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, responsável por receber das empresas as informação telemetrizadas correspondentes aos postos da resolução ANEEL - 396/97. Quanto maior for a densidade obtida maior deverá ser a chance de poder substituir estações cujos dados são menos significativos por outras mais importantes para a formação das vazões naturais no barramento.

Após a coleta de dados de chuva, passa-se à fase de verificação da qualidade desses dados, consistência e preenchimento de falhas. Nessa fase identificam-se as falhas nos dados recebidos e através de metodologias de regionalização conhecidas procede-se à correção e preenchimento das mesmas. Quando se tem alta confiabilidade nos dados recebidos e o número de falhas não é significativo pode-se por vezes substituir os dados falhados por informação de chuva nula sem que haja detimento no processo de calibragem do modelo.

Uma vez feita a análise e consistência dos dados de chuva procede-se à coleta análise e consistência de dados de vazões naturais médias semanais. Estes dados são obtidos a partir das médias semanais das séries diárias. Esses dados podem ser obtidos em duas fontes distintas, a saber, o Agente de Geração proprietário da usina

para a qual vai se realizar o estudo em referência ou o ONS. As metodologias utilizadas para a reconstituição dessas séries diárias e consequentemente semanais geralmente passam pela informação obtida por balanço hídrico e em alguns casos, dependendo da distribuição das estações e da confiabilidade do monitoramento hidrológico da bacia incremental a montante, são realizadas algumas verificações com dados de medições de afluências advindas de estações telemétricas ou até mesmo fluviométricas convencionais de propriedade do Agente de Geração ou da ANA.

O ideal é que seja realizada uma coleta de dados de vazões naturais médias semanais para todos os aproveitamentos hidrelétricos na bacia hidrográfica em questão, para que possam servir de subsídio no processo de consistência hidrológica e aumento de confiabilidade da série de vazões da usina selecionada. Caso existam dados com falhas na série de vazões coletada deverá se proceder a um preenchimento dessas falhas através de uma regressão linear, de uma simples relação entre áreas de drenagem com aproveitamentos a montante ou a jusante da usina em questão ou até mesmo através de uma simples interpolação na série diária.

Ao final do processo de coleta haverão séries diárias de chuva, sem a presença de falhas, para vários postos pluviométricos a montante do aproveitamento selecionado e uma série histórica de vazões naturais médias semanais, sem a presença de falhas, para o local do aproveitamento. Esses históricos deverão ser considerados em seu período comum de dados, isto é, para o período de dados no qual sejam existentes todos os dados. Caso haja necessidade de eliminar algum posto pluviométrico cujos dados estejam bastante falhados ou pouco confiáveis ou até mesmo inexistente no período desejado há de se considerar sua localização espacial e analisar sua representatividade na bacia incremental antes de sua eliminação.

## 2.2 - DESCRIÇÃO DA PROPOSTA METODOLÓGICA

O primeiro passo para a aplicação da metodologia consiste em obter uma série de chuva equivalente diária para a bacia incremental a partir dos históricos diários dos postos selecionados.

Para tal existem algumas metodologias bastante conhecidas como são o método da média aritmética simples, o método de Thiessen, que divide a área da bacia incremental em subáreas ou até mesmo o método das isoietas, que leva em consideração o relevo da bacia incremental (TUCCI, 1993).

O método sugerido é baseado na interpolação inversa da distância (SHEPARD, 1968), com o uso do software SURFER onde primeiramente deve ser lançado o contorno da bacia incremental a montante, dividindo-se o espaço total em pequenos grids conforme o número total de estações a distribuição espacial das mesmas tal que num grid fique no máximo uma estação. Em seguida aplica-se como entrada arquivos contendo as coordenadas geográficas (latitude, longitude) e os dados diários de cada estação pluviométrica selecionada na bacia incremental, fazendo uma interpolação pelo método do inverso do quadrado da distância e multiplicando-se pela área da bacia incremental presente no grid respectivo, calculando-se o volume total de precipitação do seguinte modo.

$$P_{ref}^j = \sum_{i=1}^n w_i x P_i \quad (2.1)$$

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}} \quad (2.2)$$

Onde :  $P_{ref}^j$  - precipitação equivalente interpolada para o grid j em mm.

$P_i$  - precipitação do posto pluviométrico i em mm.

n - número de estações na vizinhança do grid i.

p - número inteiro indicando a potência de elevação da interpolação (no caso optou-se pelo inverso do quadrado da distância, isto é, p=2) .

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2.3)$$

Onde (x,y) são as coordenadas das estações fluviométricas que se querem interpolar e (xi, yi) são as coordenadas das estações nos grids vizinhos utilizadas na interpolação.

A partir de então, multiplica-se essa precipitação de referência  $P_{ref}^j$  para cada grid j pela área da bacia incremental contida nesse grid obtendo-se o volume total de precipitação na bacia incremental.

$$V = \sum_{j=1}^m A_j x P_{ref}^j \quad (2.4)$$

Onde :  $A_j$  - área da bacia incremental contida no grid j em mm<sup>2</sup>.

$V$  - volume total de precipitação da bacia incremental em mm<sup>3</sup>.

$P_{ref}^j$  - - precipitação equivalente interpolada para o grid j em mm.

Por último calcula-se a precipitação equivalente total da bacia incremental como sendo o volume total de precipitação na bacia incremental dividido pela área total da bacia incremental.

$$P_{equ} = \frac{V}{A} \quad (2.5)$$

Onde :  $P_{equ}$

$A$  - área total da bacia incremental em  $\text{mm}^2$ .

$V$  - volume total de precipitação da bacia incremental em  $\text{mm}^3$ .

Outras opções poderiam ter sido utilizadas dentro do SURFER como são a suavização, ou smoothing, para que o processo determinação gradeamento possa incorporar fatores de incerteza associado aos dados.

Este cálculo é realizado para cada dia do histórico de precipitações de modo a que teremos então um histórico diário de precipitações equivalentes para a bacia incremental com valores  $P_{equi}(i,j)$  para cada dia  $j$  da semana  $i$ .

O próximo passo é transformar esses dados para uma precipitação semanal posto que deverá se trabalhar com valores semanais de chuva e vazão, de modo que obtém-se uma série histórica de vazões semanais equivalentes.

$$PS_i = \sum_{j=1}^7 P_{equi}(i,j) \quad (2.6)$$

Onde :  $j$  - são os dias da semana em questão.

$PS_i$  - é a precipitação acumulada na semana  $i$  em mm.

$P_{equi}(i,j)$  - é a precipitação equivalente para a bacia incremental no dia  $j$  da semana  $i$ .

O passo seguinte consiste em determinar a significância das precipitações semanais nas afluências da semana que se deseja prever. Esta pode ser denominada a primeira fase da calibragem. Calculam-se as regressões lineares das precipitações das seis semanas anteriores e das vazões naturais médias semanais das seis semanas anteriores com a vazão da semana seguinte, que se deseja prever.

Calcula-se a correlação entre esses valores passados de precipitações acumuladas semanais e vazões naturais médias semanais com a vazão natural média da próxima semana, sinalizando a dependência entre as variáveis (DOWNLING, 1998), ou seja o quanto uma variação na variável x afetará a variável y.

$$y = m x + b \quad (2.7)$$

onde :  $y$  - vazão semanal na semana  $t$ .

$x$  - representa as chuvas acumuladas nas semanas  $t-1, \dots, t-6$  e as vazões naturais médias nas semanas  $t-1, \dots, t-6$  e seus respectivos quadrados.

Calculam-se os valores de  $m$  (coeficiente angular) e  $b$  (intercepto vertical) que

$$\text{Min} \sum (y_i - (m x_i + b))^2 \quad (2.8)$$

minimizem o erro médio quadrático, isto é:

Denominam-se de estimadores de  $m$  e  $b$  as variáveis  $m_1$  e  $b_1$  tal que :

$$m_1 = \frac{(\bar{x.y} - \bar{x}\bar{y})}{(\bar{x^2} - \bar{x}^2)} \quad (2.9)$$

$$b_1 = \bar{y} - m_1 \bar{x} \quad (2.10)$$

Calcula-se para cada par de vetores  $x$  e  $y$  descritos na equação 2.7 o coeficiente de correlação  $r$ , que mede o quanto o conhecimento de valores de  $x$  ajudará a estimar  $y$  :

$$r^2 = \frac{(\bar{x.y} - \bar{x}\bar{y})}{(\bar{x^2} - \bar{x}^2)(\bar{y^2} - \bar{y}^2)} \quad (2.11)$$

Quanto mais próximo à unidade seja este coeficiente mais representativo de  $y$  será a variável  $x$  e por tanto mais dependente de  $x$  será esse  $y$  a ser estimado. Podem se estabelecer critérios mais rígidos, como por exemplo, admitir somente valores de  $r$  superiores a 0,7 ou 0,8 mas, neste caso, tratando-se de varáveis aleatórias, com todas as imprecisões intrínsecas à modelagem hidrológica admitiremos um coeficiente de correlação de até 0,5 como significativo.

Eliminam-se dessa forma os vetores  $x$  que sejam menos significativos, ou seja, todos aqueles cujos coeficientes de correlação sejam inferiores a 0,2 no caso de chuvas passadas e 0,7 no caso de vazões passadas, observando que utiliza-se um valor baixo de determinação pois a chuva é bastante dispersa e não possui uma continuidade como a vazão e desse modo a tolerância deve ser bem maior.

Em seguida passa-se ao cálculo inicial dos pesos de cada vetor  $x$  significativo para o cálculo de  $y$  através de uma regressão linear múltipla calculando os coeficientes angulares  $B_1, B_2, \dots, B_m$  para os  $m-1$  vetores selecionados.

$$y = B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + \dots + B_{m-1} \cdot x_{m-1} + B_m + \varepsilon \quad (2.12)$$

Estes coeficientes angulares  $B_1$  até  $B_m$  são obtidos fixando-se os valores de  $x$  dos demais vetores e utilizando estimativas semelhantes ao processo descrito nas equações 2.8 a 2.10, sendo que  $\varepsilon$ , é um erro aleatório que representa todos os possíveis fatores que podem afetar  $y$  independentemente da ocorrência de valores de  $x$ . Esse erro deverá ser independente dos vetores  $x$  e dessa forma comporta-se como uma distribuição normal com média zero e variância desconhecida.

Para o cálculo dos coeficientes angulares de regressão múltipla  $B_1$  até  $B_m$  poderá ser utilizado o software de planilha eletrônica Excel, que em sua função PROJ.LIN permite o cálculo desses parâmetros, utilizando para tal um determinado número de semanas do histórico. Esses coeficientes, uma vez que a chuva já foi multiplicada por um valor tal que a coloque no mesmo patamar de valor da vazão

mesmo que em unidades distintas, não devem ser inferiores a 0,75 para as variáveis de vazão e 0,5 para as variáveis de chuva.

Esses coeficientes deverão ser utilizados para as primeiras previsões podendo ainda passar por algum ajuste a partir dos valores emanais verificados nas últimas três semanas.

Realizam-se as previsões e sempre que tiver transcorrido uma nova semana, incorporam-se seus dados de chuva acumulada semanal e vazão natural média semanal e calculam-se automaticamente os novos coeficientes  $B_1$  até  $B_m$  que atenda às últimas semanas e dessa maneira procede-se novamente à realização de uma nova previsão de vazões para a próxima semana.

### **2.3 - ALGORÍTMO**

Passo 1 : Coleta, consistência e preenchimento de falhas nos dados de precipitação para os postos pluviométricos a montante do aproveitamento.

Passo 2 : Coleta, consistência e preenchimento de falhas nos dados de vazões naturais médias semanais para o aproveitamento.

Passo 3 : Cálculo da precipitação média equivalente diária na bacia incremental a montante do aproveitamento pelo método de Shepard (utilizando o software SURFER).

Passo 4 : Cálculo da precipitação acumulada equivalente semanal para a bacia incremental ao aproveitamento.

Passo 5 : Cálculo dos coeficientes de correlação linear, quadrática e se necessário cúbica entre a vazão natural da semana e as chuvas das seis últimas semanas e seus quadrados, as vazões naturais médias das seis últimas semanas e seus quadrados.

Passo 6 : Descarte dos vetores das variáveis cujos coeficientes de correlação com y (vazão da semana seguinte) sejam inferiores a 0,2 para chuvas passadas (ou seja, 20%) e inferior a 0,7 para vazões passadas (ou seja, 70%).

Passo 7 : Cálculo dos coeficientes angulares  $B_1$  até  $B_m$  para os  $m-1$  vetores significativos selecionados no Passo 6, aplicando-se ao histórico dos últimos anos.

Passo 8 : Ajuste fino dos coeficientes angulares  $B_1$  até  $B_m$  aplicando-se às últimas semanas.

Passo 9 : Previsão para a próxima semana utilizando os coeficientes calculados.

Passo 10 : Após transcorrida a semana que se está prevendo deve-se calcular mais um valor de vazão média semanal e mais um valor de precipitação acumulada equivalente semanal para a bacia incremental ao aproveitamento.

Passo 11 : Retornar ao Passo 8 para ajustar novamente os coeficientes angulares.

## CAPÍTULO 3

### APLICAÇÃO PARA A USINA DE FOZ DO AREIA

#### 3.1 - CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

O rio Iguaçu é um dos principais afluentes do rio Paraná. Desde suas nascentes, ao pé da serra do mar, próximas à cidade de Curitiba, até sua foz, no rio Paraná, possui uma área de drenagem total de 70.799 km<sup>2</sup>, dos quais mais de 80% em território paranaense e o restante no Estado de Santa Catarina, localizada entre os paralelos 25°00' e 27°00' de latitude sul e os meridianos 54° 30'e 49°00'de longitude oeste, abrangendo um total de 98 afluentes, sendo ainda hoje a principal fonte de abastecimento de água da região metropolitana de Curitiba. Possui 910 km de meandros, cascatas, corredeiras e remansos que formam uma extraordinária e diversificada paisagem, passando por campos e capões, floresta araucária e floresta estacional semidecidual.

A bacia do rio Iguaçu foi utilizado ao longo do histórico do Paraná como meio de transporte e fonte de água para abastecimento, produção de alimentos e energia, tendo sido suas densas florestas destruídas para exploração de madeira, permanecendo de pé menos de 1% da original floresta ombrófila e estacional semidecidual.

Hoje, no trecho em que recebe a contribuição do rio Barigüi, carrega grande parte do esgoto da cidade de Curitiba e dos municípios do leste metropolitano (URBAN, 2000), sendo que além do mais as fábricas costumam utilizá-lo como área de despejo, numa sucessão de desastres ambientais cotidianos que castigam o Parque Nacional do Iguaçu, onde uma estrada ilegal contribui para o aumento da degradação da floresta e do rio.

O relevo da bacia é bastante irregular, e uma característica interessante do rio Iguaçu é a existência, no seu trecho superior, de vales amplos e de baixa declividade, proporcionando boas possibilidades de armazenamento, seguindo-se no seu trecho

médio e inferior, vales rochosos estreitos e declividades mais acentuadas, com quedas concentradas, propiciando bons locais para barramento. Estes aspectos tornam o rio Iguaçu particularmente atraente para a implantação de aproveitamentos hidrelétricos.

Na usina hidroelétrica de Foz do Areia, no trecho médio do rio Iguaçu, a área de drenagem da bacia incremental a montante do aproveitamento é de aproximadamente 29.900 km<sup>2</sup> e a topografia caracteriza-se pela existência de um vale encaixado e profundo, onde a largura do rio é pequena, variando de 80m a 150m, e os taludes das margens são bastante íngremes.

Na UHE Foz do Areia, a geologia constitui-se de um substrato de rochas basálticas recoberto por solos coluviais e residuais. O local dista aproximadamente 80 km de Porto Vitória, onde o rio Iguaçu secciona a escarpa da Serra Geral e penetra na região das rochas basálticas. Desse modo, o reservatório está situado sobre basaltos até este local e sobre arenitos finos da formação Botucatu na maior parte do trecho a montante.

As condições climáticas da Região Sul do Brasil, que inclui a bacia do rio Iguaçu, são de um modo geral determinadas pelo movimento relativo das massas de ar que circulam sobre a região.

Esses movimentos são influenciados pela posição relativa dos anti-ciclones sobre os oceanos Pacífico e Atlântico e do centro de baixa pressão localizado sobre o continente. Esses centros variam de posição e intensidade ao longo do ano de maneira irregular, acarretando como consequência uma distribuição errática ao longo do ano das principais características climáticas da região, tais como condições de temperatura, pressão, umidade do ar e precipitação. A temperatura média anual é da ordem de 16° C em União da Vitória. A evaporação e evapotranspiração também devem apresentar variações apreciáveis. A falta de observações diretas limita o conhecimento desses parâmetros. Os poucos dados disponíveis indicam, para a bacia do rio Iguaçu, a ocorrência de valores entre 750 mm ano<sup>-1</sup> e 800 mm ano<sup>-1</sup> para

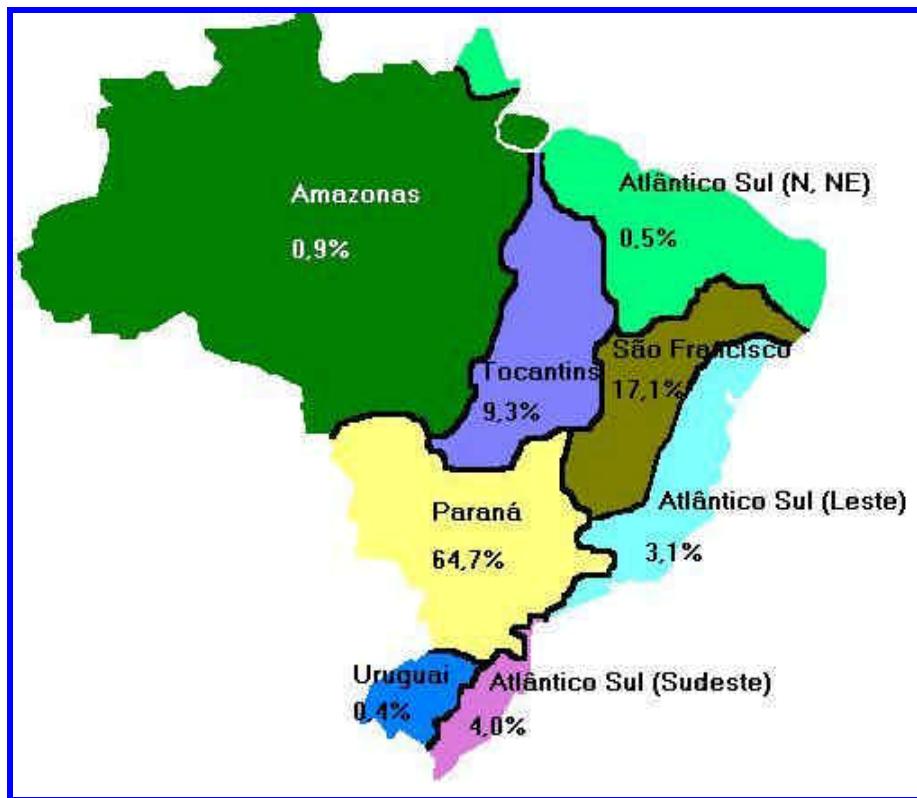
evaporação do lago e evapotranspiração média da ordem de 800 mm ano<sup>-1</sup> (Copel, 1995).

A precipitação pluvial é a variável hidrológica melhor conhecida na bacia, sendo muito importante a contribuição pluviométrica na bacia incremental entre União da Vitória e Foz do Areia. Conhecidamente a bacia do Iguaçu (GÜETTER et al, 2000) possui uma correlação direta com o fenômeno macroclimático denominado "El Niño", ocasionando aumento nas afluências no inverno (junho e julho) e na primavera (novembro) e correlação inversa com o fenômeno "La Niña", ocasionando baixas afluências na primavera (outubro e novembro).

Outro fator que deve ser considerado importante na bacia do Iguaçu é a recarga do rio vinda do lençol freático subterrâneo, e assim sendo pode-se estimar (GÜETTER et al, 2000) que essa recarga seja máxima quando o solo estiver próximo da saturação e que a partir de 70% de armazenamento do lençol ocorre a recarga dos aquíferos que corresponde por sua vez a cerca de 10% do escoamento superficial, vindo a ocorrer na época de maior deflúvio, ou seja, de junho a outubro.

A precipitação média anual sobre a bacia do rio Iguaçu é da ordem de 1.500 mm/ano, e a distribuição da chuva é bastante irregular no tempo e no espaço, consequentemente não há um período úmido bem definido, intensificando a característica aleatória desta variável.

Em termos energéticos o rio Iguaçu faz parte da bacia do rio Paraná, do qual é afluente direto, sendo esta bacia do Paraná responsável por cerca de 65% da potência total hidrelétrica instalada no Sistema Interligado Nacional – SIN conforme apresenta-se na Figura 3.1.



**FIGURA 3.1 – POTENCIAL HIDROELÉTRICO BRASILEIRO EM OPERAÇÃO EM DEZEMBRO DE 2001 - FONTE : SIPOT – ELETROBRÁS.**

### **3.2 – O APROVEITAMENTO DE FOZ DO AREIA**

A Usina de Foz do Areia, conhecida também por “Usina Governador Bento Munhoz da Rocha Netto” (COPEL, 1995), possui uma potência instalada de 1.674 MW, sendo quatro turbinas tipo Francis de 418,5 MW cada uma, com possibilidade de ampliação para um total de 2.509 MW, e está localizada no rio Iguaçu, no Estado do Paraná, na divisa dos municípios de Bituruna e Pinhão, a 240 km ao sudoeste de Curitiba. As coordenadas geográficas são, aproximadamente, 26° de latitude sul e 51°37' de longitude oeste. A usina dista, em linha reta, cerca de 250 km da cidade de Curitiba, em direção sudoeste e situa-se a 5 km a jusante da foz do rio Areia, sendo a região ocupada por uma sucessão de montanhas que estreitavam o leito do rio

formando paredes bastante íngremes, com rochedos verticais e platôs intermediários horizontais, conforme apresentado na Figura 3.2.



**FIGURA 3.2 – USINA GOVERNADOR BENTO MUNHOZ DA ROCHA NETO – FOZ DO AREIA**

A topografia da região permitiu o estudo de várias alternativas para o local da barragem concluindo-se pelo local selecionado como melhor opção. O aproveitamento compreende uma barragem de enrocamento com face de concreto com uma altura máxima de 160 m, comprimento da crista de 828 m, estrutura de tomada d'água com sete comportas e um vertedouro tipo calha dotado de quatro comportas radiais de 14,50 m de largura por 18,5 m de altura cada e com uma capacidade de descarga máxima de  $11000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

O reservatório, criado pela barragem, tem uma área inundada de  $153 \text{ km}^2$  no nível correspondente à cota 744 m. O volume total do reservatório é de  $6066 \times 10^6 \text{ m}^3$ , dos quais, com uma depleção de 47 m, resulta um volume útil da ordem de  $4300 \times 10^6 \text{ m}^3$ , para regularizar 59% da vazão média de longo termo ( $544 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Outras características do reservatório (MINE, 2000) são apresentadas na Tabela 3.1.

**TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO RESERVATÓRIO DE FOZ DO AREIA**

<b>Tipo de Informação</b>	<b>Valor</b>
N.A. Máximo Normal Operativo	742 m
N.A. Máximo Normal (projeto)	744 m
N.A. Mínimo Normal Operativo	704 m
N.A. Mínimo Normal Absoluto Operativo	697 m
N.A. Máximo Excepcional (enchente)	745 m
Volume Máximo Normal (projeto)	$6,10 \times 10^9 \text{ m}^3$
Volume Útil Máximo Normal (projeto)	$4,30 \times 10^9 \text{ m}^3$
Área no N.A. Máximo Normal (projeto)	153 km <sup>2</sup>
Área no N.A. Máximo Excepcional (enchente)	167 km <sup>2</sup>
Área desapropriada	156 km <sup>2</sup>
Cota de desapropriação urbana	744,5 m
Cota de desapropriação rural	745,0 m
Extensão no N.A. Máx. Excep. (enchente)	105 km

A energia gerada em Foz do Areia é despachada no subsistema Sul que encontra-se interligado ao subsistema Sudeste através de grandes troncos de transmissão. Quando este subsistema Sul encontra-se totalmente atendido e seu custo é mais baixo que o custo da energia no subsistema Sudeste/Centro-Oeste, essa energia do subsistema Sul poderá ser exportada para esse outro subsistema Sudeste/Centro-Oeste. A operação interligada da usina é muito importante para o Setor Elétrico, tendo em vista que as marcantes diferenças do regime hidrológico dos subsistemas Sul e Sudeste/Centro-Oeste proporcionam consideráveis ganhos de energia ao sistema.

A energia firme em Foz do Areia é de aproximadamente 4707 GWh (ELETROBRÁS, 1999), enquanto que sua energia média situa-se em quase 5780 GWh.

### 3.3 - ESTUDOS ANTERIORES

O rio Iguaçu tem seu curso subdividido em dois trechos de acordo com a sua declividade. O trecho superior do rio, que nasce dentro da Região Metropolitana de Curitiba, até a proximidade de Porto Vitória, tem uma declividade baixa, com grandes planícies de inundação. No trecho a jusante de Porto Vitória, seu curso apresenta grande declividade e vales encaixados, aproveitado por diversas usinas hidrelétricas, sendo a primeira a usina de Foz do Areia.

Existe a tendência da população em ocupar a planície de inundação durante anos de pequenas enchentes, criando um potencial risco de prejuízos para o futuro, quando ocorrerem enchentes mais críticas. Na bacia do rio Iguaçu, observaram-se enchentes pequenas ou médias por um período razoavelmente longo (Tucci e Villanueva, 1997). Essa baixa freqüência induziu a população a ocupar a área de risco da planície de inundação.

As cidades de União da Vitória e Porto União encontram-se localizadas às margens do rio Iguaçu, cerca de 106 km e 78 km a montante do aproveitamento hidrelétrico de Foz do Areia, respectivamente. Estas cidades estão sujeitas a freqüentes enchentes naturais que podem ter sido agravadas com a construção da usina, a jusante das cidades, que entrou em operação no início da década de 80, criando um lago, que influência os níveis de escoamento por um longo trecho a montante. Este fato conduziu à realização de diversos estudos, buscando uma solução satisfatória para o problema. A seguir faz-se um breve histórico dos estudos realizados.

Em janeiro de 1975, a Milder-Kaiser Engenharia S/A apresentou, para a Companhia Paranaense de Energia – COPEL, um memorando de projeto (MILDER-KAISER, 1975), com os resultados dos estudos elaborados para determinar os efeitos do reservatório de Foz do Areia nas condições de enchentes existentes em União da Vitória. O estudo considerou a maior cheia histórica registrada em União da Vitória,

antes da implantação do reservatório, que ocorreu em outubro de 1935, quando a régua acusou uma elevação de 747,61 m.

A influência do reservatório foi estimada com base em estudos de remanso, para o qual foram levantadas e selecionadas algumas seções transversais entre União da Vitória e Foz do Areia. O nível de água máximo normal operativo do reservatório foi 744 m. O estudo considerou tanto as condições naturais do rio como as condições após o término da construção da barragem.

Para os períodos de recorrência de 100 a 1000 anos, as curvas de remanso mostraram o mesmo nível de água para as duas condições. Para a cheia decamilenar a influência do reservatório foi de 30 cm com relação às condições naturais do rio. Portanto, o estudo concluiu que a construção do aproveitamento de Foz do Areia, não teria efeitos significativos sobre os níveis de água em União da Vitória durante as cheias, propondo-se obras de proteção incluindo diques de terra e estações de bombeamento, estabelecendo a extensão dos diques e custos estimados de todas as obras. Estas medidas estruturais para o controle de cheias foram posteriormente abandonadas.

Em janeiro de 1976 a mesma empresa apresentou um suplemento ao memorando do projeto anterior (MILDER-KAISER, 1976), tendo incluído no estudo a enchente ocorrida em outubro de 1975 e chegando-se às seguintes conclusões:

- i) durante condições de cheia o reservatório de Foz do Areia teria pouco efeito sobre o nível de cheia em União da Vitória e para uma cheia similar à de 1935 (com tempo de retorno de cerca de 170 anos) o acréscimo no nível seria de apenas 33 cm;
- ii) o efeito do reservatório quando da ocorrência da vazão decamilenar de 6200 m<sup>3</sup>/s seria levemente mais adverso; nesta condição, o nível da régua de União da Vitória para as condições naturais do rio indicou uma elevação de 749,73 m e após a construção do reservatório indicou 750,52 m, correspondendo a uma diferença de 79 cm.

O relatório afirma que tais níveis de cheia somente aconteceriam após a implantação do reservatório, em caso de ocorrência dos seguintes eventos não usuais:

- i) cheia decamilenar;
- ii) casa de força de Foz do Areia fora de operação e toda a descarga através do vertedouro;
- iii) operação imprópria das comportas do vertedouro de maneira que o nível do reservatório esteja na cota 744 m, quando o pico da cheia atingir o reservatório (normalmente o nível do reservatório seria rebaixado antes que o pico da cheia o atingisse).

O memorando termina concluindo que a probabilidade de ocorrência destes três eventos simultaneamente é improvável, e desta forma, os níveis acima, para a cheia decamilenar, passariam a ser de interesse puramente estatístico.

A diferença entre os dois estudos realizados pela Milder Kaiser Engenharia S/A está na extrapolação superior da curva chave (acima de  $1500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) em União da Vitória, uma vez que, os dois estudos usaram diferentes coeficientes de Manning, o que resultou numa modificação da influência do reservatório de 33 cm para 79 cm para a vazão decamilenar.

Em agosto de 1980 a Superintendência de Estudos e Projetos da Copel - SPE apresentou o relatório (SUGAI, 1980) de um estudo sobre a influência do reservatório de Foz do Areia sobre os níveis de enchentes em União da Vitória. Foram calculados os perfis da superfície livre do rio entre o aproveitamento de Foz do Areia e União da Vitória, para as condições naturais do rio e para as condições atuais, agora com o reservatório já implantado, para os níveis de água junto à barragem nas cotas 740 m, 742 m e 744 m. Este estudo procurou atualizar os anteriores tanto quanto aos dados bem como os métodos, uma vez que, considera a variabilidade da vazão de contribuição entre Porto Vitória e Foz do Areia.

Anterior ao relatório apresentado, a SPE realizou um estudo preliminar, não publicado, que mostrava que o nível de água ultrapassaria a cota 745 m (limite de desapropriação) em média a cada 1,5 anos com o reservatório operando na cota máxima, 744 m, enquanto sob condições naturais essa cota seria ultrapassada apenas a cada 3 anos em média. O mesmo estudo também mostrou que, se o nível de água em Foz do Areia for mantido na cota 742 m, os efeitos do reservatório sobre a freqüência de níveis de água superiores à cota 745 m em União da Vitória não seriam significativos para efeitos práticos.

As conclusões do estudo apresentado em 1980 foram as seguintes:

- i) com o reservatório de Foz do Areia operando na cota 740 m ou abaixo, não há qualquer influência sobre os níveis de água em União da Vitória, para as cheias analisadas;
- ii) mantendo-se como limite superior do nível de água em Foz do Areia a cota 742 m, os efeitos do reservatório sobre os níveis de água em União da Vitória deverão ser menores que 10 cm; este valor pode ser considerado desprezível, além de se situar abaixo da precisão com que possam ser determinadas as grandezas físicas envolvidas no fenômeno;
- iii) para um nível de água na cota 744 m junto à barragem de Foz do Areia, já se nota uma sensível influência do remanso do reservatório, traduzindo-se em um acréscimo variável, de acordo com as características da cheia, de 20 cm a 80 cm na cota da lâmina de água em União da Vitória, com agravamento mais sério nas cheias de freqüência maior; contudo o efeito mais decisivo para este caso consiste em que a cota 744,5 m, limite previsto para a desapropriação e início da zona urbana da cidade, é ultrapassada com freqüência bem maior; por exemplo, a cheia de 2 anos de recorrência e a enchente de maio de 1979, que não ultrapassariam esta cota em

condições naturais ou para níveis iguais ou inferiores a 742 m em Foz do Areia, atingiriam neste caso as cotas 745,40 m e 745,65 m respectivamente.

Em resumo, o estudo concluiu que *“a Usina Hidrelétrica de Foz do Areia só poderá efetivamente operar em seu nível máximo normal (744 m) se qualquer enchente, mesmo de recorrência baixa, puder ser prevista com suficiente antecedência, para permitir, com toda segurança, que o nível do reservatório possa ser abaixado em pelo menos dois metros antes do pico da cheia”*. O relatório ainda afirma que: *“enquanto a possibilidade desta previsão não estiver plenamente comprovada, o nível máximo operacional não deverá ultrapassar a cota 742 m”* (Sugai, 1980).

O relatório recomendou iniciar a operação da usina na cota máxima em 740 m e passar lentamente para níveis mais altos até o valor limite de 742 m, efetuando-se sempre medições regulares de nível de água ao longo do reservatório, para confirmar empiricamente os cálculos efetuados. Qualquer discrepância, entre níveis medidos e calculados, deve ser cuidadosamente investigada antes de novo incremento no nível operacional da usina. O relatório comenta que estas recomendações *“não serão capazes de evitar as enchentes em União da Vitória, tais como ocorreram no passado, mas apenas impedir um agravamento de suas consequências pelo reservatório de Foz do Areia”*.

Em maio de 1985 a SPE apresentou os resultados de uma revisão do estudo anterior, incluindo a cheia de 1983 que foi o evento mais severo ocorrido na região (SUGAI et al. 1985). Neste estudo foram revistas as curvas de descarga parametrizadas em União da Vitória e Porto Vitória com base em novas medições e do cálculo do remanso no trecho Foz do Areia a União da Vitória, que permitiu determinar o nível de água nestes locais nas diferentes situações de vazão e de nível do reservatório. Determinaram-se ainda os níveis que seriam observados durante várias cheias históricas e em algumas cheias teóricas, com ou sem a existência do

reservatório. Do estudo, conclui-se que o reservatório de Foz do Areia não agrava os níveis em União da Vitória se operado na cota 742 m para enchentes de até 15 anos de recorrência, enquanto que na cota 741,50 m a influência seria observada somente para vazões acima de 100 anos de recorrência, acima da qual torna-se muito difícil evitar a influência do reservatório, dada a limitação de descarga do vertedouro. Entretanto, face a possíveis defasagens no tempo entre os picos de enchente em União da Vitória e Foz do Areia, existe a possibilidade de se conseguir rebaixar rapidamente o nível para valores inferiores a 741,50 m, mesmo durante cheias extremamente severas em União da Vitória, como de fato ocorreu em julho de 1983. O relatório reafirma a conclusão do estudo anterior, realizado pela SPE, de que a usina só poderá efetivamente operar no seu nível máximo (744 m) com um bom sistema de previsão de afluências.

O relatório recomenda:

- i) fixar o nível máximo normal de Foz do Areia em 741,50 m para permitir uma adequada proteção (período de retorno de 100 anos) à cidade de União da Vitória e que seja deplecionado para níveis mais baixos sempre que se prever a ocorrência de uma cheia de grandes proporções em União da Vitória, não havendo restrições a jusante;
- ii) intensificar os estudos que levem a um *modelo de previsão de vazões* em União da Vitória para períodos de 3 a 4 dias e outro de *previsão de vazões* para um horizonte máximo de 24 horas nas bacias incrementais entre União da Vitória e Salto Santiago, implementando-se as estações pluviométricas e fluviométricas necessárias;
- iii) conduzir estudos que permitam definir as regras operativas conjuntas dos reservatórios do rio Iguaçu em função dessa previsão.

Em janeiro de 1993 a Comissão Regional Permanente de Prevenção contra as Cheias do rio Iguaçu - CORPRERI, buscando orientação sobre a influência do

reservatório de Foz do Areia sobre as enchentes em União da Vitória, contratou como consultor o Dr. Carlos Eduardo Morelli Tucci (IPH/UFRGS) para avaliar o impacto da operação deste reservatório sobre as enchentes mencionadas. Um relatório específico (TUCCI, 1993) comenta que nos estudos realizados pela COPEL, o período de retorno da cheia de 1983 (nível em União da Vitória na cota 750,0 m) foi de 1600 anos. A população teve dificuldades em entender como eventos com este risco podem ter ocorrido em espaço tão curto de tempo, já que em 1992 o evento não foi do mesmo porte, mas também excepcional e com impactos significativos. o Dr. Tucci observou que nos estudos anteriores não se levou em conta as marcas históricas observadas em 1891, 1905, 1911 com níveis em União da Vitória respectivamente iguais a 750,0 m, 750,5 m e 748,0 m, o que mostra que a cheia de 1983 não foi tão rara e provavelmente com um período de retorno bem menor que 1600 anos.

Entre as recomendações do relatório destacam-se:

- i) modelagem hidrodinâmica para representar o escoamento em todo o trecho em estudo;
- ii) o desenvolvimento de um sistema de *previsão de níveis e vazões* capaz de informar à população os níveis previstos para os próximos dois dias com intervalos de 4 horas para as primeiras 12 horas e com intervalos de 12 horas depois disto;
- iii) avaliar a sistemática de previsão de cheias em tempo real da COPEL em conjunto com as regras operacionais.

A primeira recomendação foi atendida com um estudo de simulação hidrodinâmica do rio Iguaçu entre os trechos de Fluiópolis e Foz do Areia através de um projeto desenvolvido pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza - CEHPAR (DIAS et al., 1996). A segunda foi verificada (BUBA, 1989) com o sistema de previsão de vazões desenvolvido pelo CEHPAR (MINE, 1980, 1984, 1986 e 1987).

A base dos modelos desse sistema é estatística (modelos ARIMA para União da Vitória e de Regressão Múltipla para Foz do Areia), que têm sido utilizados, em diversos locais, com bons resultados, quando a contribuição lateral não é muito importante, o que não corresponde à realidade da bacia incremental em questão.

Quando as vazões futuras acham-se relacionadas principalmente com o armazenamento de água nas calhas fluviais, ou seja, para pequenos horizontes de previsão, esses modelos e principalmente a sua componente regressiva (ordem 2) apresentam um bom desempenho. Quando a influência das condições de armazenamento de água em toda a bacia assume um valor preponderante no desenvolvimento da cheia, estes modelos tendem a fracassar, principalmente no trecho de subida dos hidrogramas.

É importante destacar que, para a operação de reservatórios em tempo real, o modelo deve simular bem o trecho de subida dos hidrogramas e a vazão de pico (magnitude e intervalo de tempo), para que os responsáveis pela operação do reservatório, em situações de emergência, possam tomar decisões corretas, não comprometendo a segurança da barragem. A carência de dados e limitações de recursos computacionais, para armazenar modelos conceituais do ciclo hidrológico, existentes na época, justificaram a adoção desses modelos, uma vez que as previsões podem ser obtidas com uma simples calculadora de bolso.

Uma das recomendações dos estudos acima mencionados é o desenvolvimento de um bom sistema de previsão de vazões para a operação hidráulica do reservatório de Foz do Areia, o que se torna imprescindível, tendo em vista as restrições de montante e a precariedade do sistema existente. Portanto, procurou-se desenvolver neste trabalho, um sistema mais eficiente de previsão de vazões, baseado numa abordagem empírica, na bacia incremental a montante de Foz do Areia; adotando-se a metodologia apresentada no Capítulo II.

### **3.4 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A FOZ DO AREIA**

#### **3.4.1 – DADOS UTILIZADOS**

Para a aplicação da metodologia descrita no capítulo 2 primeiramente houve a necessidade de selecionar um aproveitamento dentre aqueles existentes no SIN.

No processo de seleção do aproveitamento, optou-se por uma usina que fosse localizada no subsistema Sul, pois, freqüentemente há ocorrência de entradas de frentes frias que provocam chuva com certa intensidade e modificam rapidamente as condições hidrológicas das bacias daquele subsistema, dificultando bastante a obtenção de previsões mais aderentes à realidade.

Além do mais, as bacias do subsistema Sul possuem menores erros de previsão de precipitação o que poderá ajudar a corrigir erros de rota nas previsões quando da implantação do modelo proposto, uma vez que os parâmetros podem ser calibrados a cada nova previsão.

Uma outra consideração para a seleção do local de aplicação diz respeito ao monitoramento adequado da bacia incremental ao local escolhido, através de postos pluviométricos, preferencialmente telemedidos, com informações obtidas pelo menos semanalmente, para que a partir da implantação do modelo para uso das previsões de vazões para o SIN, possam ser utilizadas as informações de chuva representativa.

Por último, um critério não menos importante é o que diz respeito à reconstituição de vazões naturais médias semanais, no qual a preferência deverá ser dirigida a aproveitamentos de cabeceira, ou seja, sem nenhum tipo de operação de reservatório em sua bacia incremental de montante que possa vir a acrescentar incertezas ao processo de obtenção das vazões naturais médias semanais, incertezas estas associadas às medições necessárias ao balanço hídrico, ao tempo de viagem da água entre os reservatórios, indefinido e, em alguns casos, altamente variável. Todas estas conjecturas levaram-nos à escolha da UHE de Foz do Areia.

Para iniciar o trabalho de coleta de dados foram solicitados ao SIMEPAR os dados de chuva para as estações operadas por essa instituição a montante do

aproveitamento de Foz do Areia, conforme apresentado na tabela 3.2, para o qual fomos prontamente atendidos em nosso pedido.

**TABELA 3.2 - DADOS DIÁRIOS DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS A MONTANTE DE FOZ DO AREIA ENVIADOS PELO SIMEPAR**

CÓDIGO	NOME DA ESTAÇÃO	INÍCIO	FINAL
2549106	Porto Amazonas	01/06/97	31/03/01
2550069	São Mateus do Sul	01/06/97	31/03/01
2649073	Fragosos	01/06/97	31/03/01
2649074	Rio Negro	24/10/97	31/03/01
2549105	São Bento	17/09/97	31/03/01
2650027	Fluviópolis	01/06/97	31/03/01
2650030	Santa Cruz do Timbó	01/06/97	31/03/01
2651059	União da Vitória	01/06/97	31/03/01
2651058	Porto Vitória	01/06/97	31/03/01
2651057	Jangada do Sul	01/06/97	31/03/01
2651056	Fazenda Maracanã	01/06/97	31/03/01
2650026	Divisa	17/09/97	31/03/01
2550070	Pontilhão	01/06/97	31/03/01
2650028	Foz do Cachoeira	01/06/97	31/03/01
2551054	Madeireira Gavazzoni	01/06/97	31/03/01
2651053	Foz do Areia	06/03/98	31/03/01

Para a complementação dos dados obtidos junto ao SIMEPAR, realizou-se uma pesquisa junto à ANA - Agência Nacional de Águas, responsável pela operação e manutenção da Rede Hidrometeorológica Nacional, outrora gerida pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, e obteve-se os dados complementares para essas estações conforme apresenta-se na tabela 3.3.

Essa providência foi tomada no sentido de se trabalhar com um horizonte maior de informações que permitisse um leque mais amplo de pesquisas em diferentes tipos de modelagem, pois alguns modelos possuem uma certa limitação quando se utiliza nos processo de ajuste um histórico de dados mais curto que o necessário e para tal utilizou-se os dados da ANA até outubro de 1997 e a partir de novembro de 1997 dados do SIMEPAR.

**TABELA 3.3 - DADOS DIÁRIOS DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS A MONTANTE DE FOZ DO AREIA OBTIDOS JUNTO À ANA**

CÓDIGO	NOME DA ESTAÇÃO	INÍCIO	FINAL
2549106	Porto Amazonas	01/01/82	31/12/97
2550069	São Mateus do Sul	01/01/82	31/12/97
2649073	Fragosos	01/01/82	31/12/97
2649074	Rio Negro	01/01/82	31/12/97
2549105	São Bento	01/01/82	31/12/97
2650027	Fluviópolis	01/01/82	31/12/97
2650030	Santa Cruz do Timbó	01/01/82	31/12/97
2651059	União da Vitória	01/01/82	31/12/97
2651058	Porto Vitória	01/01/82	31/12/97
2651057	Jangada do Sul	01/01/82	31/12/97
2651056	Fazenda Maracanã	01/01/82	31/12/97

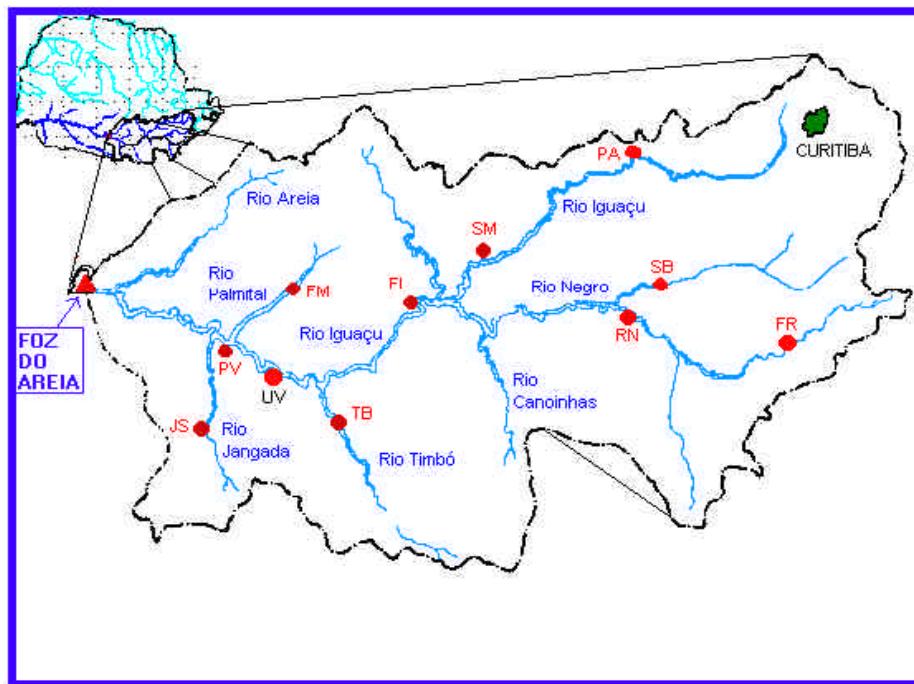
Conforme observa-se comparando as duas tabelas anteriores, há cinco estações (Divisa, Pontilhão, Mad. Gavazzoni, Foz do Cachoeira, Foz do Areia) cujos dados anteriores a 1997 não foram localizados junto à ANA, portanto, optou-se por excluí-las deste estudo, sendo que esses dados, poderiam ter sido utilizados, porém, se o fizéssemos, perderíamos alguns anos de histórico e isso somente se justificaria se a bacia incremental a montante não estivesse bem coberta com as demais estações conforme apresenta-se na figura 3.3.

Apesar disso nada impede que o estudo seja posteriormente refeito com a inclusão desses dados e a perda de alguns anos no histórico, podendo-se comparar os resultados obtidos com os do presente trabalho para o qual ficaram 11 estações.

Foram detectadas 28 falhas nos dados enviados pelo SIMEPAR, e para tal, houve necessidade de preenchimento dessas falhas para alguns postos. Dentre os métodos existentes, a partir do bom senso, optou-se por preencher as falhas múltiplas no dia 19/12/1997 com o valor nulo pois, somente há dados para as estações de Santa Cruz do Timbó e Pontilhão, ambas com valor nulo de precipitação e para Foz do Cachoeira com o valor de 0,2 mm de chuva, ou seja, quase nula.

Em seguida os demais postos pluviométricos tiveram suas falhas preenchidas por regressão linear com postos vizinhos conforme apresenta-se na tabela 3.4, na qual

são indicadas as estações escolhidas para regressão, o coeficiente de determinação encontrado, as datas das falhas e os valores obtidos para o preenchimento.



**FIGURA 3.3 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES NA BACIA INCREMENTAL**

**TABELA 3.4 - PREENCHIMENTO DE FALHAS EM ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DO SIMEPAR**

Estação	Data	da	Posto Base	Coef. Determinação	Valor (mm)
Faz.Maracanã	01/01/98		Porto Vitória	74.5	9.6
Faz.Maracanã	02/01/98		Porto Vitória	74.5	24.4
Faz.Maracanã	03/01/98		Porto Vitória	74.5	9.2
Faz.Maracanã	04/01/98		Porto Vitória	74.5	1.7
Faz.Maracanã	05/01/98		Porto Vitória	74.5	0.9
Faz.Maracanã	06/01/98		Porto Vitória	74.5	44.5
Faz.Maracanã	07/01/98		Porto Vitória	74.5	34.2
Faz.Maracanã	08/01/98		Porto Vitória	74.5	1.1
Rio Negro	03/07/98		Divisa	56.1	29.0
Rio Negro	04/07/98		Divisa	56.1	1.2
Fluviópolis	14/08/98		São Mateus	45.9	2.6
Fluviópolis	15/08/98		São Mateus	45.9	1.1
Jang. do Sul	27/03/99		Porto Vitória	61.6	2.0
Jang. do Sul	28/03/99		Porto Vitória	61.6	8.5
Fluviópolis	15/08/99		São Mateus	45.9	1.1
Fluviópolis	16/08/99		São Mateus	45.9	1.1
Fluviópolis	10/06/00		São Mateus	45.9	1.1
Fluviópolis	11/06/00		São Mateus	45.9	1.1
Faz.Maracanã	21/02/01		Porto Vitória	74.5	1.1

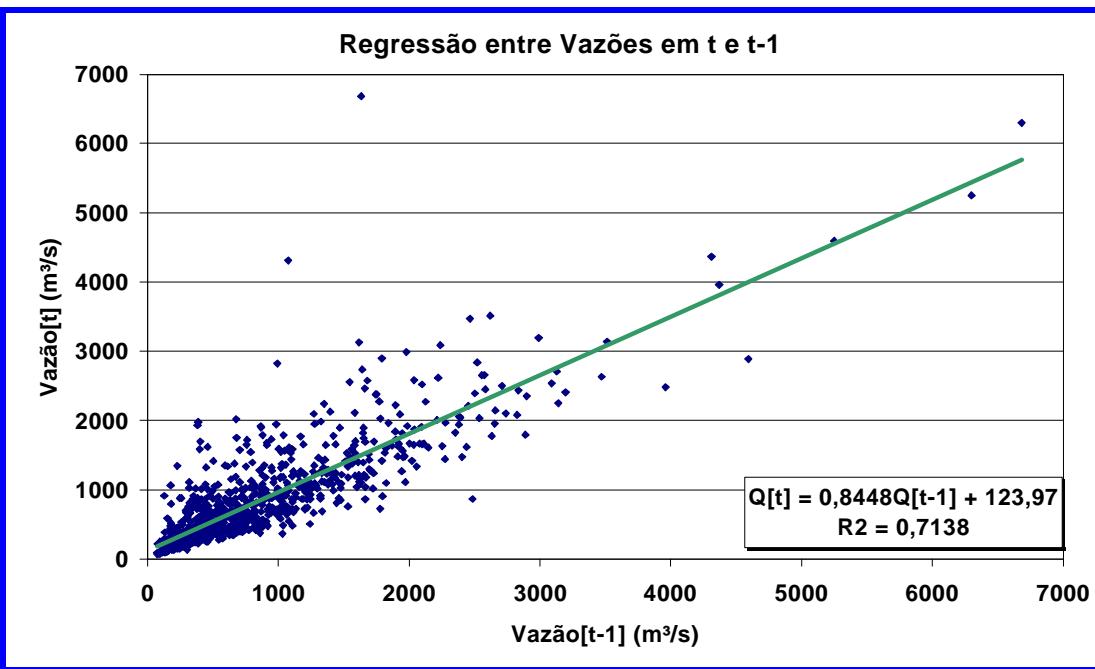
A partir do preenchimento dessas falhas, com os históricos completos de chuva para os onze postos selecionados, procedeu-se à obtenção da chuva equivalente média diária, em milímetros, pelo método do inverso do quadrado da distância descrito no capítulo 2, obtendo-se, em seguida, a chuva equivalente semanal por soma das chuvas diárias dos sete dias.

Em seguida procedeu-se à obtenção do histórico de vazões médias semanais, entre janeiro de 1969 e março de 2001, o qual foi obtido junto ao ONS, havendo necessidade de truncar esse histórico a partir de 1982, pois para anos anteriores não se dispunham de valores de precipitação para aplicação do modelo.

Considerando que, desde 1982 até 2001 as vazões naturais médias semanais foram reconstituídas a partir do balanço hídrico, e que, esse processo, além de estar incompleto, pois não incorpora a parcela perdida com a vazão evaporada no lago, está por diversas vezes sujeito a inúmeras incorreções conforme apresentou-se no Capítulo 1. Dessa forma, ainda assim, optou-se por não modificar essa série de dados e utilizar a informação da mesma maneira que o ONS o faz, observando apenas que não há falhas nos dados de afluências naturais e nem mesmo vazões negativas o que poderia se caracterizar por sérios problemas que teriam de ser equacionados e resolvidos antes de seguir em frente com a aplicação da metodologia proposta.

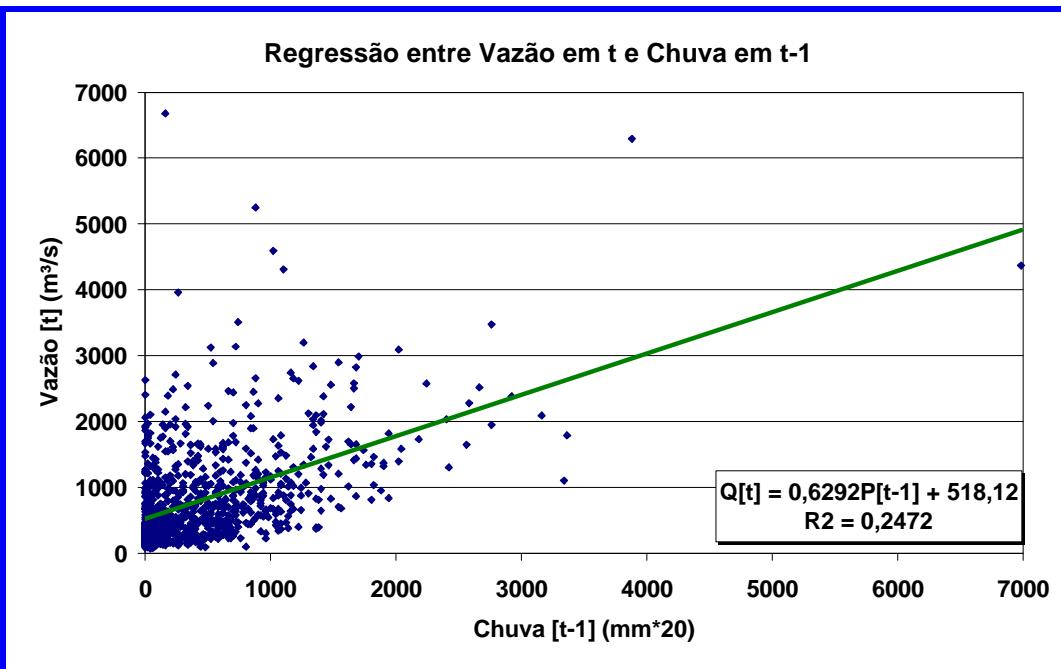
A média semanal das afluências da série de Foz do Areia obtida é de 794 m<sup>3</sup>/s com uma vazão máxima de 6.682 m<sup>3</sup>/s e uma vazão mínima de 71 m<sup>3</sup>/s, com um desvio padrão de 720 m<sup>3</sup>/s, caracterizando a alta variabilidade das afluências presente na série em questão.

A partir da série de vazões médias semanais e da série de chuvas semanais equivalentes para a bacia incremental, na figura 3.4 apresenta-se a regressão entre vazões naturais numa determinada semana e as vazões naturais na semana anterior, observando-se que há uma correlação superior a 0,7 e este coeficiente só não é maior porque o tempo de resposta da bacia é bastante curto, desde somente algumas horas até um dia.



**FIGURA 3.4 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE VAZÕES EM T E T-1**

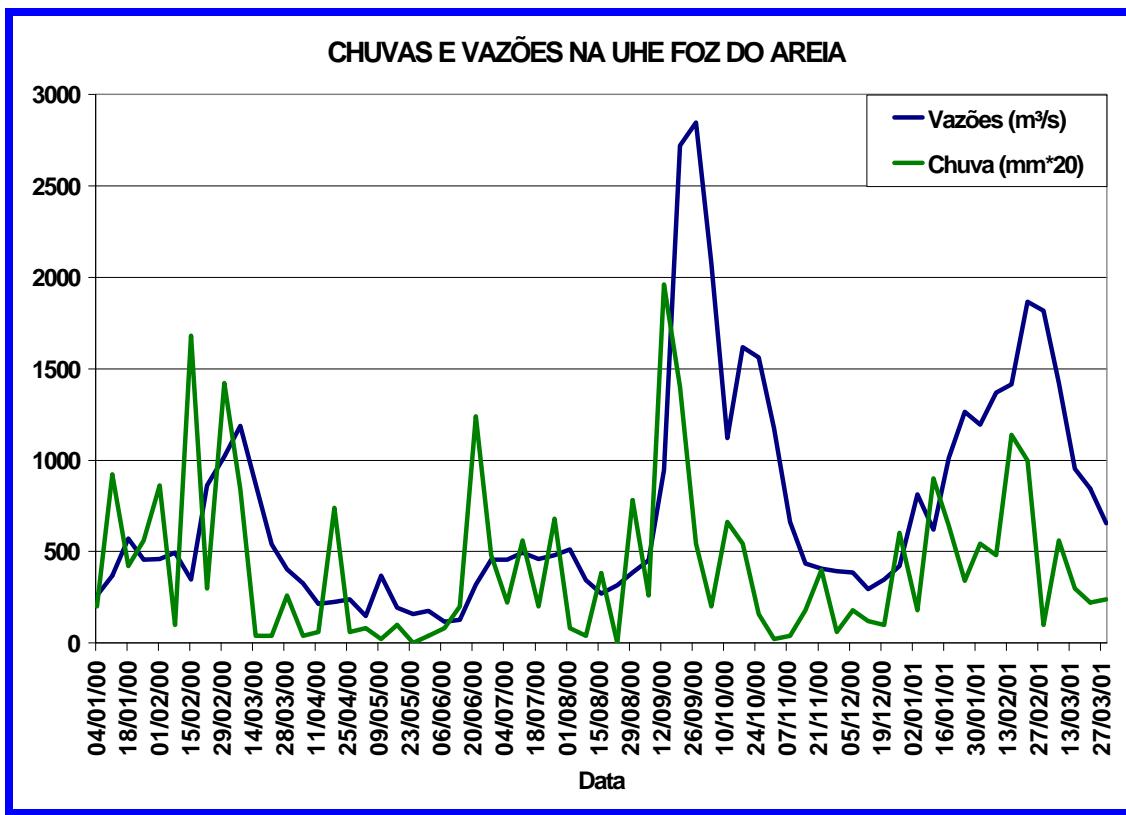
Por outro lado, na figura 3.5, apresenta-se a regressão entre vazões semanais e as chuvas da semana anterior observado que o coeficiente de correlação é baixo.



**FIGURA 3.5 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE VAZÕES EM T E CHUVAS EM T-1**

### 3.4.2 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO

A partir desses dois históricos de chuva e vazão semanais, multiplicou-se o valor de chuva por 20 para colocá-lo em escala semelhante à vazão e observou-se que ao longo de todo o histórico o comportamento das afluências naturais indicam fortemente a influência imediata da chuva em sua formação conforme exemplificado para os anos de 2000 e 2001 na figura 3.6.



**FIGURA 3.6 – CHUVA E VAZÃO EM FOZ DO AREIA ENTRE JAN/2000 E MAR/2001**

Essa forte influência da chuva nas vazões naturais sinaliza de modo positivo para aplicação da metodologia proposta uma vez que se os gráficos obtidos não fossem tão conclusivos poderia se questionar sua aplicação.

O próximo passo foi no sentido de investigar como relacionar a chuva e a vazões de semanas passadas com a vazão semanal da próxima semana que é a variável que se deseja estimar. Desse modo avaliaram-se alguma possibilidades e a

partir do histórico entre 1982 e março de 2000 calcularam-se regressões polinomiais múltiplas de diversas ordens chegando-se aos resultados apresentados na tabela 3.5, onde observam-se pequenas diferenças entre os métodos que propõem uma regressão linear de vazões e chuvas de semanas anteriores para a obtenção das vazões naturais para a semana que se segue, ficando os coeficientes de determinação em cerca de 77%, ou seja, 0,77.

Observa-se também que em relação a regressões polinomiais de segundo e terceiro grau, quando se utilizam somente as vazões da semana anterior esse coeficiente de determinação cai para cerca de 0,71 e se for utilizada somente chuvas da semana anterior esse coeficiente cai muito, situando-se abaixo de 0,2 não compensando uma investigação nesse sentido. Fica-se então com as sete primeiras possibilidades apresentadas para uma avaliação de aplicação.

**TABELA 3.5 - COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO DAS REGRESSÕES**

Chuvas Passadas	Vazões Passadas	Tipo de Equação	Coeficiente de Determinação (%)	Máxima Diferença (%)
3 semanas	3 semanas	Linear	0,7764	-
3 semanas	2 semanas	Linear	0,7763	0,0001
2 semanas	2 semanas	Linear	0,7756	0,0008
1 semana	3 semanas	Linear	0,7745	0,0019
1 semana	2 semanas	Linear	0,7743	0,0021
3 semanas	1 semanas	Linear	0,7741	0,0023
1 semana	1 semana	Linear	0,7698	0,0066
-	1 semana	Polinomial de Terceiro Grau	0,7163	0,0601
-	1 semana	Polinomial de Segundo Grau	0,7141	0,0623
1 semana	-	Polinomial de Terceiro Grau	0,2485	0,5279
1 semana	-	Polinomial de Segundo Grau	0,2472	0,5292

Assim sendo, considerando que sete opções constituem-se num universo bastante amplo, optou-se por avaliar somente três dessas opções de modelagem.

A primeira delas, denominada de Modelo 1, trata-se da modelagem mais simplificada dentre as sete e diz respeito à influência da vazão e da chuva da semana anterior nas afluências da próxima semana com a seguinte formulação :

$$Q(t) = a P(t-1) + b Q(t-1) + c \quad (3.1)$$

onde,  $Q(t)$  - Vazão da semana seguinte em  $m^3/s$ .

$P(t-1)$  - Chuva Equivalente da semana anterior em  $mm^*20$ .

$Q(t-1)$  - Vazão da semana anterior em  $m^3/s$ .

$a, b, c$  - Parâmetros do modelo obtidos pelo resultado da regressão linear no histórico entre janeiro de 1982 e março de 2000, e sua proporcionalidade é mantida durante a aplicação.

A segunda opção denominada de Modelo 2, diz respeito à influência das vazões e chuvas das duas semanas anteriores nas vazões da próxima semana com a seguinte formulação :

$$Q(t) = a P(t-2) + b P(t-1) + c Q(t-2) + d Q(t-1) + e \quad (3.2)$$

onde,  $Q(t)$  - Vazão da semana seguinte em  $m^3/s$ .

$P(t-2)$  - Chuva Equivalente de duas semanas antes em  $mm^*20$ .

$P(t-1)$  - Chuva Equivalente da semana anterior em  $mm^*20$ .

$Q(t-2)$  - Vazão de duas semanas antes em  $m^3/s$ .

$Q(t-1)$  - Vazão da semana anterior em  $m^3/s$ .

$a, b, c, d, e$  - Parâmetros do modelo obtidos pelo resultado da regressão linear no histórico entre janeiro de 1982 e março de 2000, sendo que  $e$  deverá ser mantido constante no processo de aplicação do método.

A terceira opção, denominada Modelo 3, relaciona as chuvas das três últimas semanas e as vazões da última semana nas afluências da próxima semana com a seguinte formulação :

$$Q(t) = a [0,5 P(t-3) + 2 P(t-2) + 3Q(t-1)] + b Q(t-1) + c \quad (3.3)$$

onde,  $Q(t)$  - Vazão da semana seguinte em  $m^3/s$ .

$P(t-3)$  - Chuva Equivalente de três semanas antes em  $mm^*20$ .

$P(t-2)$  - Chuva Equivalente de duas semanas antes em  $mm^*20$ .

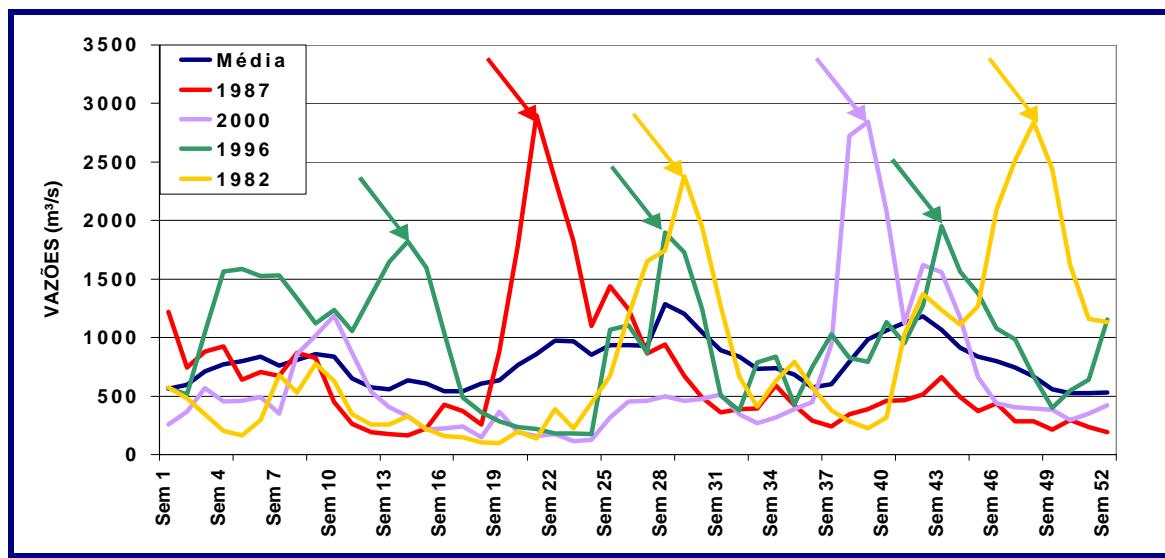
$P(t-1)$  - Chuva Equivalente da semana anterior em  $mm^*20$ .

$Q(t-1)$  - Vazão da semana anterior em  $m^3/s$ .

a, b, c - Parâmetros do modelo obtidos pelo resultado da regressão linear no histórico entre janeiro de 1982 e março de 2000, sendo que, deverá tentar se manter constante o valor de c e assumiu-se que há uma influência maior da chuva da semana anterior que a de duas ou três semanas anteriores.

Para dar seqüência ao processo de aplicação optou-se por selecionar primeiramente um ano médio em termos de hidrologia e em seguida aplicar as três metodologias selecionadas. Para aquela formulação matemática que obtivesse o maior sucesso, isto é, o menor erro médio absoluto de previsão deverá então se aplicar também para um período hidrológico menos favorável (ano seco) e para um período hidrológico mais intenso (ano úmido).

Considerando que não há uma sazonalidade marcada nas afluências da região sul, e, notoriamente nas vazões da UHE Foz do Areia, conforme apresenta-se na figura 3.7, optou-se por escolher o ano entre abril de 2000 e março de 2001 como ano com hidrologia média, pois além de ser o conjunto de dados mais recente que se tem sua média encontra-se em  $767 \text{ m}^3/\text{s}$ .

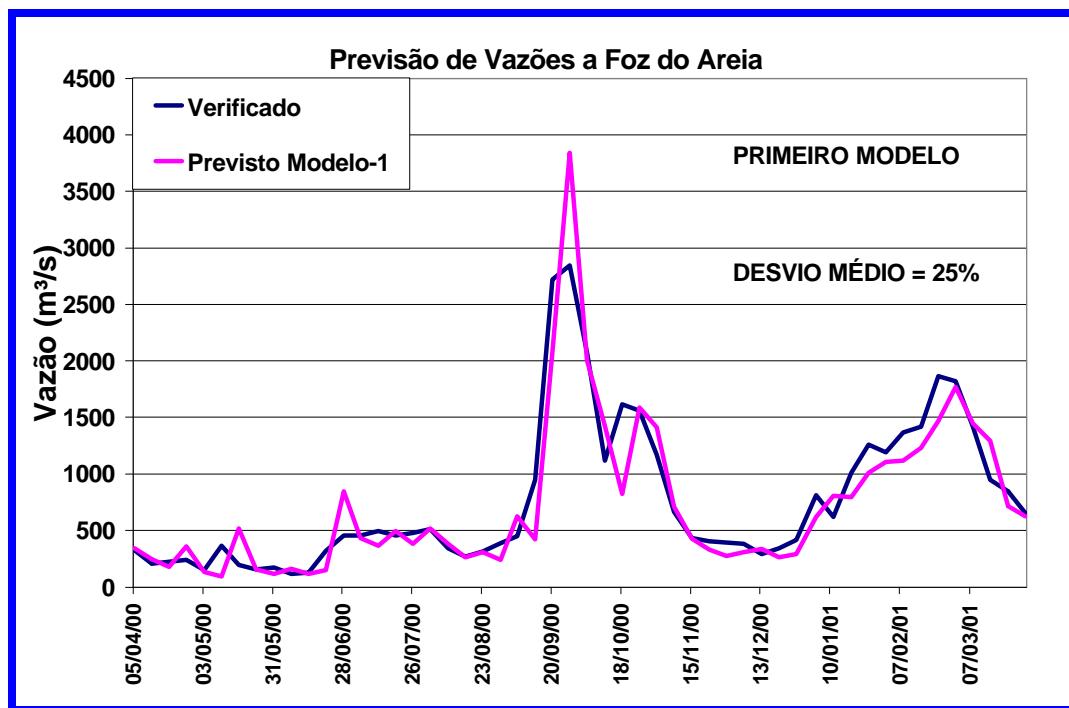


**FIGURA 3.7 – SAZONALIDADE DAS VAZÕES EM FOZ DO AREIA**

Para a realização dos estudos em ano seco selecionou-se o período entre abril de 1985 e março de 1986, com vazão natural média anual (semanal) de  $266 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

vazão máxima semanal de 928 m<sup>3</sup>/s e vazão mínima semanal de 71 m<sup>3</sup>/s (menor valor semanal do histórico completo). Para a aplicação do modelo escolhido em ano úmido escolheu-se entre abril de 1983 e março de 1984 que possui uma vazão natural média anual (semanal) de 1.389 m<sup>3</sup>/s, vazão máxima semanal de 6.682 m<sup>3</sup>/s (maior valor semanal do histórico) e vazão mínima semanal de 194 m<sup>3</sup>/s.

Através de planilha eletrônica, e utilizando a função PROJ.LIN do Microsoft Excel, foram ajustados os parâmetros indicados para iniciar a aplicação do primeiro modelo (Modelo 1), obtidos da regressão linear múltipla da chuva e da vazão da semana anterior com a vazão da próxima semana, conforme apresentado na equação 3.1. Obtiveram-se os valores de  $a = 0,316673$ ;  $b = 0,763918$ ;  $c = 47,61013$  e realizaram-se os ajustes destes parâmetros, mantendo-se até o final sua proporcionalidade, chegando-se aos valores previstos entre abril de 2000 e março de 2001 conforme apresentados na figura 3.8.



**FIGURA 3.8 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO 1 A FOZ DO AREIA**

A tabela 3.6 apresenta os parâmetros calculados durante a aplicação do modelo onde, sempre que o erro absoluto da previsão numa determinada semana

chegou a 25% modificaram-se os parâmetros multiplicando os três por um valor constante de tal forma que o erro se situasse numa faixa inferior a esses 25%.

**TABELA 3.6 - PARÂMETROS DO MODELO 1**

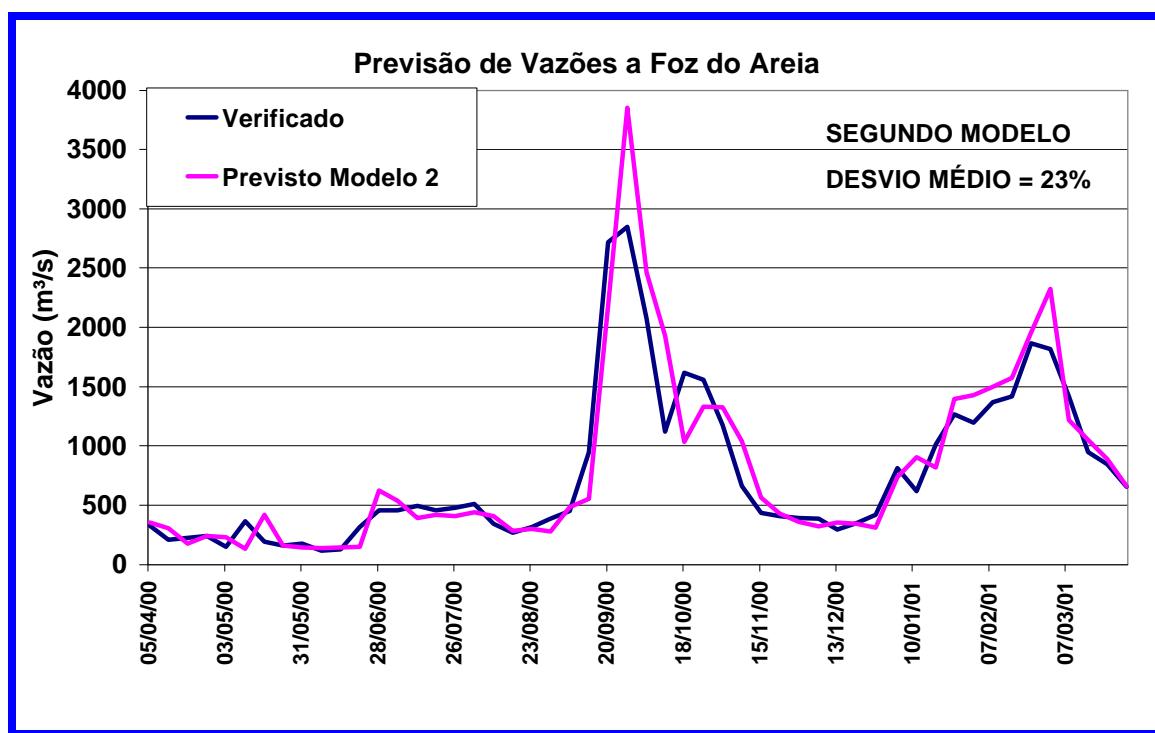
INÍCIO	FINAL	a	b	c
23/03/2000	29/03/2000	0,316673	0,763918	47,610130
30/03/2000	26/04/2000	0,250532	0,604366	37,666239
27/04/2000	10/05/2000	0,166467	0,401572	25,027401
11/05/2000	17/05/2000	0,496915	1,198722	74,708660
18/05/2000	31/05/2000	0,220851	0,532765	33,203849
01/06/2000	07/06/2000	0,262918	0,634245	39,528392
08/06/2000	21/06/2000	0,225681	0,544416	33,929950
22/06/2000	28/06/2000	0,392489	0,946810	59,008608
29/06/2000	12/07/2000	0,250791	0,604991	37,705181
13/07/2000	30/08/2000	0,261241	0,630199	39,276230
31/08/2000	06/09/2000	0,334924	0,807947	50,354141
07/09/2000	13/09/2000	0,283834	0,684701	42,673001
14/09/2000	27/09/2000	0,473057	1,141168	71,121669
28/09/2000	11/10/2000	0,265762	0,641106	39,955994
12/10/2000	18/10/2000	0,235188	0,567350	35,359286
19/10/2000	01/11/2000	0,345865	0,834338	51,998951
02/11/2000	29/11/2000	0,237708	0,573428	35,738110
30/11/2000	27/12/2000	0,267087	0,644302	40,155180
28/12/2000	11/01/2001	0,351431	0,847765	52,835763
12/01/2001	15/03/2001	0,312939	0,754911	47,048765
16/03/2001	29/03/2001	0,260783	0,629093	39,207304

Observou-se um erro médio absoluto de 25% ao longo do período avaliado, porém apesar da previsão não se distanciar muito do valor verificado, destacam-se semanas como a que vai de 22/06/2000 a 28/06/2000, para a qual o modelo produziu resultados considerando que o efeito da chuva ocorrida na semana anterior fosse ter uma influência muito maior sobre as vazões do que na realidade ocorreu. Do mesmo modo ocorrendo na semana entre 21/09/2000 e 27/09/2000, quando o pico máximo de vazões para esse ano foi superestimado. Apesar disso, a resposta do modelo foi mais aderente que aquela obtida com os modelos estocásticos, de 46% para Foz do Areia no ano 2000 (ONS, 2001), lembrando que esses modelos, conforme a referência, para a semana de 14/09/2000 a 20/09/2000 não tiveram uma aderência tão rápida na previsão de vazões ao efeito da primeira chuva mais intensa. Na mesma tabela

observa-se que entre 12/01/2001 e 15/03/2001 os parâmetros não tiveram que ser modificados por nove semanas seguidas.

Em seguida passou-se ao Modelo 2, novamente através do uso de planilha eletrônica, e utilizando a função PROJ.LIN do Microsoft Excel, foram ajustados os parâmetros iniciais indicados para começar a aplicação do segundo modelo (Modelo 2), obtidos da regressão linear múltipla da chuva e da vazão de duas semanas anteriores com a vazão da próxima semana, conforme apresentado na equação 3.2.

Obtiveram-se os valores de  $a = 0,172992$ ;  $b = 0,208124$ ;  $c = 0,211132$ ;  $d = 0,156631$ ;  $e = 116$ ; e realizaram-se os ajustes destes parâmetros, mantendo-se até o final o valor de "e" fixo e a proporcionalidade entre os demais parâmetros, chegando-se aos valores previstos entre abril de 2000 e março de 2001 conforme apresentados na figura 3.9.



**FIGURA 3.9 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO 2 A FOZ DO AREIA**

A tabela 3.7 apresenta os parâmetros calculados durante a aplicação do Modelo 2, onde, sempre que o erro absoluto da previsão numa determinada semana chegou a 25% modificaram-se os parâmetros multiplicando a, b ,c e d por um valor constante de tal forma que o erro se situasse numa faixa inferior a esses 25%.

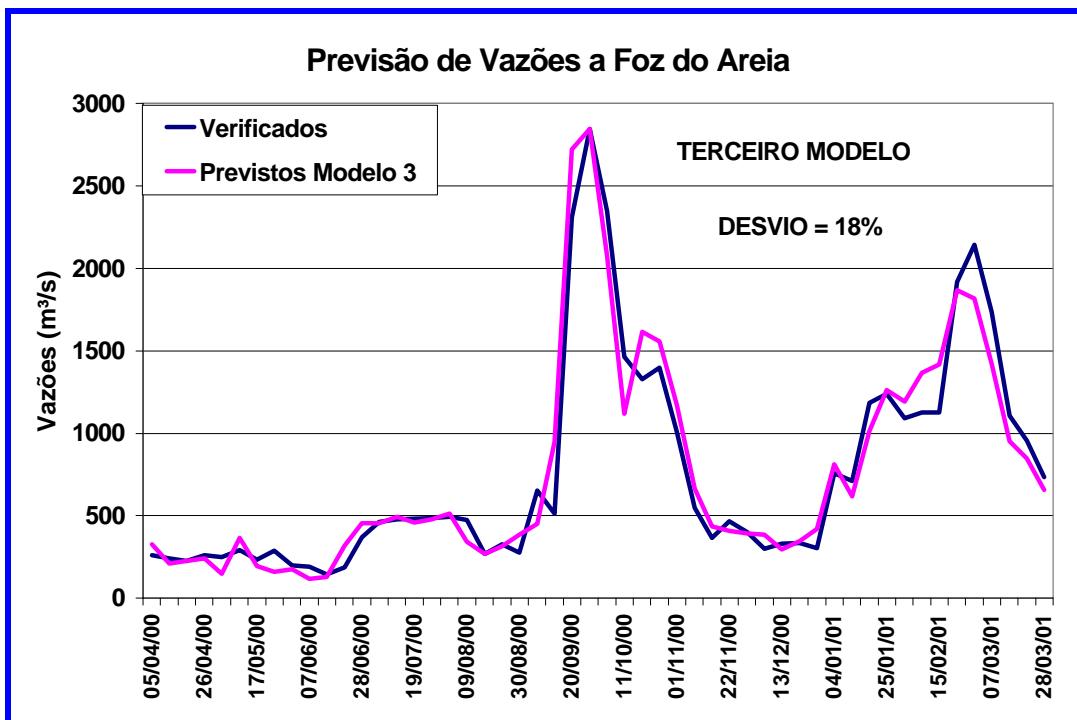
**TABELA 3.7 - PARÂMETROS DO MODELO 2**

INÍCIO	FINAL	a	b	c	d
23/03/2000	12/04/2000	0,172992	0,208124	0,211132	0,156631
13/04/2000	03/05/2000	0,087724	0,105539	0,107065	0,079427
04/05/2000	10/05/2000	0,022209	0,026719	0,027105	0,020108
11/05/2000	17/05/2000	0,493527	0,593752	0,602333	0,446848
18/05/2000	21/06/2000	0,056083	0,067472	0,068447	0,050778
22/06/2000	28/06/2000	0,238649	0,287114	0,291264	0,216077
29/06/2000	30/08/2000	0,160275	0,192824	0,19561	0,145116
31/08/2000	13/09/2000	0,221069	0,265964	0,269807	0,20016
14/09/2000	27/09/2000	0,514114	0,61852	0,627458	0,465488
28/09/2000	11/10/2000	0,295468	0,355471	0,360608	0,267522
12/10/2000	18/10/2000	0,202375	0,243473	0,246992	0,183234
19/10/2000	08/11/2000	0,293297	0,35286	0,357959	0,265557
09/11/2000	27/12/2000	0,214086	0,257562	0,261284	0,193837
28/12/2000	11/01/2001	0,382979	0,460755	0,467414	0,346757
12/01/2001	18/01/2001	0,248688	0,299192	0,303515	0,225167
19/01/2001	01/03/2001	0,383186	0,461004	0,467666	0,346944
02/03/2001	29/03/2001	0,218964	0,263431	0,267238	0,198254

Observou-se um erro médio absoluto de 23% ao longo do período avaliado, porém apesar da previsão parecer se comportar de forma mais aderente à realidade hidrológica do que no modelo 1 e distanciar-se menos ainda do valor verificado, destaca-se a semana entre 21/09/2000 e 27/09/2000, quando o pico máximo de vazões para esse ano também foi superestimado. Apesar disso, a resposta do modelo foi mais aderente que aquela obtida com os modelos estocásticos, de 46% para Foz do Areia no ano 2000 (ONS, 2001), destacando-se também sua aderência para a semana de 14/09/2000 a 20/09/2000. Na mesma tabela observa-se que entre 29/06/2000 e 30/08/2000 os parâmetros não tiveram que ser modificados por nove semanas seguidas.

Em seguida passou-se ao Modelo 3, uma vez mais através do uso de planilha eletrônica, e utilizando a função PROJ.LIN do Microsoft Excel, foram ajustados os

parâmetros iniciais, para a aplicação do terceiro modelo (Modelo 3), obtidos da regressão linear múltipla da chuva e da vazão de duas semanas anteriores com a vazão da próxima semana, conforme apresentado na equação 3.3. Obtiveram-se os valores de  $a = 0,023$ ;  $b = 0,110$ ;  $c = 183$ ; e realizaram-se os ajustes destes parâmetros,  $a$  e  $b$  mantendo-se até o final o valor de "c" fixo, e não preservando a proporcionalidade entre os outros dois parâmetros, chegando-se aos valores previstos entre abril de 2000 e março de 2001 conforme apresentados na figura 3.10.



**FIGURA 3.10 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO 3 A FOZ DO AREIA**

A tabela 3.8 apresenta os parâmetros calculados durante a aplicação do Modelo 2, onde, sempre que o erro absoluto da previsão numa determinada semana chegou a 25% modificaram-se os parâmetros  $a$  e  $b$ , de tal forma que o erro se situasse numa faixa inferior a esses 25%. Somente em duas ocasiões as vazões verificadas de na semana caíram para patamares inferiores aos  $183 m^3/s$  utilizados na constante  $c$  e esta teve que modificar seu valor conforme sinalizado na referida tabela 3.8.

**TABELA 3.8 - PARÂMETROS DO MODELO 3**

<b>INÍCIO</b>	<b>FINAL</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
23/03/2000	03/05/2000	0,023	0,110	183
04/05/2000	24/05/2000	0,078	0,210	183
25/05/2000	07/06/2000	0,100	0,100	159
08/06/2000	21/06/2000	0,090	0,010	116
22/06/2000	09/08/2000	0,030	0,500	183
10/08/2000	30/08/2000	0,100	0,050	183
31/08/2000	06/09/2000	0,180	0,050	183
07/09/2000	13/09/2000	0,100	0,250	183
14/09/2000	11/10/2000	0,300	0,200	183
12/10/2000	29/11/2000	0,370	0,080	183
30/11/2000	27/12/2000	0,100	0,200	183
28/12/2000	15/02/2001	0,235	0,260	183
16/02/2001	07/03/2001	0,235	0,470	183
08/03/2001	28/03/2001	0,235	0,200	183

Observou-se um erro médio absoluto de 18% ao longo do período avaliado, e a previsão com o uso desta abordagem parece se comportar de forma mais aderente à realidade hidrológica do que nos dois primeiros modelos e distancia-se menos ainda do valor verificado, destacando-se a semana entre 21/09/2000 e 27/09/2000, quando o pico máximo de vazões para esse ano também foi muito bem estimado. Além disso, cabe destacar que por três vezes durante o processo de reajuste dos parâmetros, não houve necessidade de modificá-los por um período de sete semanas consecutivas parecendo que eram o suficientemente robustos a menos de modificações de maior vulto nas condições hídricas da bacia incremental a montante.

Coube então, estabelecer análises de comparações desta última forma proposta, ou seja, do Modelo 3, com outras metodologias de previsão de vazões conhecidas e disponibilizadas para esse fim, o que será descrito no Capítulo 4 a continuação.

## CAPÍTULO 4

### COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DE OUTROS MODELOS

#### 4.1 – APLICAÇÃO DO MODELO HEURÍSTICO EM OUTROS PERÍODOS HIDROLÓGICOS

A partir dos resultados obtidos na aplicação metodológica apresentada no Capítulo 3, selecionou-se o Modelo 3 como aquele de menor desvio absoluto e resolveu-se aplicá-lo também para outros períodos hidrológicos por considerar que um ano médio pode não refletir altas variabilidades hidrológicas da bacia selecionada.

Conforme foi colocado no Capítulo anterior, para a realização dos estudos em ano seco, selecionou-se o período entre abril de 1985 e março de 1986, com vazão natural média anual (semanal) de 266 m<sup>3</sup>/s e vazão mínima semanal de 71 m<sup>3</sup>/s ocorrida entre 21/12/1985 e 27/12/1985, caracterizando-se como o menor valor semanal do histórico completo. Os resultados apresentam-se na figura 4.1.

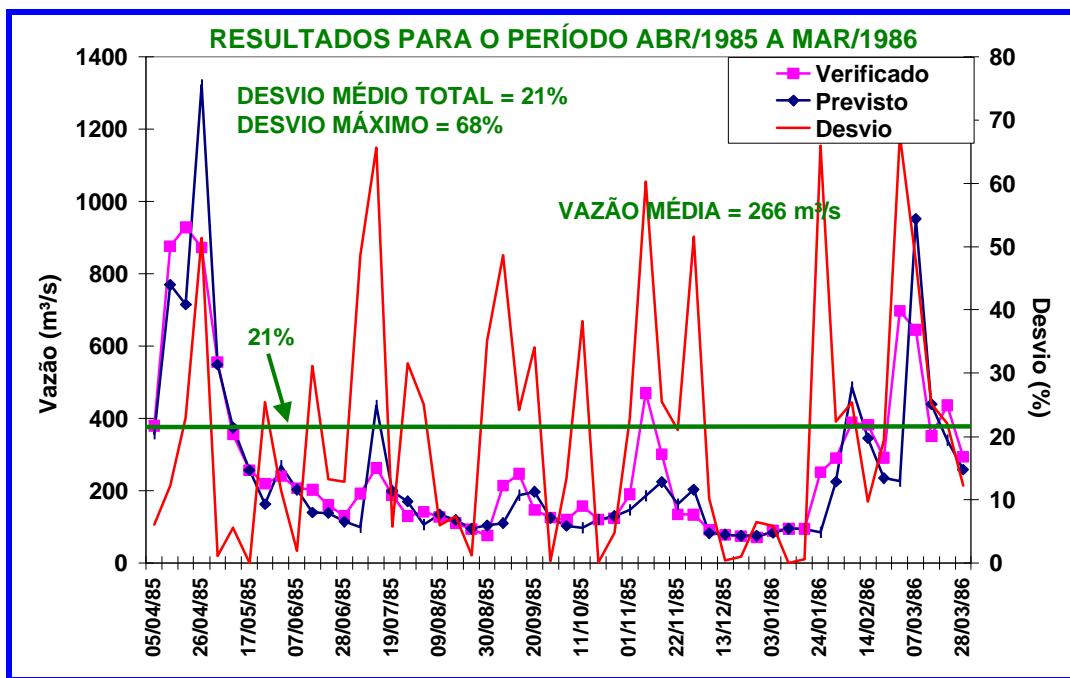
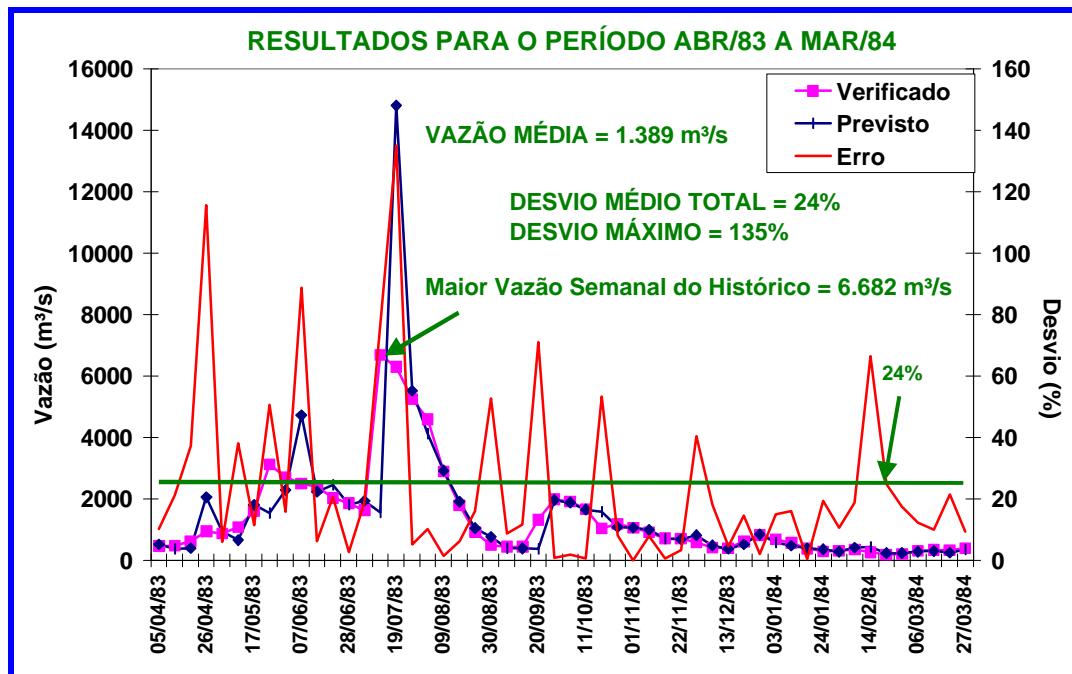


FIGURA 4.1 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO PARA ABRIL/85 A MARÇO/86

Observa-se que foi obtido um desvio absoluto médio total de 21%, um pouco superior aos 18% encontrados para o ano hidrológico médio, o que significa um resultado bastante razoável, posto que as situações mais complexas quando se trata de previsão de afluências podem vir a ocorrer em vazões extremas tanto por falta como por excesso de vazões. O maior desvio absoluto encontrado foi de 68% para a semana de 22/02/1986 a 28/02/1986. Observa-se também que das 52 semanas previstas há 24 valores de previsão com desvios superiores ao desvio médio de 21%, bem distribuídos ao longo do ano.

Em seguida procedeu-se à aplicação do modelo selecionado em ano úmido e para tal escolheu-se entre abril de 1983 e março de 1984, pois neste período que possui uma vazão natural média anual (semanal) de  $1.389 \text{ m}^3/\text{s}$ , encontra-se a máxima vazão semanal do histórico total, correspondente a  $6.682 \text{ m}^3/\text{s}$  ocorrida entre 06/07/1983 e 12/07/1983. Os resultados desta segunda verificação apresentam-se na figura 4.2.



**FIGURA 4.2 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO PARA ABRIL/83 A MARÇO/84**

Observa-se que foi obtido um desvio absoluto médio total de 24%, um pouco superior aos 21% encontrados para o ano hidrológico seco, o que significa um resultado aceitável, posto que de um modo geral as altas afluências são mais difíceis de prever do que as baixas. O maior desvio absoluto encontrado foi de 135% para a semana de 13/07/1983 a 19/07/1983. Observa-se também que das 52 semanas previstas há somente 13 valores de previsão com desvios superiores ao desvio médio de 24%, aparentemente mais concentrados no ano de 1983 onde ocorreu a maior cheia do histórico com o qual se trabalhou.

Considerando a necessidade de se realizarem previsões de afluências nas mais diferentes épocas do ano, em diversas condições hidrológicas, para os mais diferentes usos, como o abastecimento humano e de animais, a irrigação, a navegação, o controle de cheias, a operação de usinas hidrelétricas e outras atividades econômicas também importantes, o modelo proposto apresentou resultados bastante coerentes e aceitáveis para os padrões da Região Sul, considerada de difícil previsão.

Sabendo-se que o tempo de concentração para a bacia incremental a Foz do Areia está definido por algumas horas, acredita-se ser recomendável a adaptação desta metodologia para uma discretização diária, ou até mesmo horária, desde que se possa dispor de dados de vazões naturais médias diárias ou horárias que sejam plenamente confiáveis e consistidas, além de poder se dispor de dados, diários ou horários, de estações pluviométricas telemetrizadas, que permitam a aplicação da metodologia.

## 4.2 – OUTROS MODELOS SELECIONADOS

Para se garantir a confiabilidade na aplicação da metodologia proposta e verificar o ganho qualitativo destas previsões realizadas resolveu-se estabelecer dois tipos de comparação.

A primeira comparação foi realizada selecionando-se dentre o ano com hidrologia média, isto é, entre abril de 2000 e março de 2001, um subconjunto desse espaço temporal, correspondente às semanas entre a de 28/12/2000 e 29/03/2001.

Para esse período foi realizada uma comparação da aplicação da metodologia proposta neste modelo heurístico e os resultados obtidos para a aplicação de outros três modelos, todos eles modelos de previsão de vazões baseados em vazões somente, sendo estes o AR(2), selecionado pelo software Forecast Master Pro, o modelo PREVIVAZ utilizado oficialmente pelo ONS para as previsões para a Programação da Operação e o PREVIVAZH, em base diária, que também já vem sendo utilizado também pelo ONS para as previsões de vazões.

Depois para um período maior, isto é, o correspondente à hidrologia média, entre abril/2000 e março/2001 realizou-se uma segunda comparação do modelo selecionado somente com estes dois últimos modelos, o PREVIVAZ e o PREVIVAZH.

### 4.2.1 – O MODELO AR(2).

O software Forecast Master Pro, quando aplicado aos dados semanais de vazão de Foz do Areia entre janeiro de 1982 e março de 2000, selecionou dentre as opções de modelagem lá existentes o modelo AR(2) como aquele mais adequado para aquela série. Este modelo autoregressivo de ordem dois faz parte dos modelos propostos por Box e Jenkins (BOX e JENKINS, 1976), e o algoritmo de utilização pode se resumir nos seguintes passos :

Passo 1 : Baseado na série histórica, utiliza a transformação logarítmica das vazões

Passo 2 : Em seguida, realiza-se uma estimativa dos parâmetros dos modelos existentes no software utilizado e seleciona-se o melhor modelo, com

menor erro médio quadrático, com o objetivo de calcular as vazões do próximo instante de tempo.

Passo 3 : Em seguida procede-se ao calculo das vazões para a próxima semana, levando em consideração os valores dos dois últimos instantes de tempo.

Passo 4 : Finalmente retira-se a transformação para se obterem os valores de vazões desejada.

Passo 5 : Incorpora-se a semana verificada ao histórico e volta-se ao Passo 2 repetindo o processo até finalizar as previsões desejadas.

Sua formulação básica é a seguinte :

$$Z_t = a_t + \varnothing_1 Z_{t-1} + \varnothing_2 Z_{t-2} \quad (4.1)$$

Onde :  $Z_t$ ,  $Z_{t-1}$  e  $Z_{t-2}$  – Vazão no instante de tempo t, t-1 e t-2 respectivamente.

$\varnothing_1$  e  $\varnothing_2$  – Parâmetros do modelo AR(2) a serem obtidos no processo de calibragem do modelo com o histórico.

$a_t$  – Ruído Branco.

#### **4.2.2 – O MODELO PREVIVAZ.**

O modelo de previsão de vazões em base semanal, PREVIVAZ, foi desenvolvido pelo CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, entre julho de 1994 e julho de 1996, tendo sido realizados, durante o ano de 1997, os testes de validação no âmbito do antigo GCOL – Grupo Coordenador para a Operação Interligada elaborando-se um relatório final em março de 1998, no qual o modelo foi aceito pelos Agentes de Geração.

Posteriormente, com o surgimento de novos Agentes setoriais, incluindo entre eles a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, o MAE – Mercado Atacadista de Energia Elétrica e o ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, houve a

necessidade de submeter o modelo novamente a testes de validação dentro do novo contexto institucional.

O PREVIVAZ é um modelo estocástico de previsão de vazões em base semanal, que utiliza uma combinação de 94 possíveis alternativas entre estruturas de correlação periódica ou estacionária, métodos de estimação de parâmetros e tipos de transformações.

Os modelos estocásticos variam desde os clássicos autoregressivos AR(p), ou autoregressivos e de médias móveis ARMA(p,q) propostos na literatura (BOX e JENKINS, 1976) até modelos periódicos mais sofisticados como o modelo PARMA(p,q) (HIPEL e McLEOD, 1994), para os quais são admitidas investigações de até quarta ordem.

A formulação básica do modelo PARMA (p,q) pode ser escrita da forma como está apresentada em 4.2.

$$Z_t - \mathbf{m}_t = \sum_{i=1}^p \mathbf{f}_i^t (Z_{t-i} - \mathbf{m}_{t-i}) + a_t - \sum_{i=1}^q \mathbf{q}_i^t a_{t-i} \quad (4.2)$$

onde :  $Z_t$  – Vazão no instante de tempo t.

$\mathbf{f}$  e  $\mathbf{q}$  – Parâmetros a serem obtidos no processo de calibragem do modelo com o histórico.

$a_t$  – Ruído Branco.

$\mu_t$  – Média da variável  $Z_t$ .

Observa-se que caso esteja sendo utilizado pelo PREVIVAZ o modelo PAR(p) sua formulação é bastante semelhante, ficando excluída a parte referente às médias móveis, podendo ser explicitada conforme a fórmula 4.3.

$$Z_t - \mathbf{m}_t = \sum_{i=1}^p \mathbf{f}_i^t (Z_{t-i} - \mathbf{m}_{t-i}) + a_t \quad (4.3)$$

O algoritmo básico deste tipo de modelagem é a seguinte :

Passo 1 : Realizar, se indicado pelo usuário a transformação indicada (Box & Cox ou Logarítmica).

Passo 2 : Dividir a série transformada em duas metades e numa destas metades, para uma das 52 semanas, estima-se os de cada modelo proposto e verifica-se o resultado calculando-se o erro médio quadrático com a outra metade da série.

Passo 3 : Repetir o passo 2 com a outra metade e verificar o erro com a primeira metade.

Passo 4 : Calcular para cada uma das 52 semanas o erro total como a média dos dois erros médios quadráticos parciais obtidos nos passos 2 e 3 e selecionar como melhor modelo para aquela semana o que estiver com o menor erro total.

Passo 5 : A partir do modelo selecionado e dos parâmetros estimados nos passos anteriores, calcula-se a previsão para as seis semanas seguintes utilizando-se os últimos valores semanais verificados.

Passo 6 : Retirar a transformação dos resultados calculados para obter as vazões desejadas.

As vantagens deste modelo sua fácil utilização, a ampla gama de modelos investigados, o que confere mais credibilidade no que diz respeito à investigação estocástica e por último a possibilidade de melhoria futura integrando outras variáveis.

#### **4.2.3 – O MODELO PREVIVAZH.**

O modelo PREVIVAZH para previsão de vazões naturais médias diárias a serem utilizadas na Programação da Operação Diária do Sistema Hidroenergético Brasileiro, baseia-se na desagregação, em intervalos diários, das previsões de afluências semanais utilizadas na elaboração do Planejamento de Curto Prazo da Operação Hidroenergética do Sistema Interligado Brasileiro (. A metodologia de desagregação tem uma abordagem não paramétrica, e faz uso das últimas afluências diárias observadas, assim como de séries sintéticas de vazões diárias condicionadas às vazões observadas. A modelagem, além da vantagem da menor complexidade em relação aos modelos chuva-vazão, garante a preservação da estrutura de dependência temporal das previsões para as semanas usadas no Planejamento de Curto Prazo e incorpora as características do processo natural a nível diário, conforme tratado no modelo de geração de seqüências de vazões diárias.

O algoritmo do modelo de forma simplificada pode se resumir em duas fases.

Uma primeira de calibração com os seguintes passos :

Passo 1 : A partir a série semanal de vazões truncada, geram-se previsões semanais de vazões passadas.

Passo 2 : Com as previsões geradas no passo anterior, e de posse da série diária para esse período procede-se à calibração onde são determinados três parâmetros do modelo, a saber, fator de tendenciosidade (destinado a corrigir tendências de previsão super ou subestimadas), centil (parâmetro de calibração do modelo) e flag de correção (que indica uma ponderação entre a vazão semanal prevista e as vazões obtidas com a geração sintética de afluências baseada na tendência dos dois últimos dias.

Na segunda fase, de previsão são executados os seguintes passos :

Passo 1 : Gera-se com o modelo DIANA, condicionado às últimas duas afluências diárias observadas, um conjunto de M seqüências sintéticas de 7 vazões diárias,  $QD^m_i$ , com  $i=1, \dots, 7$  e  $m=1, \dots, M$ .

Passo 2 : Calcula-se a média semanal de cada uma das seqüências sintéticas  $QS^m$  como a média dos sete valores gerados em cada seqüência no passo 1.

Passo 3 : Do conjunto de M seqüências, seleciona-se aquela cuja vazão média semanal  $QS^m$  seja a mais próxima à  $QS$  (vazão semanal prevista pelo modelo estocástico semanal PREVIVAZ) para formar a previsão das vazões dos dias  $i=1, 2, \dots, 7$ .

O grau de discrepância entre a Previsão semanal e as afluências diárias observadas é avaliado localizando-se o valor desta previsão na distribuição de freqüências das M médias semanais.

As vantagens deste tipo de abordagem são a pequena quantidade de informações necessária e pequeno grau de complexidade do modelo, e que durante o processo de calibragem são retiradas as tendenciosidade existentes estabelecendo-se uma distribuição de pesos entre a previsão semanal e a previsão a partir da série sintética.

Ainda poderão ser implementadas duas melhorias neste modelo que são a inclusão de previsões de precipitação para minimizar os erros dos primeiros dias (já em curso por parte do CEPEL) e o uso do conceito de multivariabilidade na previsão, a partir do qual as previsões passam a ter uma interligação nas bacias onde estão inseridos os aproveitamentos.

## 4.3 – COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.3.1 – COMPARAÇÃO ENTRE JANEIRO E MARÇO DE 2001.

Na primeira comparação realizada, utilizou-se o histórico entre janeiro/1982 e dezembro/2000 para a estimação de melhores modelos e estimação dos respectivos parâmetros e para comparação realizam-se previsões para as semanas que encontram-se entre [28/12/2000 a 04/01/2001}] e [22/03/2001 a 28/03/2001].

Para o modelo AR(2) utilizado foram estimados os seguintes parâmetros apresentados na tabela 4.1 juntamente com os respectivos erros absolutos médios de obtidos na fase de verificação após a estimação dos parâmetros.

**TABELA 4.1 – PARÂMETROS ESTIMADOS PARA O MODELO AR(2) PARA O PERÍODO JAN/2001 – MAR/2001**

INÍCIO	FINAL	$\varnothing_1$	$\varnothing_2$	$a_t$
28/12/2000	04/01/2001	1,1220	-0,2856	1,0363
05/01/2001	11/01/2001	1,1215	-0,2854	1,0385
12/01/2001	18/01/2001	1,1208	-0,2848	1,0387
19/01/2001	25/01/2001	1,1189	-0,2826	1,0374
26/01/2001	01/02/2001	1,1195	-0,2831	1,0371
02/02/2001	08/02/2001	1,1203	-0,2839	1,0371
09/02/2001	15/02/2001	1,1196	-0,2829	1,0351
16/02/2001	22/02/2001	1,1200	-0,2831	1,0342
23/02/2001	01/03/2001	1,1193	-0,2818	1,0307
02/03/2001	08/03/2001	1,1204	-0,2828	1,0301
09/03/2001	15/03/2001	1,1211	-0,2836	1,0306
16/03/2001	22/03/2001	1,1216	-0,2843	1,0325
23/03/2001	29/03/2001	1,1212	-0,2839	1,0319

Há de se estranhar o fato de haver diferenças muito pequenas entre os parâmetros utilizados em cada semana pelo modelo AR(2) o que nos poderia indicar uma pequena variabilidade da série que na realidade acaba não se comprovando ficando o erro médio na fase de verificação em 28,6%.

Para o modelo PREVIVAZ, utilizou-se seu processo interno de calibração, estimação de parâmetros e seleção do melhor modelo para cada uma das 13 semanas para as quais se estabeleceu a comparação inicial de resultados. Os modelos selecionados apresentam-se na tabela 4.2 a seguir.

**TABELA 4.2 – MELHORES MODELOS SELECIONADOS PELO MODELO  
PREVIVAZ PARA O PERÍODO JAN/2001 – MAR/2001**

INÍCIO	FINAL	Modelo
28/12/2000	04/01/2001	PAR(2)
05/01/2001	11/01/2001	PAR(3)
12/01/2001	18/01/2001	PARMA(3,1)
19/01/2001	25/01/2001	PAR(3)
26/01/2001	01/02/2001	PARMA(3,1)
02/02/2001	08/02/2001	PARMA(3,1)
09/02/2001	15/02/2001	PARMA(3,1)
16/02/2001	22/02/2001	PARMA(3,1)
23/02/2001	01/03/2001	PARMA(1,1)
02/03/2001	08/03/2001	ARMA(1,1)
09/03/2001	15/03/2001	PAR(4)
16/03/2001	22/03/2001	PAR(4)
23/03/2001	29/03/2001	PAR(3)

Na fase de verificação dos erros foi obtido um erro absoluto médio de 26%, inferior ao erro obtido com o modelo AR(2) .

Para a execução do modelo PREVIVAZH, primeiramente realizou-se a calibração do modelo na qual utilizou-se um histórico de 1969 a 1995 para gerar previsões com o modelo PREVIVAZ, em base semanal para se obter valores entre 1996 e 1999. A partir destas previsões semanais e da série de vazões médias diárias, iniciou-se o processo de calibração, no qual foram determinados os parâmetros do modelo, a saber : Tendenciosidade : 1,091 (o modelo tende a superestimar as previsões em 9,1%), Centil : 0,060 (parâmetro de calibração do modelo) e Flag : 5 (significando que o modelo para esta série priorizará a geração de séries sintéticas geradas pelo modelo DIANA, em detrimento das previsões semanais que lhe serão fornecidas em tempo de execução). Ao final do processo de calibração ficou-se com um erro médio absoluto de aproximadamente 23,9%, ou seja bastante melhor que aquele obtido com o próprio PREVIVAZ.

O PREVIVAZH, em tese tem que melhorar ainda mais as previsões feitas com o modelo PREVIVAZ, e baseado nas séries sintéticas de afluências geradas pelo DIANA, traz os menores erros para os primeiros dias ficando os maiores erros para os últimos dias da semana que se deseja prever.

Os resultados da comparação das quatro opções de modelagem são apresentados na figura 4.3, onde observa-se que o modelo proposto neste trabalho obteve um erro absoluto médio de 13%, contra 17% do modelo PREVIVAZH, 22% do modelo AR(2), e 26% do modelo PREVIVAZ.

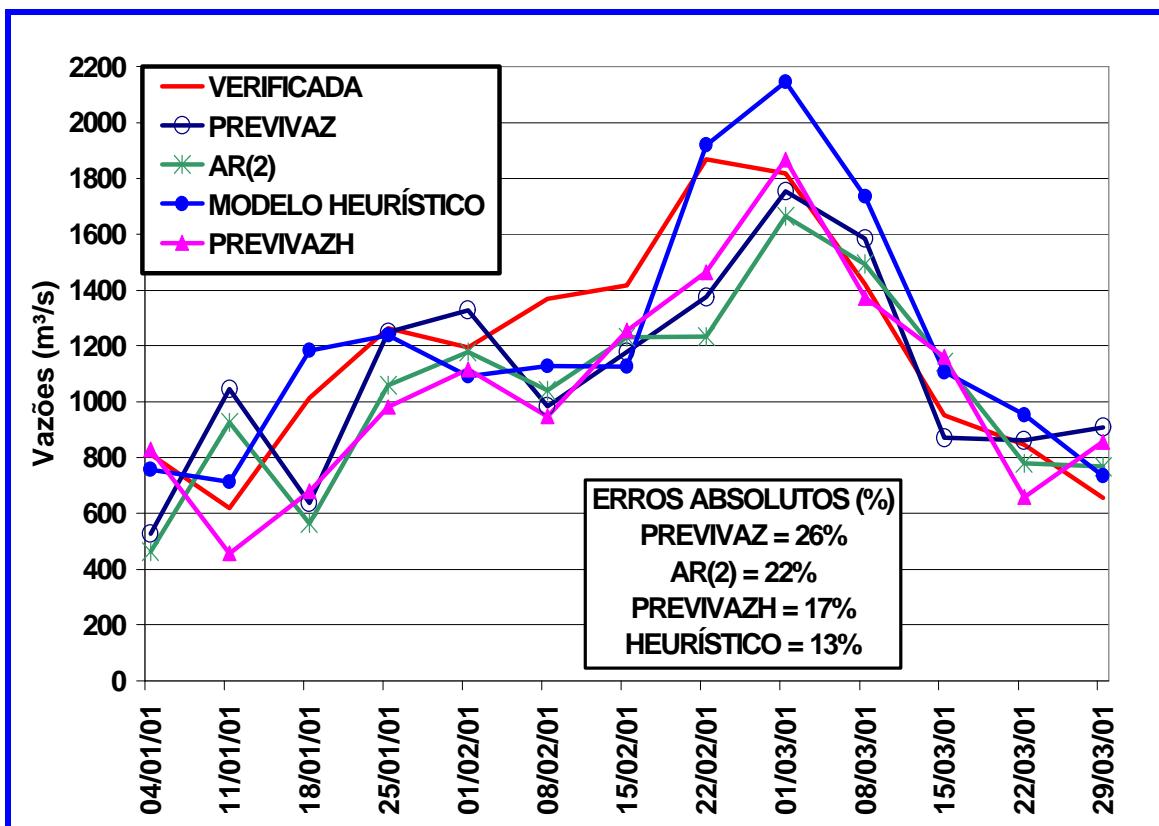


FIGURA 4.3 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO PARA JAN/2000 A MARÇO/2000

O erro elevado obtido com o modelo AR(2) pode ser explicado porque na proposta de modelagem utilizada, ingenuamente, o programa utilizado identificou automaticamente sempre o mesmo modelo e restringiu-se sua gama de pesquisa somente ao universo dos modelos autoregressivos e de médias móveis mais simples, podendo inclusive investigar somente até a terceira ordem. Essa hipótese simplificadora, serviu para mostrar que as outras três opções de modelagem por

serem mais evolutivas com o tempo e tendem a gerar previsões com menores erros médios absolutos.

O PREVIVAZ reavalia a cada nova semana todos os modelos que suas combinações permitem, redefinindo um novo melhor modelo para aquela semana e estimando os novos parâmetros para aquele modelo, por isso apesar de apresentar erros maiores neste período selecionado mostra-se mais robusto para realizar uma comparação ao longo de um ciclo hidrológico completo.

O modelo heurístico proposto neste trabalho acabou apresentando melhor resultados pois além de verificar a necessidade de redefinir os parâmetros a cada semana também utiliza a informação de chuva equivalente na bacia incremental, que para o caso do aproveitamento em questão tem bastante influência conforme apresentou-se no capítulo 3 deste documento.

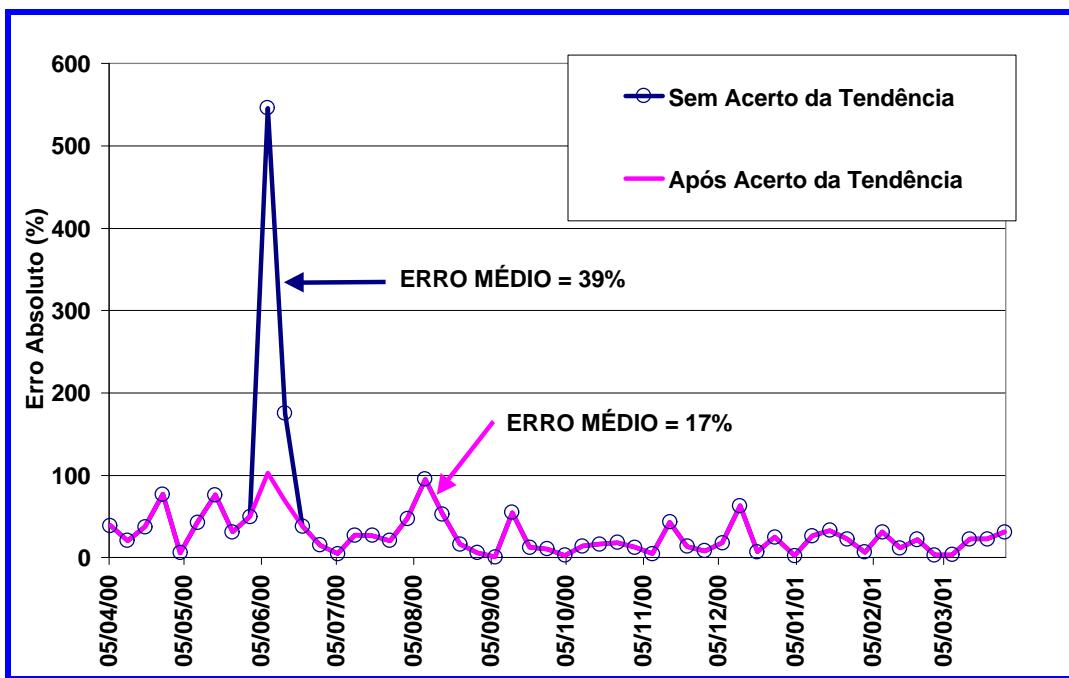
#### **4.3.2 – COMPARAÇÃO ENTRE ABRIL DE 2000 E MARÇO DE 2001 – ANO MÉDIO.**

Na segunda comparação realizada, utilizou-se o histórico entre janeiro/1982 e março/2000 para a estimação de melhores modelos e estimação dos respectivos parâmetros e para comparação realizam-se previsões para as 52 (cinquenta e duas) semanas que encontram-se entre [30/03/2000 a 05/04/2000] e [22/03/2001 a 28/03/2001].

Para o modelo PREVIVAZH, utilizaram-se os mesmos parâmetros já apresentados o item anterior, pois no processo de calibração não houve modificação porém em fase de execução houve um fato bastante curioso que cabe alertar.

Quando foi executado porém apresentou um erro absoluto médio de 39%, ou seja, bem superior ao erro apresentado pelo PREVIVAZ. Ao observar os erros obtidos observou-se que para as semanas entre 01/06/2000 e 07/06/2000 e 08/06/2000 e 14/06/2000 ocorreram erros de 546% e 175%, completamente desproporcionais aos demais erros. Investigou-se o real motivo destes desvios elevados e encontrou-se o motivo nos valores indicados como dois últimos dias passados verificados, que

permitem ao modelo calcular a tendência. Estes valores foram de 97 m<sup>3</sup>/s no dia 30/05/2000 e 269 m<sup>3</sup>/s no dia 31/05/2000, sinalizado ao modelo a necessidade de forte subida. Como estes valores foram reconstituídos através de balanço hídrico, sabe-se que há muito erro envolvendo estes dados. Em seguida substituiu-se a entrada de dados por médias móveis de quatro dias passados em vez de utilizar os valores passados pontuais e observou-se que o erro absoluto médio nas previsões destes dias seguintes caiu para 103% e 69% respectivamente, que apesar de serem valores elevados estão mais coerentes com os demais, caindo o erro absoluto total do período analisado para o patamar de 28%, conforme apresentado na figura 4.4.



**FIGURA 4.4 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO PARA ABR/2000 A MARÇO/2001**

Para o modelo PREVIVAZ foram encontrados, em seu processo de calibração automática os melhores modelos para as 52 semanas conforme apresentado na tabela 4.3.

**TABELA 4.3 – MELHORES MODELOS SELECIONADOS PELO MODELO  
PREVIVAZ PARA O PERÍODO ABR/2000 – MAR/2001**

SEMANA	INÍCIO	FINAL	MODELO
1	30/03/00	05/04/00	PAR(1)
2	06/04/00	12/04/00	PAR(1)
3	13/04/00	19/04/00	PAR(3)
4	20/04/00	26/04/00	PAR(3)
5	27/04/00	03/05/00	PAR(4)
6	04/05/00	10/05/00	PAR(1)
7	11/05/00	17/05/00	PAR(3)
8	18/05/00	24/05/00	PARMA(3,1)
9	25/05/00	31/05/00	PAR(1)
10	01/06/00	07/06/00	PARMA(1,1)
11	08/06/00	14/06/00	PARMA(1,1)
12	15/06/00	21/06/00	PARMA(3,1)
13	22/06/00	28/06/00	PAR(2)
14	29/06/00	05/07/00	PAR(4)
15	06/07/00	12/07/00	PAR(1)
16	13/07/00	19/07/00	PAR(1)
17	20/07/00	26/07/00	PAR(1)
18	27/07/00	02/08/00	PARMA(2,1)
19	03/08/00	09/08/00	PAR(1)
20	10/08/00	16/08/00	PAR(1)
21	17/08/00	23/08/00	PAR(2)
22	24/08/00	30/08/00	PAR(2)
23	31/08/00	06/09/00	ARMA(1,1)
24	07/09/00	13/09/00	PAR(3)
25	14/09/00	20/09/00	PAR(2)
26	21/09/00	27/09/00	PAR(4)
27	28/09/00	04/10/00	PAR(3)
28	05/10/00	11/10/00	PARMA(3,1)
29	12/10/00	18/10/00	PAR(3)
30	19/10/00	25/10/00	PAR(3)
31	26/10/00	01/11/00	PARMA(2,1)
32	02/11/00	08/11/00	PARMA(1,1)
33	09/11/00	15/11/00	PARMA(2,1)
34	16/11/00	22/11/00	PAR(4)
35	23/11/00	29/11/00	PAR(3)
36	30/11/00	06/12/00	PARMA(2,1)
37	07/12/00	13/12/00	ARMA(1,1)
38	14/12/00	20/12/00	PAR(4)
39	21/12/00	27/12/00	PAR(4)
40	29/12/00	04/01/01	PAR(2)
41	05/01/01	11/01/01	PAR(3)
42	12/01/01	18/01/01	PARMA(3,1)
43	19/01/01	25/01/01	PAR(3)
44	26/01/01	01/02/01	PARMA(3,1)

**TABELA 4.3 – MELHORES MODELOS SELECIONADOS PELO MODELO PREVIVAZ PARA O PERÍODO ABR/2000 – MAR/2001 – (Continuação)**

SEMANA	INÍCIO	FINAL	MODELO
45	02/02/01	08/02/01	PARMA(3,1)
46	09/02/01	15/02/01	PARMA(3,1)
47	16/02/01	22/02/01	PARMA(3,1)
48	23/02/01	29/02/01	PARMA(1,1)
49	01/03/01	07/03/01	ARMA(1,1)
50	11/03/01	17/03/01	PAR(4)
51	15/03/01	21/03/01	PAR(4)
52	22/03/01	28/03/01	PAR(3)

Observa-se uma vez mais que para as semanas utilizadas na comparação anterior os modelos selecionados foram os mesmos pois não foi incorporado nenhum novo ano para a calibração e obtenção de parâmetros.

Do mesmo modo também podemos destacar que para as 52 semanas calibradas, somente em 3 semanas foram selecionados modelos com estrutura de correlação estacionária, isto é, modelo não periódicos, o que indica a importância desta gama de modelos encontrar-se incluída no modelo PREVIVAZ.

Os resultados obtidos com os três modelos, o PREVIVAZ, o PREVIVAZH e o modelo heurístico proposto apresentam-se na tabela 4.4.

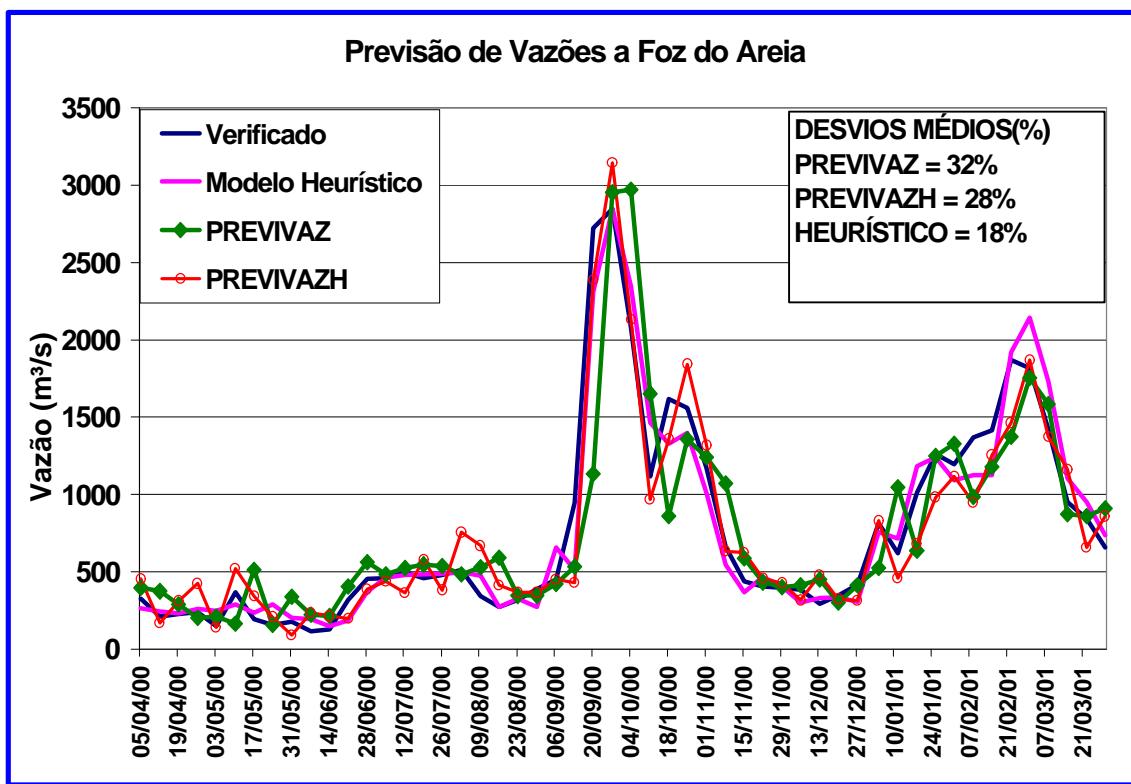
**TABELA 4.4 – RESULTADOS OBTIDOS ENTRE ABR/2000 E MAR/2001 COM OS TRÊS MODELOS SELECIONADOS**

SEMANA	INÍCIO	FINAL	PREVIVAZ	PREVIVAZH	HEURÍSTICO	VERIFICADO
1	30/03/00	05/04/00	395	454	262	327
2	06/04/00	12/04/00	374	168	243	211
3	13/04/00	19/04/00	291	310	228	226
4	20/04/00	26/04/00	203	425	260	240
5	27/04/00	03/05/00	210	140	247	148
6	04/05/00	10/05/00	167	521	290	365
7	11/05/00	17/05/00	510	341	234	194
8	18/05/00	24/05/00	157	208	289	159
9	25/05/00	31/05/00	340	89	199	176
10	01/06/00	07/06/00	221	235	192	116

**TABELA 4.4 – RESULTADOS OBTIDOS ENTRE ABR/2000 E MAR/2001 COM OS TRÊS MODELOS SELECIONADOS – (Continuação)**

SEMANA	INÍCIO	FINAL	PREVIVAZ	PREVIVAZH	HEURÍSTICO	VERIFICADO
11	08/06/00	14/06/00	214	214	147	127
12	15/06/00	21/06/00	406	198	187	319
13	22/06/00	28/06/00	561	388	371	455
14	29/06/00	05/07/00	485	437	463	457
15	06/07/00	12/07/00	527	362	478	496
16	13/07/00	19/07/00	547	580	482	459
17	20/07/00	26/07/00	537	381	486	478
18	27/07/00	02/08/00	485	754	494	512
19	03/08/00	09/08/00	530	668	473	342
20	10/08/00	16/08/00	589	412	271	270
21	17/08/00	23/08/00	344	366	326	315
22	24/08/00	30/08/00	344	366	275	387
23	31/08/00	06/09/00	422	449	654	451
24	07/09/00	13/09/00	533	430	514	947
25	14/09/00	20/09/00	1131	2386	2310	2721
26	21/09/00	27/09/00	2953	3145	2847	2848
27	28/09/00	04/10/00	2970	2132	2347	2077
28	05/10/00	11/10/00	1652	968	1467	1119
29	12/10/00	18/10/00	860	1358	1330	1617
30	19/10/00	25/10/00	1358	1842	1397	1560
31	26/10/00	01/11/00	1242	1318	1012	1172
32	02/11/00	08/11/00	1070	633	548	663
33	09/11/00	15/11/00	586	624	366	436
34	16/11/00	22/11/00	431	459	469	406
35	23/11/00	29/11/00	401	427	403	394
36	30/11/00	06/12/00	412	316	299	384
37	07/12/00	13/12/00	450	479	330	295
38	14/12/00	20/12/00	303	323	335	347
39	21/12/00	27/12/00	412	314	305	418
40	29/12/00	04/01/01	527	829	757	812
41	05/01/01	11/01/01	1045	457	712	619
42	12/01/01	18/01/01	637	678	1184	1013
43	19/01/01	25/01/01	1249	981	1239	1263
44	26/01/01	01/02/01	1329	1116	1093	1194
45	02/02/01	08/02/01	983	948	1127	1368
46	09/02/01	15/02/01	1178	1254	1126	1416
47	16/02/01	22/02/01	1374	1463	1919	1868
48	23/02/01	29/02/01	1754	1868	2146	1817
49	01/03/01	07/03/01	1584	1373	1735	1421
50	11/03/01	17/03/01	871	1161	1106	950
51	15/03/01	21/03/01	861	659	954	845
52	22/03/01	28/03/01	909	857	735	656

Estes resultados podem ser melhor visualizados de forma gráfica conforme apresenta-se na figura 4.5, na qual cabe destacar que os erros absolutos médios, elevaram-se para 32% no caso do modelo PREVIVAZ e 28% para o modelo PREVIVAZH alimentado com médias móveis em duas semanas nas quais identificou-se anteriormente na entrada de dados de vazões naturais médias diárias obtidas por balanço hídrico, informação inadequada pois apresentava variabilidade não condizente com a realidade. Para o modelo heurístico o erro absoluto médio aumentou para 18% ficando num patamar bastante aceitável.



**FIGURA 4.5 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO PARA ABR/2000 A MARÇO/2001**

Não foi selecionado o modelo AR(2) para a comparação neste período pois além de seu desempenho ficar inferior no período entre janeiro e março de 2001, parte de hipóteses simplificadoras de robustez não pesquisando outra gama maior de

modelagem o que acaba tornando o PREVIVAZ ao longo do tempo um modelo mais versátil e capaz de se adaptar às diversidades hidrológicas mais complexas de melhor maneira.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### **5.1 – CONCLUSÕES**

Após elaboração da pesquisa apresentada no presente trabalho pode-se chegar a seguintes conclusões :

- Sem um monitoramento adequado, pouco poderá se fazer para melhor conhecer os processos hidrológicos em nosso país, por isso, é necessário modernizar o controle sobre nossos rios principalmente em locais de interesse para usos múltiplos dos recursos hídricos.
- Ainda há muita pesquisa a ser desenvolvida no âmbito da previsão de vazões naturais médias semanais pois hoje se dispõe de poucas alternativas de modelagem já desenvolvidas.
- A informação de precipitação verificada traz um ganho qualitativo para as previsões de vazões médias semanais à UHE Foz do Areia e certamente deverá trazê-lo também para todas as bacias onde se comprove que há uma forte correlação entre a chuva e a vazão.
- Os métodos estocásticos de previsão de vazões semanais poderiam incluir a informação de precipitação observada, ou até mesmo prevista, para obter ganhos consideráveis nessas previsões.
- O método heurístico apresentado neste trabalho, mostrou um bom desempenho, pois, foi comparado aos modelos utilizados hoje pelo ONS e obteve menores erros absolutos médios.

- O método heurístico, aqui apresentado, mostrou-se o suficientemente robusto, pois foi aplicado a diferentes períodos hidrológicos com afluências baixas, médias e elevadas, obtendo valores de erros absolutos médios bastante semelhantes para os três períodos.
- O método heurístico, proposto neste trabalho, possui a vantagem de poder ser utilizado para locais para os quais não se possua uma série de vazões muito longa.
- O método heurístico, aplicado à previsão de vazões naturais semanais de um aproveitamento hidrelétrico possui a desvantagem de ser utilizado somente em locais com cobertura suficiente de monitoramento através de postos telemétricos ou mesmo convencionais capazes de permitir o cálculo da chuva equivalente no trecho incremental a montante pelo menos uma vez por semana o que por vezes pode torná-lo limitado para aplicação somente em algumas bacias que possuam essa característica de monitoramento adequado a seu uso.
- O modelo PREVIVAZH, para previsão de vazões naturais médias diárias possui como entrada de dados, os valores de vazões naturais dos dois últimos dias para utilizá-los como tendência, porém há de se ter muito cuidado com a obtenção dessa informação, tendo m vista que poderão haver erros na reconstituição de vazões naturais médias diárias que distorçam muito o valor das previsões de afluências.
- Quando do uso de modelos estocásticos não se aconselha restringir a modelagem a um subconjunto menor de modelos, mesmo atualizando os parâmetros a cada nova previsão, pois a pesquisa de modelos que incluem métodos baseados em

estrutura periódica de dados apresenta-se mais promissora em termos de resultados.

## 5.2 – RECOMENDAÇÕES

A partir das conclusões apresentadas no item anterior e com o intuito de contribuir para a descoberta de novos métodos que possam se constituir numa evolução no processo de previsão para todas as escalas recomenda-se :

- Reconstituir e consistir vazões naturais médias diárias por processos alternativos ao balanço hídrico, para que se possa primeiramente calibrar os modelos da forma mais correta, e em segunda instância para que se possa utilizar como tendência para os modelos estocásticos valores compatíveis com a realidade hidrológica da bacia sem que ocorram grandes distorções.
- Aplicar esta metodologia heurística para a previsão de vazões em base diária e se necessário horária e sua comparação com as atuais metodologias existentes, incluindo o modelo estocástico PREVIVAZH e até mesmo os sofisticados modelos chuva-vazão.
- Ampliar e modernizar o monitoramento das bacias hidrográficas nos trechos incrementais aso locais de aproveitamentos hidrelétricos para permitir o uso da metodologia heurística proposta.
- Investir na qualidade dos dados de chuva e vazão para melhorar o entendimento da resposta hidrológica das bacias à presença de chuva e aplicação mais confiável do modelo heurístico proposto.
- Ampliar esta metodologia heurística em base semanal para realizar previsões com horizonte maior utilizando a previsão de precipitação proveniente das rodadas de modelos climáticos global e regional.

- Investigar para outras bacias hidrográficas onde haja entrada de frentes frias e instabilidades com ocorrência de chuvas freqüentes, outras relações matemáticas heurísticas que permitam uma previsão de vazões com resultados consistentes.
- Utilizar esta metodologia proposta para o preenchimento de falhas pontuais nas vazões naturais passadas.

## REFERÊNCIAS BIBILOGRÁFICAS

BALLINI, R., 2000, Análise e Previsão de Vazões Utilizando Modelos de Séries Temporais, Redes Neurais e Redes Neurais Nebulosas, UNICAMP - SP, 169 páginas.

BOX, G.E.P. , JENKINS G.M., 1976, Time Series Analisys, Forecasting and Control, Holden Day, 575 páginas.

BUBA, H., 1989, Avaliação de modelos de previsão de vazões para a operação hidráulica de reservatórios a curto prazo - Tese de Mestrado - UFPR. Curitiba, CEHPAR, 125 páginas.

CHOW, V. T., 1964, Handbook of applied hydrology, MacGraw-Hill Book Co., New York.

COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M., 2001, Simulação Hidrológica de Grandes Bacias, Revista da ABRH, vol 6, no. 1, Jan-Mar/2001, p.p. 95-118.

COPEL - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 1995, Usina Hidrelétrica Foz do Areia, rio Iguaçu, Paraná, Brasil: memória técnica. Curitiba : COPEL, . 280 páginas.

CORNUAU, P., VIDAL, J.J., ROY, J.L., 2002, Utilisation du radar pluviométrique pour l'annonce des crues dans le bassin supérieur de la Garonne, Revista La Houille Blanche, no.2, p.p. 60-63.

CRAWFORD, N.H., LINDSLEY JR., R.K., 1966, Digital Simulation in Hydrology, Stanford Watershed Model IV, Department of Civil Engeneering, Stanford University, tech. Report, no. 39.

DE CARVALHO, A.L., 2001, Previsão de afluências diárias para um horizonte de 1 a 7 dias através de uma abordagem estocástica - modelo PREVIVAZH - Tese de Mestrado, COPPE - UFRJ.

DE CARVALHO, A.L., COSTA F.da S., DAMÁZIO, J.M., GUILHON, L.G.F., 2001, In: Anais do XIV Simpósio Nacional de Recursos Hídricos, Aracaju – SE, 15 páginas.

DIAS, N. L. C., FILL, H. D., ARAÚJO, A. A., 1996, Projeto HG-79. Análise do escoamento em regime não-permanente no rio Iguaçu entre Fluviópolis e Foz do Areia : relatório técnico n. 05. Curitiba : CEHPAR.

DOWNLING, D., CLARK, J., 1998, Estatística Aplicada, Editora Saraiva, 455 páginas.

ELETROBRÁS - SCEN - GTMC, 1980, Sistema de Previsão de Vazões Médias Mensais para o Programa de Operação, 190 páginas.

ELETROBRÁS, 1999, SIPOT - Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro.

FILL, HEINZ DIETER et al, 2001, Hidrometria Aplicada, LACTEC, 372 páginas.

GARÇON, R., 2002, L'imagerie satellitaire et radar pour la prévision hydrologique : l'expérience d'EDF, Revista La Houille Blanche, no.2, p.p. 69-72.

GEORGAKAKOS, A., YAO, H., 2001, Assessment of Folsom Lake Response to Historical and Potential Future Climate Scenarios, *Journal of Hydrology*, August 2001, vol 249, p.p. 176-196.

GÜETTER, A. K., ZAIKOVSKI, M.B., PILANTIR, J.O., 2000, Variabilidade Climática Interanual e Efeitos das Mudanças Climáticas Globais na Bacia do Rio Paraná, SIMEPAR / ANEEL / PNUD / MCT, 209 páginas.

HIPEL, K.W., McLEOD,A.I., 1994, *Developments in Water Science*, Elsevier Science B.V., Netherlands, 1013 páginas.

LOPES, J. E., BRAGA B.F.F., CONEJO, J.L., 1982, A Simplified Hydrologic Model in Applied Modeling in Catchment Hydrology, *Water Resources Publication*.

LUDERMIR, T. et al, 1999, *Sistemas Inteligentes*, Editora Universidade - UFRGS, 246 páginas.

LUDERMIR, T., VALENÇA, M., 2000, Neural Networks vs. PARMA Modelling: Case studies of river flow prediction, *VIIth Brazilian Symposium on Neural Networks*, pp. 113-116.

LUDERMIR, T., VALENÇA, M., 2001, Multivariate Modelling of Water Resources Time Series Using Constructive Neural Networks, *V Brazilian Conference on Neural Networks - Rio de Janeiro - RJ*, pp. 163-168.

LUDERMIR T., VALENÇA, M., GUILHON, L.G.F., 2001, Previsão de Vazões Mensais Utilizando Redes Neurais, *XVI SNPTEE - Campinas - SP*, 6 páginas.

MILDER-KAISER ENGENHARIA, 1975, Cheias em União da Vitória : usina hidrelétrica de Foz do Areia, rio Iguaçu, Paraná, Brasil. Curitiba; Milder-Kaiser Engenharia, Memorando de Projeto n. 10.

MILDER-KAISER ENGENHARIA, 1976, Influência do reservatório Foz do Areia sobre cheias de União da Vitória: projeto Foz do Areia, rio Iguaçu, Paraná, Brasil. Curitiba : Milder-Kaiser Engenharia, suplemento ao memorando de Projeto n. 10.

MINE, M. R. M., 1980, Projeto HG-43. Previsão de cheias em Foz do Areia. Curitiba: Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza.

MINE, M. R. M., 1984, Modelos estocásticos lineares para previsão de cheias em tempo-real - Tese de Mestrado - USP, São Paulo, 127 páginas.

MINE, M. R. M., . 1986, Projeto HG-51. Análise hidrológica e matemática de operação de reservatórios: previsão de vazões de cheias em União da Vitória. Relatório nº 2. Curitiba, Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza - CEHPAR.

MINE, M. R. M. , 1987, Projeto HG-51. Análise hidrológica e matemática de operação de reservatórios: previsão de vazões de cheias em Foz do Areia. Curitiba: Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza - CEHPAR.

MINE, M. R. M., 1998, Método determinístico para minimizar o conflito entre geração e de energia e controle de cheias - Tese de Doutorado - IPH/UFRGS.

ONS, 2001, Relatório Anual de Previsão de Vazões, 32 páginas.

OUARDA, T.B.M.J., LANG,M., BOBÉE, B., BERNIER, J., BOIS, P., 1997, Synthèse de Modèles Régionaux D'Estimation de Crues utilisés en France et au Québec, Revue des Sciences de l'Eau, Octobre – 1997, 44 páginas.

OUARDA, T.B.M.J., GIRARD, C., CAVADIAS, G.S., BOBÉE, B., 2001, Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis, Journal of Hydrology, December-2001, vol. 254, p.p. 157-173.

SHEPARD, D., 1968, A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data, Proceeding of 23rd. National Conference ACM, pp. 517-524.

SUGAI, M. R. VON B., 1980, Influência do reservatório de Foz do Areia sobre níveis de enchentes em União da Vitória. Curitiba : COPEL, 53 páginas.

SUGAI, M. R. VON B., MASSUCCI, L. A., BUSETI, D. C., SANTOS, A. F., 1985, Influência do reservatório de Foz do Areia sobre níveis de enchentes em União da Vitória : revisão e atualização. Curitiba : COPEL.

TUCCI, C. E.M. et al, 1993, Hidrologia, ABRH, 943 páginas.

TUCCI, C. E. M., 1993, Avaliação do efeito de Foz do Areia sobre as enchentes em União da Vitória/Porto Vitória: CORPRERI, 25 páginas.

TUCCI, C. E. M., VILLANUEVA, A O N., 1997, Controle de enchentes das cidades de União da Vitória e Porto União. União da Vitória : CORPRERI, 117 páginas.

TUCCI, C.E.M., 1998, Modelos Hidrológicos, Editora da UFRGS - ABRH, 669 páginas.

URBAN, T., 2000, A Crônica Degradação do Rio Iguaçu, ([www.spvs.org.br](http://www.spvs.org.br)).

US ARMY ENGINEER DIVISION, 1972, Program description and user manual for SSARR, North Pacific, Portland Oregon.

VALENÇA, M.J.S., VASCONCELOS, G. C., 1997, Estudo Comparativo dos Modelos Box-Jenkins, Redes Neurais e Regressão Múltipla na Previsão de Vazões, IV Simpósio Brasileiro de Redes Neurais - Goiania - GO, pp.55-57.

WANG, Z.M., VANDEWIELE, G.L., 1994, Forecast ad Monte Carlo simulation of Zaire River Flow, Hydrology continental, vol. 9, no. 1, p.p. 69-83.

YEVJEVICH, V.M., 1972, Structural Analysis of Hydrologic Time Series, Hidrology Papers, Colorado State University, Fort Collins.

## REFERÊNCIAS NA INTERNET

CWRA – <http://www.cwra.org/publicat/arts/techbrs>, 2002

DHI – [http://staff.dhi.dk/ghj/modeling\\_body.htm](http://staff.dhi.dk/ghj/modeling_body.htm), 2002

HIDROCAMP – <http://www.hydrocamp.com/HFAMinfo.htm>, 2002

HYDROSOFT – <http://www.hydrosoftenergie.com>, 2001

HYMET – <http://www.hymet.com/colnex1.htm>, 2002

MNPOWER - <http://www.mnpower.com/wintonlicensing/pdf/r.pdf>, 2002

NOAA1 – <http://www.erh.noaa.gov/er/ohrfc/theory.html>, 2002

NOOA2 - <http://www.erh.noaa.gov/er/ohrfc/models.html>, 2001

ROYAL SOCIETY -- <http://www.royalsoc.au.uk/policy/IDNDR/rodda.pdf>, 2001

USGS – <http://www.wa.water.usgs.gov/ssarrmenu>, 2001

WRC – <http://www.wrc.org.za/wrcpublications/wrcsanciohs/vdspry.html>, 2002