

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Motivação

Ao contrário da maioria dos países, o sistema hidroelétrico é responsável por 83,7% da energia elétrica gerada no Brasil [1]. Desta maneira, esta geração de energia depende basicamente das vazões naturais que afluem aos aproveitamentos hidroelétricos distribuídos por doze bacias hidrográficas ou, de modo mais amplo, das vazões fluviais dos rios que compõem essas bacias.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável por elaborar a previsão e a geração de cenários de vazões naturais médias diárias, semanais e mensais para todos os locais de aproveitamentos hidroelétricos no país. Ele é o responsável pelo planejamento e programação da operação dos recursos de geração e transmissão, integrantes do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nessas atividades de planejamento e programação são adotados modelos energéticos e/ou hidráulicos de simulação e otimização, que utilizam a vazão natural prevista e/ou verificada como dado de entrada para obter resultados que indiquem a mais adequada e/ou ótima situação de armazenamento, de defluência e de geração dos aproveitamentos hidroelétricos, a cada passo de tempo. Sendo assim, a qualidade das previsões de vazões impacta diretamente no planejamento e em programas de operação do SIN, tais como o Programa Mensal de Operação (PMO), que se constitui na referência técnica mensal para definição das metas de geração de todas as usinas hidroelétricas, termelétricas e nucleares integrantes do SIN.

Nas últimas décadas, as diferentes tecnologias de modelagem (ver Apêndice 1), para reproduzir os fenômenos naturais, têm evoluído continuamente, propiciando, naturalmente, uma expressiva melhoria na qualidade dos modelos de previsão, sejam eles determinísticos ou estocásticos. Contudo, no que se refere à previsão de vazões no Brasil, os erros ainda são bastante significativos, conforme se pode notar na seção 1.1.1, a seguir.

### 1.1.1

#### Previsão Hidrológica no Âmbito do SIN

As previsões de vazões naturais, para todos os locais de aproveitamentos hidroelétricos do SIN [2], são obtidas com a participação dos agentes de geração responsáveis por essas instalações, para dois horizontes temporais: de curtíssimo prazo, até 12 dias, com discretização em valores médios diários, para fins de programação diária; e de curto prazo, até seis semanas, por meio de valores médios semanais, para o planejamento de curto prazo da operação eletroenergética.

Os modelos de previsão de vazões atualmente utilizados para todos os locais de aproveitamento, à exceção do aproveitamento de Sobradinho, na bacia do rio São Francisco, são os modelos estocásticos **PREVIVAZ** [3] e **PREVIVAZH** [4], sendo, o primeiro, voltado para a previsão de vazões médias semanais e o segundo para a previsão de vazões médias diárias. Ambos utilizam modelos lineares do tipo **PARMA** (p,q) [5], acoplados a diferentes pré-transformações das séries históricas, tipo Box-Cox ou logarítmicas [6] e a diferentes formas de estimação de parâmetros dos modelos. Consideram como entradas apenas as informações históricas de vazões naturais observadas nos locais de aproveitamentos hidrelétricos.

A análise de desempenho disponível destes modelos, ao longo dos últimos anos, mostra que, para a previsão de vazões médias semanais (uma semana à frente), os erros médios absolutos percentuais (índice MAPE – Apêndice 9) variam de 12% a 68%, para o período de 1997 a 2004. No caso da previsão de vazões médias diárias, de 10% a 52%, para os anos 2000 e 2001, considerando um dia à frente. A Tabela 1.1 apresenta os índices MAPE dos modelos de previsão de vazões naturais médias semanais (**PREVIVAZ**) e diárias (**PREVIVAZH**) em alguns locais de aproveitamento.

Tabela 1.2: Índices MAPE (%) dos modelos de previsão de vazões PREVIVAZ (de 1997 a 2004) e PREVIVAZH (de 2000 a 2001)

Usina	MAPE PREVIVAZ (%)	MAPE PREVIVAZH (%)
Tucuruí	12,3	10,2
Itaipu	15,5	30,4
S.Simão	18,4	17,7
Marimbondo	20,9	16,2
S.Grande	21,6	12,9
Furnas	27,9	24,2
Paraibuna	28,6	37,2
Três Marias	35,3	31,8
S.Mesa	35,4	51,7
Foz do Areia	38,0	12,2
Passo Real	42,0	27,9
Itá	67,6	Não avaliado

### 1.1.2

#### Previsão Hidrológica Usando Redes Neurais, Chuvas Observadas e Previstas

Com o objetivo de superar as deficiências dos modelos matemáticos de previsão de vazão, pôde-se registrar um aumento significativo, nos últimos anos, do número de trabalhos que utilizam modelos baseados em redes neurais [7-13], e do número de trabalhos [14-20] que agregam, à filosofia de redes neurais e histórico de vazões, informações de chuvas (observadas e previstas) nos locais dos aproveitamentos.

Como motivação para o uso, neste trabalho, de Redes Neurais Artificiais, pode-se destacar, dentre os já citados, os seguintes resultados de previsões de vazões, onde modelos baseados em Redes Neurais foram bastante superiores aos modelos tradicionais de Regressão Múltipla e modelos lineares de séries temporais usando metodologia Box e Jenkins:

- em [7], há uma avaliação da aplicação de Redes Perceptron Multicamadas na previsão hidrológica de vazões médias mensais no reservatório brasileiro de Sobradinho. Os resultados obtidos são comparados com aqueles encontrados com a utilização de técnicas estatísticas tradicionais de Regressão Múltipla e metodologia Box e Jenkins (atualmente em uso pelo setor elétrico). Os dados disponíveis são os valores de vazões mensais observados no período de 1931 a

1994. A tabela abaixo mostra os resultados por meio das métricas de erro (ver Apêndice 9) MAPE (%), RMSE ( $m^3/s$ ), e erro médio absoluto – MAE ( $m^3/s$ ).

Tabela 1.2: Resultados dos modelos de previsão de vazões médias semanais

	Box e Jenkins	Regressão Múltipla	Rede Neural
MAE	584	567	463
MAPE	20,7	19,9	16,8
RMSE	1040	1004	837

- em [9] um modelo baseado em Redes Neurais Construtivas (NSRBN – Non-linear Sigmoidal Regression Blocks Networks) foi comparado a um modelo linear de séries temporais PARMA (Periodic Autoregressive Moving Average), na previsão de vazões médias semanais de entrada de quatro hidroelétricas no Brasil: Passo Real no Rio Jacuí a 210 km de Porto Alegre (dados históricos de vazão afluente de 1931 a 1997); Furnas no Rio Grande, Distrito de Alpinópolis, região sudeste do Estado de Minas Gerais (dados históricos de vazão afluente de 1973 a 1997); Sobradinho no Rio São Francisco, Estado da Bahia (dados históricos de vazão afluente de 1931 a 1997); Salto Santiago no Rio Iguaçu, a 340 km de Curitiba. A tabela a seguir mostra os resultados por meio das métricas de erro MAPE, RMSE, e MAE.

Tabela 1.3: Resultados dos modelos de previsão de vazões médias semanais NSRBN e PARMA

Hidroelétrica	NSRBN			PARMA		
	MAPE	MAE	RMSE	MAPE	MAE	RMSE
Sobradinho	13,0	283	482	14,1	304	518
Passo Real	36,2	152	316	44,6	159	323
Furnas	22,3	285	551	23,3	290	635
Salto Santiago	30,5	516	817	33,7	520	827

- em [11], também, um modelo baseado em Redes Neurais Construtivas (NSRBN – Non-linear Sigmoidal Regression Blocks Networks) foi comparado a um modelo linear de séries temporais PARMA (Periodic Autoregressive Moving Average), na previsão de vazões médias mensais de entrada, em 37 hidroelétricas brasileiras, localizadas em diferentes bacias. Os resultados mostram que o modelo NSRBN se saiu significativamente melhor do que o modelo PARMA.

Em relação ao uso de informações de precipitação (chuvas observadas e previstas) aliado ao histórico de informações de vazão a serem processados em modelos baseados em Redes Neurais Artificiais, pode-se destacar [19], onde

Andreolli confirmou a melhoria na previsão de vazões com o uso integrado de informações de chuvas previstas e [20] onde é confirmada a importância das chuvas observadas.

Em relação ao uso de Transformadas Wavelets nesta dissertação, a motivação advém de ótimos resultados quando da aplicação dessas transformadas na previsão de séries temporais aliadas ou em auxílio às Redes Neurais. Dentre os trabalhos que obtiveram excelentes resultados, pode-se citar:

- em [21], para previsão de carga em curto prazo, explora-se a propriedade de multiresolução da transformada wavelet, efetuando-se uma pré-decomposição de uma série temporal de carga, antes de a mesma ser enviada para uma rede neural Multilayer Perceptron, onde, então, é efetuada a previsão.

- em [22], utiliza-se a técnica de decomposição por transformadas wavelets para o pré-tratamento de séries temporais de vazões. Neste trabalho são decompostas as séries de vazões na Bacia de Tirso, Sardênia – Itália, antes das mesmas serem processadas por redes neurais, que efetuam as previsões.

## 1.2

### Objetivos

O objetivo principal desta dissertação foi desenvolver um modelo de previsão de vazões baseado em Redes Neurais Artificiais, empregando Transformadas Wavelets como ferramenta de pré-processamento de dados. Adicionalmente, além do uso de dados históricos de vazão, avaliou-se a eficiência de incorporar ao modelo informações de precipitações observadas na bacia e precipitações previstas para a bacia por um modelo de previsão climática (ETA [23]).

Desejou-se, com tais implementações, melhorar a qualidade das previsões de vazão natural nas bacias hidrográficas do Brasil, qualidade essa fundamental para o ONS, entidade responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Como estudo de caso, empregou-se o trecho Itaipu da Bacia do Paraná.

### 1.3

#### Descrição do Trabalho

Este trabalho consiste em uma introdução sobre os principais modelos hidrológicos existentes, incluindo uma rápida descrição do modelo atmosférico ETA [23], cujas informações de chuvas previstas, no trecho Itaipu da Bacia do Paraná, são utilizadas neste trabalho. Consiste, ainda, em uma revisão de métodos e modelos, onde são abrangidos temas como seleção de variáveis, Redes Neurais Artificiais (RNA), análise de Fourier e Wavelets; na implementação de um sistema de previsão de vazão baseado em Redes Neurais e incrementado por Wavelets e na sua aplicação em um estudo de caso no qual são realizadas previsões de curtíssimo e curto prazo. O estudo sobre RNA e Wavelets compreendeu um resumo dos principais conceitos nas duas áreas.

A metodologia Wavelets, como será visto adiante, tem como foco e trata somente as entradas da rede neural, no intuito de melhorar o reconhecimento e a análise de seus padrões e suas variações por parte da própria rede. Resumidamente, essa metodologia decompõe as entradas da rede em frequências, permitindo a rede enxergar as variações frequenciais das entradas ao longo do tempo.

Pelo fato de existirem vários tipos de decomposição Wavelet, após alguns testes realizados, foi escolhida a decomposição por Wavelet-mãe do tipo *Daubechies* [24]. É importante salientar que a eficácia da decomposição Wavelet só pôde ser avaliada neste trabalho depois das entradas decompostas terem passado pela rede neural e o resultado da previsão avaliado.

Em relação às RNA, verificou-se que a maioria das aplicações em previsão de vazão utilizava redes multicamadas, consistindo em geral de uma única camada escondida, treinada com o algoritmo de aprendizado supervisionado *Levenberg-Marquardt (LM)* [25], uma variação do Back-Propagation, embora alguns autores propusessem variações. Em geral, os trabalhos nesta área apresentam como entradas básicas da rede neural os valores anteriores da série de previsão e abrangem tanto a previsão de curto prazo (até poucos dias à frente), quanto de médio a longo prazo (semanas e meses à frente).

Em relação à modelagem de redes neurais, implementou-se um sistema de previsão de vazão baseado nas metodologias propostas e verificou-se o

desempenho do sistema aplicado à Bacia Hidrográfica do Rio Paraná – Trecho Itaipu. Foram testadas várias estruturas e tipos de redes neurais, considerando modificações na topologia da rede e no tipo de aprendizado, alterando-se as seguintes características: variáveis de entrada e seu número, número de neurônios na camada escondida; tipo de treinamento e número de épocas de treinamento. Foram estabelecidos dois horizontes de previsão de vazão: de 1 até 12 dias à frente e previsões médias semanais. As previsões médias semanais foram três: a primeira foi realizada pela média aritmética das vazões do 4º ao 10º dia à frente, a segunda pela média do 5º ao 11º dia à frente, e a terceira do 6º ao 12º dia à frente. Esta limitação em 12 dias deve-se a um declínio observado na qualidade das previsões de precipitação, quanto maior for o horizonte, apesar dos avanços tecnológicos alcançados na última década. Já as previsões médias semanais se devem ao fato de que, no âmbito dos processos de planejamento e programação da operação do SIN, destaca-se como um de seus principais produtos o Programa Mensal de Operação (PMO). Este documento se constitui em uma referência técnica mensal, com revisão semanal, para as metas de geração de todas as usinas hidroelétricas, termelétricas e nucleares integrantes do SIN. Para a elaboração do PMO e suas revisões, um dos principais insumos é a previsão de vazões semanais para todos os locais de aproveitamento hidroelétrico.

Antes, no entanto, de iniciar-se o desenvolvimento do ambiente computacional, procedeu-se a limpeza e o pré-processamento dos dados das séries históricas acima designadas. Pelo fato das séries históricas de previsão de chuva acumulada em 24 horas (previsão realizada pelo modelo ETA), aqui denominadas *Chuvas ETA*, estarem limitadas ao período de 1996 a 2001, todas as outras séries ficaram limitadas a este período.

Na fase de pré-processamento dos dados, entre outras atividades, foram completadas as séries que apresentaram falta de dados para determinados dias, foi realizada a seleção de variáveis (dados históricos) e a normalização de dados.

Depois de agrupados os dados, algumas séries foram tratadas por um módulo de decomposição wavelet antes de constituírem as entradas de um módulo de previsão composto por redes neurais. Outras séries, entretanto, não foram submetidas ao módulo wavelet, sendo encaminhadas diretamente ao módulo de redes neurais. A intenção foi fazer comparações entre os resultados obtidos com os dados tratados pelo módulo de wavelet e os resultados obtidos

com os não tratados. Depois de realizada a previsão de vazões, os resultados foram então avaliados, segundo o índice MAPE.

Os resultados obtidos demonstraram mais uma vez a grande capacidade das redes neurais na previsão de vazões e a melhoria substancial de qualidade que a metodologia Wavelets traz para a previsão de vazão, quando unida à modelagem por redes neurais. Revelaram ainda, a inépcia do modelo de precipitações previstas (Chuvadas ETA) nas previsões desta bacia. Isso tudo para ambos os horizontes de previsão.

Espera-se que a melhor estrutura (em relação à wavelet e redes neurais) encontrada para esse trecho da bacia do Rio Paraná, relacionada com os menores erros de previsão encontrados, possa também ser aproveitada nos demais trechos de aproveitamento hidrelétrico das bacias do país.

#### 1.4

#### **Organização da Dissertação**

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos adicionais, descritos a seguir.

O capítulo 2 descreve alguns dos principais modelos hidrológicos existentes. É importante salientar que termos hidrológicos, tais como, jusante, montante, vazão natural e vazão incremental, imprescindíveis à compreensão deste capítulo 2 e do restante do trabalho, são explicados no Apêndice 1.

O capítulo 3 descreve os modelos de seleção de variáveis, wavelets, redes neurais e Fourier, modelos estes responsáveis pela seleção, agrupamento, filtragem, tratamento e análise (previsão de vazão) de dados.

No capítulo 4, descreve-se em detalhes a estrutura e o funcionamento do modelo de previsão de vazão – MIP (Modelo Inteligente de Previsão), apto a realizar as previsões em quaisquer regiões de aproveitamento hidroelétrico das bacias hidrográficas do país. Este modelo é composto por três módulos: módulo 1 – seleção e agrupamento dos dados (construção dos vetores de entrada das redes neurais); módulo 2 – decomposição dos dados (módulo wavelet); módulo 3 – previsão das vazões por redes neurais.

No capítulo 5 apresenta-se, então, um estudo de caso que, em princípio, tem por objetivo avaliar a eficiência do modelo criado. Além disso, nesse capítulo são



realizados todos os testes para se chegar a uma conclusão sobre qual estrutura de rede neural se adapta melhor ao caso em estudo, ou seja, melhor se adapta à previsão de vazões naturais diárias e semanais incrementais entre as UHE Porto Primavera, Rosana e Itaipu. Também são feitas várias previsões, vários testes preliminares para se chegar a uma conclusão sobre qual a melhor estrutura wavelet a ser empregada.

O capítulo 6 discorre sobre as conclusões gerais alcançadas neste estudo, mencionando a eficiência da modelagem por redes neurais com a utilização das wavelets, designando suas melhores estruturas e finalmente orientando sobre trabalhos futuros que possam completar, agregar valor a este, ou mesmo, que possam ser pioneiros na área.