

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO
EEEC

PRISCILA BRANQUINHO XAVIER

Análise e Comparação de Modelos de
Previsão de Vazões para o
Planejamento Energético, Utilizando
Séries Temporais

Goiânia
2009

PRISCILA BRANQUINHO XAVIER

Análise e Comparação de Modelos de Previsão de Vazões para o Planejamento Energético, Utilizando Séries Temporais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Gelson da Cruz Júnior

Goiânia
2009

PRISCILA BRANQUINHO XAVIER

Análise e Comparação de Modelos de Previsão de Vazões para o Planejamento Energético, Utilizando Séries Temporais

Dissertação defendida no Programa de Pós-Graduação do Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, aprovada em 05 de Janeiro de 2009, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Gelson da Cruz Júnior

Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – UFG
Orientador

Prof. Dr. Leonardo Neponuceno

UNESP-Bauru

Prof. Dr. Cássio Dener Noronha Vinhal

UFG

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Priscila Branquinho Xavier

Graduou-se em Matemática na UCG - Universidade Católica de Goiás.
Atualmente é professora das Faculdades Alves Faria.

1. Matemática 2. Otimização 3. Previsão de Vazões 4. Séries Temporais

Aos meus amores André e Pedro. André, meu esposo, grande amigo e companheiro, pelo auxílio e confiança e, Pedro, meu filho, onde deposito minhas esperanças por um mundo melhor.

Agradecimentos

Agradeço a todos que me ajudaram a concluir este trabalho.

Primeiramente à Deus, pela oportunidade. Aos meus pais, por me ensinarem a ser o que sou. Aos meus irmãos, que estão sempre comigo, especialmente Marcos e Patrícia.

Agradeço ao meu orientador Gelson da Cruz, pelo acompanhamento e ponderações que fizeram, efetivamente, este trabalho. Ao Professor Dr. Wagner da Silva Lima, que investiu nessa realização. Ao Prof. Dr. José Elmo de Meneses, pela dedicação e auxílio nas discussões sobre Estatística e, ao Prof. Dr. Thyago Carvalho Marques pelo tamanho despreendimento e disponibilidade, ao ceder as rotinas e auxiliar na geração dos resultados. Muito obrigada.

Agradeço à equipe da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação: funcionários, professores e colegas, pelo auxílio constante.

Agradeço à Prof. Ms. Joelma Ferreira de Moura, por sua disposição, conhecimento, tardes de sufoco e trabalho árduo, diante das minhas limitações.

E, finalmente, ao grande companheiro e amigo André, por trabalhar junto e confiar nesta parceria.

“Se um homem ficar restrito a somente coletar fatos a ciência será meramente uma nomenclatura estéril e ele nunca saberá as grandes leis da natureza. É na comparação dos fenômenos e na procura de seus relacionamentos que ele poderá descobrir estas leis...”

Pierre Simon, Marquis de Laplace

Resumo

Xavier, Priscila Branquinho. **Análise e Comparação de Modelos de Previsão de Vazões para o Planejamento Energético, Utilizando Séries Temporais**. Goiânia, 2009. 88p. Dissertação de Mestrado. EEEEC, Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.

No planejamento da operação energética, a análise e previsão de vazões são muito importantes. Uma grande dificuldade na previsão de vazões é a presença da sazonalidade, devido aos períodos de seca e cheia no ano. Muitos estudiosos, com metodologias diversas, têm se preocupado em encontrar um modelo de melhor ajuste, em comparação ao utilizado pelo sistema brasileiro, ou seja, o modelo auto-regressivo de ordem 1, que consiste numa metodologia de Box & Jenkins e exige manuseio nos dados para tratar a não-estacionariedade. O presente trabalho analisa e compara os modelos utilizados pelo sistema brasileiro (PAR), com modelo matemático que considera a sazonalidade dos dados (SAR) e o método de Holt-Winters e, modelos amplamente estudados como PARMA e ANFIS. O desempenho dos modelos foi comparado e os resultados mostraram que em muitos estudos os modelos PAR/PARMA e ANFIS apresentam melhor ajuste, no geral, em relação aos demais.

Palavras-chave

Séries Temporais, Sazonalidade, modelos (Holt-Winters, PAR, PARMA, ANFIS, SAR).

Abstract

Xavier, Priscila Branquinho. I. Goiânia, 2009. 88p. MSc. Dissertation. EEEEC, Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.

In the planning of the energetic operation, analysis and forecasts of the flow are very important. A huge difficulty in the forecast of flow is the seasonality presence, due to drought and flood periods in the year. Many scientists, with different methodologies, have been concerned with finding a best model, compared with the utilized by Brazil's system - Markovian Model. The Markovian Model, or self-regressive with order 1, is a Box & Jenkins methodology, and requires data handling to treat non-stationarity, or the use of regular models, requiring a hardly theoretical formulation for the statistical procedures. Therefore, the statistical models, autoregressive model with seasonality and Holt-Winters model, of treatment of temporal series are presented and, carried out the flow's analysis and forecast for three study groups, in two different (historical) horizons. The performance of the models was compared and the results showed that the proposed models presents better adjustment than the model adopted by Brazilian system.

Keywords

Temporal Series, Seasonality, Models(Holt-Winters,PAR, PARMA, ANFIS).

Sumário

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
1 Introdução	16
1.1 Objetivos	19
1.2 Organização do trabalho	19
2 Séries Temporais	21
2.1 Um breve resumo sobre séries temporais	21
2.2 Alguns Conceitos Básicos	22
3 Modelos para Séries Temporais e Previsão	28
3.1 Modelos Auto Regressivos	28
3.2 Modelos Médias Móveis	29
3.3 Modelos Auto Regressivos com Médias Móveis	29
3.4 Modelos Periódicos Auto Regressivos com Médias Móveis	30
3.5 Modelos Auto Regressivos com Sazonalidade	31
3.6 Método de Previsão de Holt-Winters	32
Alisamento Exponencial Simples	32
3.6.1 Alisamento Exponencial Sazonal e Linear	33
3.7 Modelo Neurofuzzy ANFIS	34
4 Comparação dos Modelos	36
4.1 Comentários Gerais	36
4.1.1 Grupo 1 - Previsão Atual	37
4.1.2 Grupo 2 - Altas Vazões	41
4.1.3 Grupo 3 - Baixas Vazões	57
5 Considerações Finais	84
5.1 Contribuições	85
5.2 Trabalhos Futuros	85
Referências Bibliográficas	86

Lista de Figuras

1.1	Representação simplificada da integração entre os sistemas de produção e transmissão para o suprimento do mercado consumidor.[Fonte:Atlas de Energia Elétrica- 2ªedição]	17
1.2	Obtenção de Séries Históricas de Vazões Afluentes	18
2.1	Vazões Naturais Afluentes Médias Mensais para a usina de Furnas	27
4.1	Média Longo Termo (MLT) de Furnas	38
4.2	(A) Modelo PAR .	74
4.3	(B) Modelo PARMA .	74
4.4	(C) Modelo SAR .	74
4.5	(D) Método Holt-Winters .	74
4.6	(E) Modelo ANFIS .	74
4.7	Previsão para os anos 2001 a 2005.	74
4.8	(A) Modelo PAR .	75
4.9	(B) Modelo PARMA .	75
4.10	(C) Modelo SAR .	75
4.11	(D) Método Holt-Winters .	75
4.12	(E) Modelo ANFIS .	75
4.13	Previsão para os anos 1996 a 2000.	75
4.14	(A) Modelo PAR .	76
4.15	(B) Modelo PARMA .	76
4.16	(C) Modelo SAR .	76
4.17	(D) Método Holt-Winters .	76
4.18	(E) Modelo ANFIS .	76
4.19	Previsão para os anos 1979 a 1983.	76
4.20	(A) Modelo PAR .	77
4.21	(B) Modelo PARMA .	77
4.22	(C) Modelo SAR .	77
4.23	(D) Método Holt-Winters .	77
4.24	(E) Modelo ANFIS .	77
4.25	Previsão para os anos 1965 a 1969.	77
4.26	(A) Modelo PAR .	78
4.27	(B) Modelo PARMA .	78
4.28	(C) Modelo SAR .	78
4.29	(D) Método Holt-Winters .	78
4.30	(E) Modelo ANFIS .	78
4.31	Previsão para os anos 1984 a 1988.	78
4.32	(A) Modelo PAR .	79

4.33 (B) Modelo PARMA .	79
4.34 (C) Modelo SAR .	79
4.35 (D) Método Holt-Winters .	79
4.36 (E) Modelo ANFIS .	79
4.37 Previsão para os anos 1998 a 2002.	79
4.38 (A) Modelo PAR .	80
4.39 (B) Modelo PARMA .	80
4.40 (C) Modelo SAR .	80
4.41 (D) Método Holt-Winters .	80
4.42 (E) Modelo ANFIS .	80
4.43 Previsão para os anos 1997 a 2001.	80
4.44 (A) Modelo PAR .	81
4.45 (B) Modelo PARMA .	81
4.46 (C) Modelo SAR .	81
4.47 (D) Método Holt-Winters .	81
4.48 (E) Modelo ANFIS .	81
4.49 Previsão para os anos 1950 a 1954.	81
4.50 (A) Modelo PAR .	82
4.51 (B) Modelo PARMA .	82
4.52 (C) Modelo SAR .	82
4.53 (D) Método Holt-Winters .	82
4.54 (E) Modelo ANFIS .	82
4.55 Previsão para os anos 1955 a 1959.	82
4.56 (A) Modelo PAR .	83
4.57 (B) Modelo PARMA .	83
4.58 (C) Modelo SAR .	83
4.59 (D) Método Holt-Winters .	83
4.60 (E) Modelo ANFIS .	83
4.61 Previsão para os anos 1972 a 1976.	83

Lista de Tabelas

4.1	Informações estatísticas das vazões afluentes médias mensais para UHE Furnas	37
4.2	Previsão para os anos 2001 a 2005.	39
4.3	Erros PAR	39
4.4	Erros PARMA	39
4.5	Erros SAR	39
4.6	Erros Holt-Winters	39
4.7	Erros ANFIS	39
4.8	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (2001 a 2005) .	40
4.8	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (2001 a 2005) .	41
4.15	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1996 a 2000) .	43
4.15	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1996 a 2000) .	44
4.15	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1996 a 2000) .	45
4.22	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1979 a 1983) .	45
4.22	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1979 a 1983) .	46
4.22	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1979 a 1983) .	47
4.29	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1965 a 1969) .	47
4.29	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1965 a 1969) .	48
4.29	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1965 a 1969) .	49
4.9	Previsão para os anos 1996 a 2000.	50
4.10	Erros PAR	50
4.11	Erros PARMA	50
4.12	Erros SAR	50
4.13	Erros Holt-Winters	50
4.14	Erros ANFIS	50
4.16	Previsão para os anos 1979 a 1983.	51
4.17	Erros PAR	51

4.18 Erros PARMA	51
4.19 Erros SAR	51
4.20 Erros Holt-Winters	51
4.21 Erros ANFIS	51
4.23 Previsão para os anos 1965 a 1969.	52
4.24 Erros PAR	52
4.25 Erros PARMA	52
4.26 Erros SAR	52
4.27 Erros Holt-Winters	52
4.28 Erros ANFIS	52
4.36 Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1984 a 1988).	53
4.36 Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1984 a 1988).	54
4.36 Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1984 a 1988).	55
4.43 Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1998 a 2002).	55
4.43 Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1998 a 2002).	56
4.43 Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1998 a 2002).	57
4.30 Previsão para os anos 1984 a 1988.	58
4.31 Erros PAR	58
4.32 Erros PARMA	58
4.33 Erros SAR	58
4.34 Erros Holt-Winters	58
4.35 Erros ANFIS	58
4.37 Previsão para os anos 1998 a 2002.	59
4.38 Erros PAR	59
4.39 Erros PARMA	59
4.40 Erros SAR	59
4.41 Erros Holt-Winters	59
4.42 Erros ANFIS	59
4.50 Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1997 a 2001).	60
4.50 Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1997 a 2001).	61
4.50 Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1997 a 2001).	62
4.44 Previsão para os anos 1997 a 2001.	63
4.45 Erros PAR	63
4.46 Erros PARMA	63
4.47 Erros SAR	63
4.48 Erros Holt-Winters	63
4.49 Erros ANFIS	63

4.57	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1950 a 1954).	64
4.57	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1950 a 1954).	65
4.51	Previsão para os anos 1950 a 1954.	66
4.52	Erros PAR	66
4.53	Erros PARMA	66
4.54	Erros SAR	66
4.55	Erros Holt-Winters	66
4.56	Erros ANFIS	66
4.64	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1955 a 1959).	67
4.64	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1955 a 1959).	68
4.64	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1955 a 1959).	69
4.71	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1972 a 1976).	69
4.71	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1972 a 1976).	70
4.71	Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1972 a 1976).	71
4.58	Previsão para os anos 1955 a 1959.	72
4.59	Erros PAR	72
4.60	Erros PARMA	72
4.61	Erros SAR	72
4.62	Erros Holt-Winters	72
4.63	Erros ANFIS	72
4.65	Previsão para os anos 1972 a 1976.	73
4.66	Erros PAR	73
4.67	Erros PARMA	73
4.68	Erros SAR	73
4.69	Erros Holt-Winters	73
4.70	Erros ANFIS	73

Introdução

Considerado único em âmbito mundial, por possuir um parque gerador com muitas particularidades, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica no Brasil é um sistema de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e múltiplos proprietários. Assim, determinar uma estratégia de operação que minimize o custo da operação em cada unidade do sistema torna-se algo complexo.

O Sistema Elétrico Nacional, representado na Figura 1.1, é formado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), composto pelos subsistemas Sudeste/Sul e Nordeste/Norte e, por sistemas isolados que representam 1,5% de toda a potência instalada, localizados principalmente no Norte do País.

Distribuída por doze bacias hidrográficas e que totalizam 85% da capacidade instalada do país, a geração de energia elétrica, no Brasil, depende das vazões afluentes às hidrelétricas e, a capacidade de regularização de reservatórios torna o problema do planejamento, não-separável no tempo, ou seja, o estado atual é resultado das decisões passadas e comprometem os estados futuros cujas previsões devem ser consideradas. Necessário se faz considerar a interdependência operativa entre as usinas de mesma bacia e as restrições de uso da água.

Assim, no planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração o objetivo é determinar, para cada estágio (mês) do período (anos), a geração para cada unidade (usina) do sistema de modo a minimizar o custo futuro da operação e atender à demanda de carga, ou ainda, utilizar eficientemente a geração de base hidráulica para minimizar o uso da geração térmica, cujo combustível é elevado e crescente com a geração.

Devido à trabalhosa formulação teórica estatística exigida pelas características de sazonalidade e a não-estacionaridade do histórico, no planejamento da operação energética a longo prazo, a análise e previsão de vazões é baseada principalmente na metodologia de Box & Jenkins (1970), a alternativa aos modelos determinísticos. E, a produção energética hidrelétrica depende da série de vazões afluentes às diversas unidades de aproveitamento do sistema. Usualmente, os dados de entrada para um modelo de simulação e/ou otimização, de determinado aproveitamento hídrico,

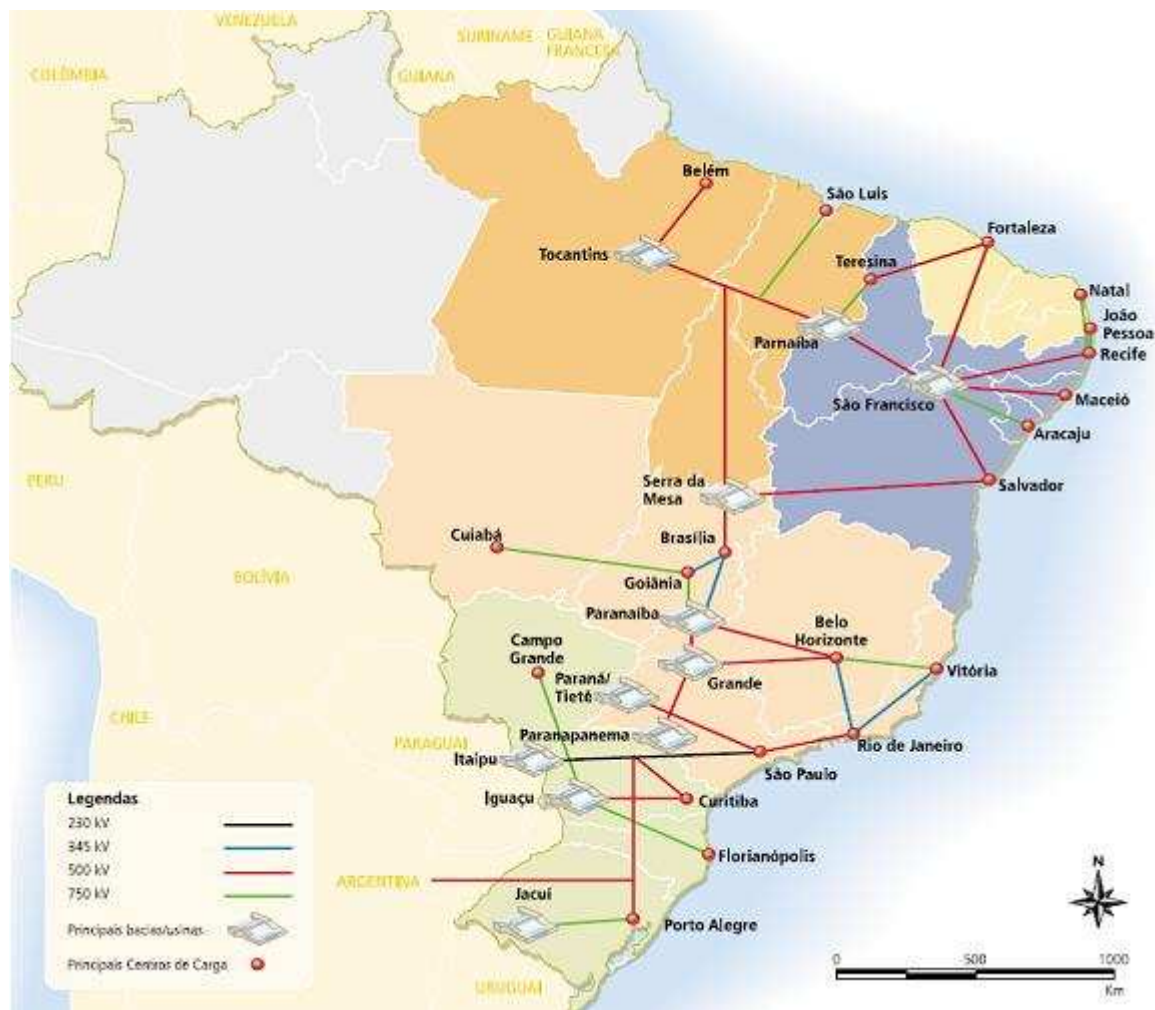


Figura 1.1: *Representação simplificada da integração entre os sistemas de produção e transmissão para o suprimento do mercado consumidor.* [Fonte: Atlas de Energia Elétrica- 2ª edição]

é a série histórica de vazões no local.

A Figura 1.2 mostra o processo de obtenção de séries históricas, baseada em medições e análises das vazões afluentes aos locais de aproveitamento hidroelétricos. (FORTUNATO,1970)

Os períodos de discretização dos intervalos utilizados para séries de vazões, empregados no planejamento da operação de sistemas de produção de energia elétrica, utilizados pelos modelos de simulação e/ou otimização, são mensal/ semanal.

As séries de vazões naturais médias mensais têm, por exemplo, a média, a variância, a assimetria e a estrutura de autocorrelação com comportamentos periódicos e, sua análise pode ser feita pelo uso de formulações Auto Regressivas cujos parâmetros apresentam comportamento periódico (SALAS, 1980). O modelo Auto Regressivo Periódico é usado no Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica

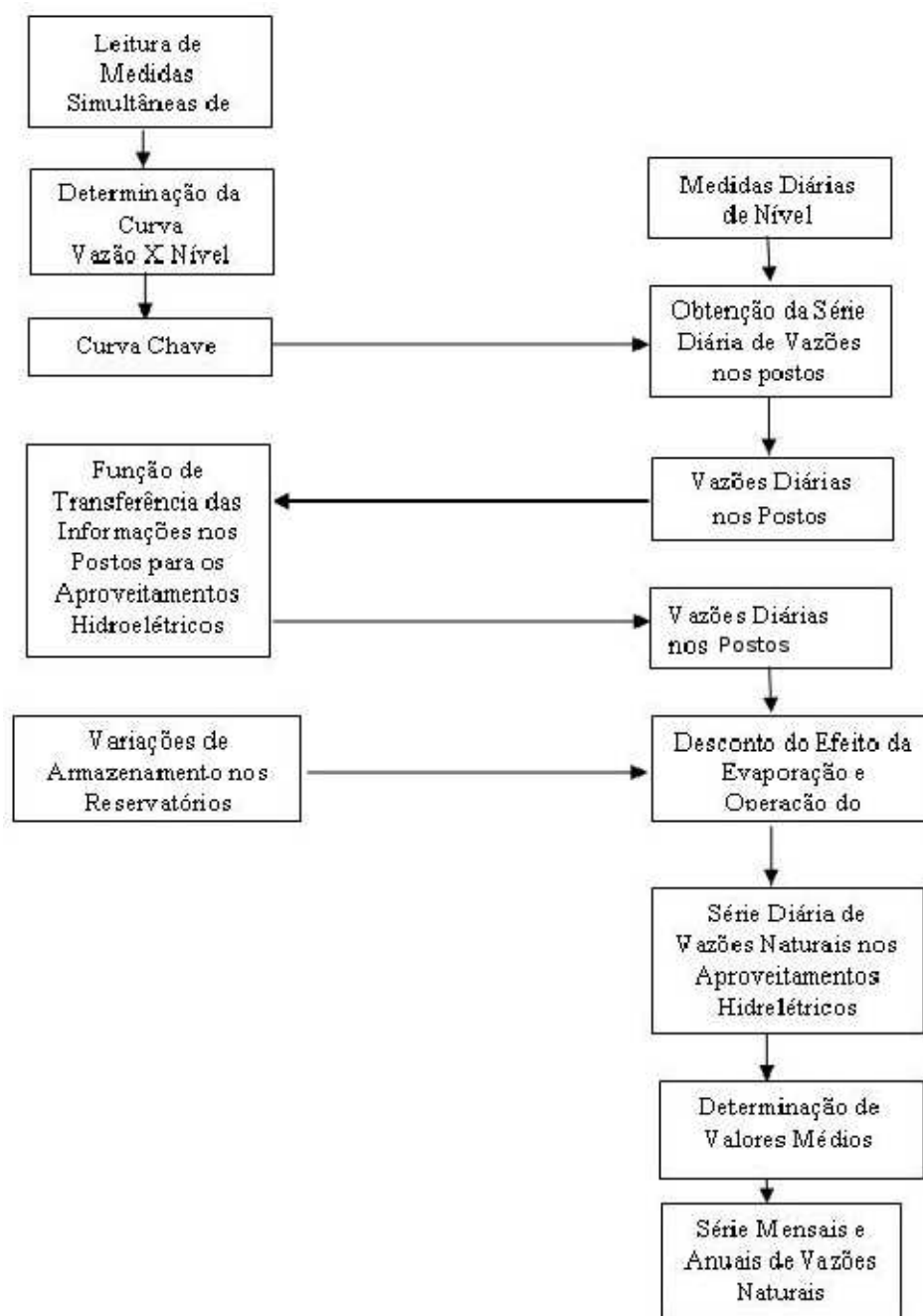


Figura 1.2: Obtenção de Séries Históricas de Vazões Afluentes

a Subsistemas Equivalentes Interligados (NEWAVE) (CEPEL, 1983) , utilizados pelo Sistema Interligado Nacional- SIN, com base na metodologia de Box & Jenkins (1970).

O objetivo geral deste trabalho é comparar alguns modelos para o problema de previsão. Serão avaliados os modelos: PAR (Periódico Auto Regressivo), PARMA (Periódico Auto Regressivo com Médias Móveis), o modelo *nerofuzzy* ANFIS - Adaptive-Network-Based-Fuzzy Inference System desenvolvido por Jang(1993), o modelo SAR (Auto Regressivos com Sazonalidade) e, o método de alisamento de Holt-Winters. Para todos os casos, analisaremos um passo à frente - o período de cinco (5) anos à frente no histórico.

Os dados utilizados constituem em séries históricas de vazões naturais afluentes médias mensais à usina de Furnas, que abrangem o período de 1931 a 2006 e, para cada conjunto de testes foi definido um critério para selecionar o ano final considerado para o histórico.

O tratamento estatístico dos dados no SAR e, Holt-Winters é feito com o software livre R e, para os modelos PAR, PARMA e ANFIS, são utilizadas as rotinas aplicadas aos dados cujos resultados foram apresentados no Relatório Técnico I-Anexo I - Relatório de Previsão de Vazões (MARQUES et al., 2008).

O desempenho é avaliado fazendo-se comparações entre as previsões obtidas e medidas de erros.

1.1 Objetivos

Faz parte dos objetivos desta dissertação:

- Estudar alguns modelos desenvolvidos para o problema de previsão;
- Estudar maneiras alternativas, considerando a variável sazonalidade nos dados;
- Comparar os modelos estudados;
- Identificar se ocorre algum ganho em se trabalhar os dados sem eliminar a característica da sazonalidade encontrada nos mesmos, à partir dos modelos propostos.

1.2 Organização do trabalho

O restante deste trabalho está organizado em quatro capítulos, descritos a seguir. O Capítulo 2, uma breve descrição de séries temporais. O capítulo 3, uma descrição dos modelos em estudo. O Capítulo 4 apresenta os estudos de casos

desenvolvidos e os resultados encontrados. Na 5 são apresentados os comentários finais, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Séries Temporais

Neste capítulo são apresentados: um breve resumo sobre séries temporais e alguns conceitos básicos para o desenvolvimento dos modelos estudados, além dos modelos para previsão de vazões relacionados ao presente trabalho: modelos PAR (Auto Regressivos Periódicos), PARMA (Auto Regressivos Periódicos com Médias Móveis), SAR (Auto Regressivo com Sazonalidade), *neurofuzzy* ANFIS e, o método de alisamento de Holt-Winters.

2.1 Um breve resumo sobre séries temporais

Uma série temporal, segundo Ehlers (2007) , é um conjunto de observações coletadas ao longo do tempo e, a principal característica deste tipo de dados é a dependência das observações vizinhas. Modelar o fenômeno estudado, com base nestas dependências e, a partir da obtenção de dados estatísticos, avaliar a adequação do modelo de previsões, são os objetivos da análise de séries temporais.

Basicamente, dois enfoques são considerados na análise de séries temporais: análise feita no domínio temporal, onde os modelos propostos são paramétricos e a análise conduzida no domínio de frequências, onde os modelos propostos são não-paramétricos. Em ambos, o objetivo é construir modelos para as séries.

Os dois enfoques não são alternativos e sim, complementares, mostrando aspectos diferentes da natureza da série temporal. Mas, pode-se dizer que é conveniente a análise no domínio da frequência na procura de características determinísticas, enquanto, no domínio do tempo a utilização se dá para processos não determinísticos.

De modo geral, os principais objetivos, obtida a série temporal $x(t_1), \dots, x(t_n)$, observada nos instantes t_1, \dots, t_n , são:

- descrever o comportamento da série; neste caso, construção de gráficos, histogramas e diagramas de dispersão, verificar padrões de tendência, ciclos e variações sazonais, etc.;
- investigar o mecanismo gerador da série temporal ;

- fazer previsões de valores futuros da série;
- controlar processos: por exemplo controle estatístico de qualidade;
- procurar informações relevantes nos dados, como por exemplo periodicidade;
- usar a variação em uma série para explicar a variação em outra.

As abordagens para atingir os objetivos são:

- técnicas descritivas: gráficos, identificações de padrões, etc.;
- modelo probabilísticos: seleção de modelos, estimação, predição e, como ferramenta básica a função de autocorrelação;
- análise espectral;
- métodos não-paramétricos de alisamento ou suavização;
- outras abordagens: modelos de espaço de estados, modelos não lineares, volatilidade estocástica, etc.

Assim, sumarizar as propriedades estatísticas, caracterizando seu comportamento, identificando ou sugerindo um modelo matemático que descreva o sistema de maneira parcimoniosa e, se possível sendo parametrizado de tal forma que cada parâmetro possa ser interpretado facilmente e identificado com a realidade, tornando possível a realização de previsão de valores futuros, é o que leva à análise de séries temporais. Vários modelos podem descrever o comportamento de uma série dependendo de fatores como o comportamento do fenômeno ou mesmo da sua natureza e, do objetivo da análise.

2.2 Alguns Conceitos Básicos

Suposições simplificadoras são introduzidas com o intuito de descrever e analisar determinadas classes de séries temporais. Podemos ter assim:

- processos estacionários ou não-estacionários, de acordo com a independência ou não, relativamente à origem dos tempos;
- processos normais (Gaussianos) ou não-normais, de acordo com as fdp¹ que caracterizam os processos;
- processos Markovianos ou não-Markovianos, de acordo com a independência dos valores do processo em dado instante, dos valores precedentes.

¹FDP: funções de densidade de probabilidade. As funções representam as distribuições de probabilidade da variável aleatória

A análise de séries temporais se dá através das componentes de sazonalidade, variações cíclicas, aleatoriedade e tendência, segundo Steveson (1981). A Figura 2.1 mostra um exemplo de séries de vazões naturais afluentes médias mensais da usina de Furnas, localizada no rio Grande, compreendendo o período de janeiro de 1931 a março de 2006. Observa-se que as vazões oscilam entre um mínimo e um máximo, com uma variação sazonal de, aproximadamente 12 meses, representando um caso particular de não estacionariedade² da série.

Em uma série temporal x_t , com não estacionariedade, muitas propriedades observadas podem ser percebidas assumindo-se a seguinte decomposição (BALLINI, 2000):

$$x_t = s_t + \bar{z}_t + a_t \quad (2-1)$$

onde \bar{z}_t é um componente de tendência (ou estacionariedade), s_t é um cíclico ou sazonal e a_t é um aleatório ou um ruído, com média zero e variância constante σ_t^2 . O componente sazonal se repete a cada intervalo fixo e, assim, as variações periódicas podem ser captadas por este.

Com o intuito de tornar o efeito sazonal aditivo e estabilizar a variância, é comum a transformação dos dados originais: faz-se um ajustamento sazonal dos dados e depois usa-se um modelo não-sazonal para a previsão. Uma forma simples de se eliminar o efeito sazonal é tomar médias sazonais. No caso dos modelos ARIMA (AR), Plosser (1979) analisa e conclui que “parece preferível fazer a previsão usando diretamente o modelo sazonal ao invés de ajustar sazonalmente a série e depois utilizar um modelo não-sazonal”. Nelson (1976) concluiu que transformações não melhoram a qualidade de previsão. Porém, o tratamento dado pelo Setor Elétrico Brasileiro, a esta não estacionariedade apresentada na série de vazões, é feito removendo o componente sazonal e tornando a série estacionária, através da definição de uma variável nova:

$$z_t = \frac{x_t - \mu_m}{\sigma_m} \quad (2-2)$$

sendo μ_m e σ_m , a média e o desvio-padrão para cada mês, respectivamente, e a série z_t tem, aproximadamente, média zero e desvio-padrão um.

Assim, (MARQUES et al, 2008),

Definição: Um processo estocástico é estritamente estacionário se suas

²as propriedades da série mudam com o tempo

propriedades não são afetadas pela mudança na origem do tempo, isto é, se a distribuição de probabilidade conjunta associada às k observações $x_1, x_2, \dots, x_k, 1 < k < N$, é a mesma associada às k observações $x_{1+h}, x_{2+h}, \dots, x_{k+h}$, para qualquer h .

Ou seja, a escolha da origem de t não afeta o processo.

O processo estacionário tem média constante

$$\mu = E[x_t] = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx \quad (2-3)$$

que define o nível em torno do qual a série oscila, e uma variável constante:

$$\sigma_x^2 = E[x_t - \mu]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx \quad (2-4)$$

a qual mede a amplitude da oscilação.

A forma da distribuição de probabilidade pode ser inferida por meio do histograma das observações x_1, x_2, \dots, x_t , $t = 1, \dots, n$ sobre a série temporal observada e a média \bar{x} pode ser estimada por:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t \quad (2-5)$$

denominada média amostral e a estimativa da variância σ_x^2 dada por:

$$Var[x] = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 \quad (2-6)$$

A função distribuição de probabilidade conjunta $p(x_t, x_{t+k})$ é a mesma para todo $t, t+k$, separada por intervalos constantes k , implicação da hipótese de estacionaridade.

A covariância entre x_t e x_{t+k} , separada por k intervalos de tempo, é chamada de autocovariância de passo k , definida por:

$$\gamma = cov[x_t, x_{t+k}] = E[(x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu)] \quad (2-7)$$

E, conseqüentemente, o coeficiente de autocorrelação ρ_k com k é definido por:

$$\rho_k = \frac{E[(x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu)]}{\sqrt{E[(x_t - \mu)^2(x_{t+k} - \mu)^2]}} = \frac{\gamma_k}{\sigma_x^2} \quad (2-8)$$

A matriz de covariância associada ao processo estacionário, para as observações (x_1, x_2, \dots, x_n) realizadas em N vezes sucessivas, é representada por:

$$\Gamma_N = \begin{pmatrix} \gamma_0 & \gamma_1 & \gamma_2 & \cdots & \gamma_{N-1} \\ \gamma_1 & \gamma_0 & \gamma_1 & \cdots & \gamma_{N-2} \\ \gamma_2 & \gamma_1 & \gamma_0 & \cdots & \gamma_{N-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{N-1} & \gamma_{N-2} & \gamma_{N-3} & \cdots & \gamma_0 \end{pmatrix}$$

Como na prática é impossível conhecer todas as distribuições conjuntas x_1, x_2, \dots, x_k , $1 < k < N$, o processo obedece às seguintes condições:

- a média e a variância de x_t são constantes;
- a $Cov[x_t, x_{t+k}] = \gamma(k)$, isto é, depende apenas de k .

A classe dos modelos Auto Regressivos Integrados com Médias Móveis de ordens p , d e q , ARIMA (p,d,q) é capaz de descrever de maneira satisfatória as séries estacionárias.

Importante observar que nem sempre um modelo que descreve uma série, conduz a um procedimento de previsão, sendo necessário especificar uma função-perda, além do modelo para se chegar ao procedimento. Frequentemente é usada a função perda erro quadrático médio, mas em algumas ocasiões, outros critérios ou funções-perdas são mais apropriadas.

Ainda, dado o modelo que descreve a série temporal, o objetivo é minimizar o erro e , para se identificar as propriedades de uma série temporal é usada uma série de quantidades chamadas coeficientes de autocorrelação amostral. Semelhantemente, ao coeficiente de correlação usual e , no entanto, considerando a correlação entre as observações de uma mesma variável, em diferentes horizontes de tempo, dadas n observações x_1, \dots, x_n de uma série temporal discreta, pode-se formar pares $(x_1, x_2), \dots, (x_{n-1}, x_n)$ e, considerando x_1, \dots, x_{n-1} e x_2, \dots, x_n como duas variáveis, o coeficiente de correlação entre x_t e x_{t+1} é dado por

$$\tau = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} (x_t - \bar{x}_1)(x_{t+1} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n-1} (x_t - \bar{x}_1)^2 \sum_{t=1}^{n-1} (x_{t+1} - \bar{x}_2)^2}}$$

e as médias amostrais são

$$\bar{x}_1 = \sum_{t=1}^n \frac{x_t}{n-1} \quad (2-9)$$

$$\bar{x}_2 = \sum_{t=2}^n \frac{x_t}{n-1} \quad (2-10)$$

O gráfico com os k primeiros coeficientes de autocorrelação como função de k é chamado de correlograma e, com interpretação adequada, auxilia na caracterização da série temporal. Como o padrão sazonal é evidente no gráfico original (Figura 2.1), o correlograma pouco acrescentará quanto a novas informações sobre a série temporal.

A estratégia de construção do modelo é baseada em um ciclo iterativo, no qual a seleção da estrutura do modelo é baseada nos próprios dados, da seguinte forma (MORETTIN, 2004):

- Uma classe geral de modelos é considerada para a análise;
- É identificado um modelo, baseado na análise de autocorrelação, autocorrelação parcial e outros;
- Os parâmetros são estimados;
- Analisando os resíduos é verificado ajuste do modelo.

Caso não haja adequação, o procedimento é repetido. Muitas vezes, a identificação é feita para vários modelos, sendo esta a fase crítica do procedimento (MORETTIN, 2004), cabendo ao usuário decidir como utilizar o modelo de acordo com os objetivos e, se for o caso, fazer previsão.

Segundo Priestley (1979), “não há algo chamado *método* de previsão ou algo chamado *método de previsão ARMA* (BOX et al.,1976), há algo chamado método de previsão de ‘mínimos quadrados’ e este, de fato, fornece a base para virtualmente todos os estudos teóricos”. Ainda, todos os métodos são diferentes procedimentos computacionais para calcular a previsão de mínimos quadrados de um valor futuro à partir de combinações lineares de valores passados.

Para checar a *performance* preditiva do modelo é comum, a partir de uma série temporal observada x_1, \dots, x_n , realizar as previsões dentro do período amostral e compará-las com os valores observados. A diferença entre os valores previstos e observados é chamada de erro de previsão k passos à frente.

Outro procedimento utilizado para a previsão, que não necessita da descrição de um modelo para a série, é o chamado alisamento exponencial. O método de alisamento, ou suavização, utilizado para este trabalho, conhecido como Holt-Winters, é uma generalização para séries que contenham tendência e variação sazonal.

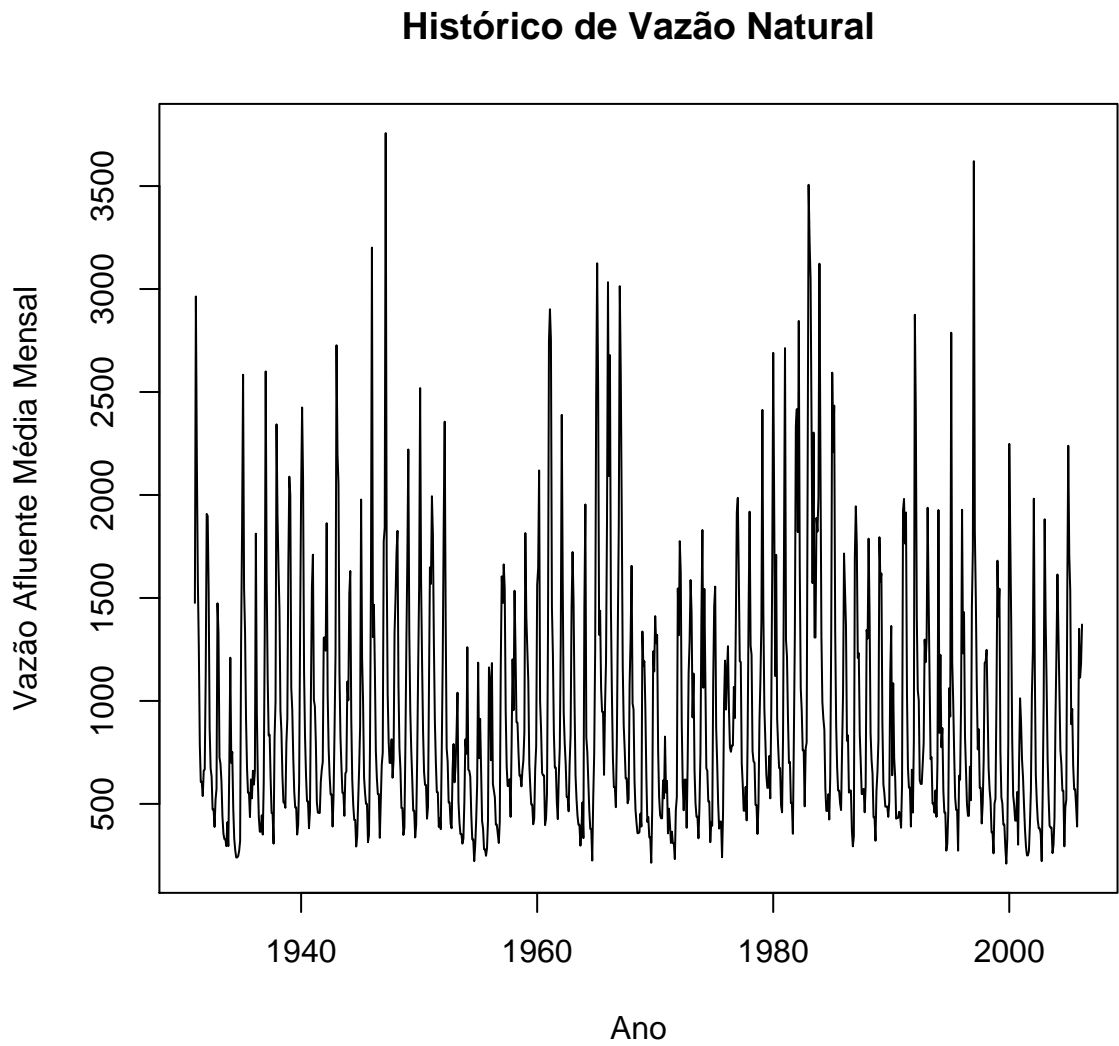


Figura 2.1: *Vazões Naturais Afluentes Médias Mensais para a usina de Furnas*

Modelos para Séries Temporais e Previsão

Este capítulo apresenta uma breve descrição dos modelos clássicos utilizados pelo setor elétrico brasileiro para a modelagem das séries temporais: os Periódicos Auto Regressivos (PAR) e os mistos Periódicos Auto Regressivos com Médias Móveis (PARMA); juntamente com o modelo amplamente estudado *neofuzzy* ANFIS (MARQUES et al.,2008) e, com os propostos para este problema: Auto Regressivos com Sazonalidade (SAR) e o método de alisamento de Holt-Winters.

3.1 Modelos Auto Regressivos

Os métodos Box & Jenkins realizam, por meio de execuções sucessivas dos passos abaixo, uma análise e modelagem de uma série temporal (CROSS; GALIANA, 1987; DINIZ et al., 1998; NASCIMENTO, 2005):

1. **Identificação do Modelo:** A partir da estimação da função de autocorrelação e da autocorrelação parcial, identificar o modelo, bem como determinar o número de parâmetros para a série temporal;
2. **Estimação de Parâmetros:** Os parâmetros são estimados na máxima de verossimilhança;
3. **Validação do Modelo:** Verifica a satisfação por meio da análise residual, isto é, à partir de métodos de diagnósticos, testa o modelo estimado;
4. **Previsão:** É escolhido o melhor modelo, monitorando a qualidade da previsão, podendo re-estimar os parâmetros ou o processo inteiro, se a qualidade da previsão degenerar.

De acordo com E.P.Box, Gwilymand e Gregory (1994) os métodos de Box & Jenkins têm em sua essência um modelo linear, podendo descrever uma séire estacionária ou não estacionária. A base para os métodos Box & Jenkins são os modelos estacionários, enquanto os não estacionários são uma extensão destes. Os

métodos de Box & Jenkins utilizam um procedimento bem estruturado e sistemático para selecionar o modelo apropriado, de uma variedade de modelos da família *ARMA*, no qual, *AR* significa Auto Regressivo e *MA*, Médias Móveis. Estes modelos se apresentam, normalmente, como *AR*(p) (auto regressivo de ordem p) e *MA*(q) (médias móveis de ordem q), e cuja união dá origem ao modelo *ARMA*(p, q).

O modelo *AR*(p) descreve a observação de uma série temporal x_t como um somatório dos p pesos de valores anteriormente conhecidos $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}$ e, adicionado um “ruído branco”¹ e uma constante μ , ilustrado na equação 3-1.

$$x_t = \mu + a_t + \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} = \mu + a_t + \sum_{k=1}^p \phi_k x_{t-k} \quad (3-1)$$

onde p é a ordem do modelo auto regressivo e, $\phi_k, k = 1, \dots, p$, são os parâmetros.

3.2 Modelos Médias Móveis

O modelo *MA*(q) representa a série temporal com uma média móvel do processo μ e um “ruído branco” atual a_t adicionado ao somatório dos q pesos, anteriormente independentes, com ruídos $a_{t-1}, a_{t-2}, \dots, a_{t-q}$, , como ilustrado na equação 3-2 (MARQUES et al., 2008).

$$x_t = \mu + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3-2)$$

onde $\theta_i, i = 1, \dots, q$, são os parâmetros e q é a ordem do modelo.

3.3 Modelos Auto Regressivos com Médias Móveis

A combinação dos modelos anteriormente descritos, dá origem ao modelo misto *ARMA*(p, q) (Auto Regressivo com Médias Móveis), ilustrado na equação 3-3:

$$x_t = \mu + a_t + \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3-3)$$

Ainda, em relação ao modelo não estacionário, os métodos de Box & Jenkins, para eliminar algum comportamento não estacionário, tentam mudar a ordem da

¹sinal indesejado presente na série temporal

série temporal. Exemplificando (NASCIMENTO, 2005), o modelo *ARIMA* (p, q, d) que significa modelo Integrado Auto Regressivo com Médias Móveis de ordem p e q e um número de operações diferença d (pode ser eliminada a tendência linear e mudar o nível), modificando uma série não estacionária x_t para uma série w_t ilustrada na equação 3-4:

$$w_t = \nabla^d x_t = (1 - B)^d x_t \quad (3-4)$$

onde $\nabla = (1 - B)$ é o operador diferença e B é definido por $B_k x_t = x_{t-k}$. Então, a série temporal transformada w_t pode ser representada por algum modelo estacionário previamente descrito.

3.4 Modelos Periódicos Auto Regressivos com Médias Móveis

Propostos inicialmente por Jones e Brelford, (1967) e posteriormente estudados por Vecchia (1985) e, Anderson e Vecchia (1993), para a modelagem de séries temporais que apresentam variação sazonal em sua estrutura, as classes de processos periódicos, combinados aos processos *AR*(p) e *ARMA*(p, q), originam, respectivamente, os modelos clássicos para a modelagem de séries temporais, *PAR*(p_m) e *PARMA*(p_m, q_m).

Dada uma série temporal sazonal $\{x_t\}$, $t = 1, \dots, N$, com período s e número total de observações N , isto é, $m = 1, 2, \dots, s$ observações constituem um conjunto de dados que determina um período e $r = 1, \dots, N$, o índice de cada um desses conjuntos. Portanto, o índice de tempo t pode ser escrito como função de m e r , ou seja, $t = t(r, m) = (r - 1)s + m$. Para este trabalho², $s = 12$ e $r = 1, 2, \dots, n$ o número de anos, assim, $x_{t(r, m)}$ é a observação da série x_t no ano r e mês m .

Para eliminar o componente sazonal da série e torná-la periodicamente estacionária, realiza-se a mudança de variável para a padronização dos dados:

$$z_{t(r, m)} = \frac{x_{t(r, m)} - \mu_m}{\sigma_m} \quad (3-5)$$

onde μ_m é a média e σ_m o desvio padrão do mês m .

Matematicamente (MARQUES et al, 2008), os modelos periódicos são representados da seguinte forma:

²A variação sazonal é de aproximadamente 12 meses

$$z_{t(r,m)} = a_{t(r,m)} + \sum_{i=1}^{p_m} \phi_{i,m} z_{t(r,m)-i} - \sum_{j=1}^{q_m} \theta_{j,m} a_{t(r,m)-j} \quad (3-6)$$

onde, $\phi_{i,m}$ e $\theta_{j,m}$ são funções periódicas com período s , $a_{t(r,m)}$ é um ruído branco com $N(0, \tau_m^{-1})$, $\tau_m^{-1} = \sigma_m^2$, $\tau_m \geq 0$ e $z_{t(r,m)}$ a série padronizada.

A metodologia de estimação dos parâmetros $\phi_{i,m}$, $\theta_{j,m}$ e τ_m é feita utilizando-se o método de máxima verossimilhança (VECCHIA, 1985)³

3.5 Modelos Auto Regressivos com Sazonalidade

As flutuações periódicas, que ocorrem em , no máximo, um ano, são chamadas de sazonalidade e, o que se observa em séries com a característica de sazonalidade é que ocorre relações entre as observações para meses sucessivos em um determinado ano e, também, para o mesmo mês em anos sucessivos.

O período de sazonalidade é representado por s (SILVA,2005), onde $s = 2$ representa séries semestrais, $s = 12$, séries mensais e, etc.

Assim, x_t está relacionada com x_{t-1}, x_{t-2}, \dots (SILVA,2005), apresentando correlação alta em *lags* sazonais⁴. Um ajuste da sazonalidade ou, desazonalização (MUELLER,1996), é um processo que remove esta correlação ou grande parte dela.

No tratamento dado pelo setor brasileiro às séries de vazões afluentes médias mensais, a sazonalidade, apesar de estar presente nos dados históricos, é retirada dos mesmos para a utilização dos modelos *PAR* e *PARMA*. Outro enfoque é incorporar a variação sazonal e a tendência, enfoque apresentado no modelo SAR (Auto Regressivo com Sazonalidade).

Assim, o modelo autoregressivo com sazonalidade(SAR) é a incorporação desta característica sazonal, e permite correlações entre instantes de tempos múltiplos de s , ilustrada na equação 3-9

$$x_t = \Phi_1 x_{t-s} + \Phi_2 x_{t-2s} + \dots + \Phi_p x_{t-ps} + a_t \quad (3-7)$$

$$(1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{ps}) x_t = a_t \quad (3-8)$$

$$\Phi(B^s) x_t = a_t \quad (3-9)$$

³O método consiste em adotar, como estimativa dos parâmetros, os valores que maximizam a probabilidade (MARQUES et al, 2008)

⁴múltiplos do período

A função de autocorrelação do modelo $SAR(p)_s$, tem valores diferentes de zero nos *lags* múltiplos de s .

3.6 Método de Previsão de Holt-Winters

Como foi dito, anteriormente, a descrição de uma série temporal por esse ou aquele modelo não determina uma previsão para a série. É necessário fazer a previsão utilizando o modelo ou, de maneira alternativa, à partir dos dados, fazer a previsão sem a caracterização de modelos.

Nesta seção, será descrito o método de alisamento exponencial simples para série temporal não sazonal e, em seguida, o método de alisamento de Holt-Winters, um procedimento generalizado para séries com sazonalidade.

Alisamento Exponencial Simples

Dada uma série temporal x_1, \dots, x_n não sazonal e sem tendência sistemática (EHLERS, 2007), estimar x_{t+1} como uma soma ponderada das observações anteriores, isto é,

$$\hat{x}_n(1) = a_0x_n + a_1x_{n-1} + \dots \quad (3-10)$$

é suficiente, onde a_j são pesos. Também é razoável dar às observações recentes um peso maior em relação as observações mais distantes e, neste procedimento, os pesos decaem geometricamente a uma taxa constante (EHLERS, 2007):

$$a_j = \alpha(1 - \alpha)^j, j = 0, 1, \dots \quad (3-11)$$

onde $0 < \alpha < 1$ é a constante de alisamento. Desta forma, a previsão 1 passo à frente em $t = n$ é dada por:

$$\hat{x}_n(1) = \alpha x_n + \alpha(1 - \alpha)x_{n-1} + \alpha(1 - \alpha)^2x_{n-2} + \dots \quad (3-12)$$

Na prática, a soma acima é finita, já que as observações são finitas.

É comum reescrever 3-12 na forma recursiva, obtendo:

$$\begin{aligned} \hat{x}_n(1) &= \alpha x_n + (1 - \alpha)[\alpha x_{n-1} + \alpha(1 - \alpha)x_{n-2} + \dots] \\ &= \alpha x_n + (1 - \alpha)\hat{x}_{n-1}(1) \end{aligned} \quad (3-13)$$

que não passa de uma média ponderada entre a observação mais recente e a previsão anterior.

A equação 3-12, também, pode ser escrita como *correção de erro*, definindo $e_n = x_n - \widehat{x}_{n-1}(1)$ como o erro de previsão 1 passo à frente no tempo n (EHLERS, 2007), logo:

$$\widehat{z}_n(1) = \widehat{z}_{n-1}(1) + \alpha e_n \quad (3-14)$$

ou seja, para $t = n+1$, a previsão é a soma da previsão para $t = n$, feita em $t = n-1$, e uma proporção do erro cometido.

A especificação de α independe das escalas em que foram feitas as observções e sim, das propriedades de dependência da série temporal, devendo ser especificado de maneira a refletir a influência das observações passadas. Para valores pequenos, a previsão depende muito das observações passadas ao passo que, para valores próximos de 1, a dependência maior está nos dados observados recentes.

O valor de α também poderá ser estimado à partir dos dados, com o critério de minimização da soma de quadrados dos erros de previsão segundo Ehlers (2007).

3.6.1 Alisamento Exponencial Sazonal e Linear

Produzindo resultados similares ao alisamento simples, o alisamento exponencial sazonal e linear, ou alisamento de Holt-Winters (WHELL, 1985), é capaz de manipular séries com sazonalidade (EHLERS, 2007).

Supondo as observações mensais, que L_t, T_t , e I_t sejam o nível, a tendência e o índice de sazonalidade no tempo t (EHLERS, 2007) e ainda, os termos $(L_1, T_1, I_1), \dots, (L_{t-1}, T_{t-1}, I_{t-1})$ conhecidos, T_t é o aumento ou a redução esperada e após a observação de x_t , os termos (L_t, T_t, I_t) são atualizados por alisamento exponencial (EHLERS, 2007).

Deste modo, sendo a variação sazonal multiplicativa, com amplitudes que tendem a crescer ao longo do tempo, as equações de atualização na forma de recorrência são:

$$L_t = \alpha \left(\frac{x_t}{I_{t-12}} \right) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (3-15)$$

$$T_t = \gamma(L_t - L_{t-1}) + (1 - \gamma)T_{t-1} \quad (3-16)$$

$$I_t = \delta \left(\frac{x_t}{L_t} \right) + (1 - \delta)I_{t-12} \quad (3-17)$$

e as previsões k passos à frente

$$\hat{z}_t(k) = (L_t + kT_t)I_{t-12+k}, k = 1, 2, \dots \quad (3-18)$$

Para o caso aditivo de sazonalidade, a atualização para o nível e o índice são, segundo Ehlers (2007):

$$L_t = \alpha(x_t - I_{t-12}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (3-19)$$

$$I_t = \delta(x_t - L_t) + (1 - \delta)I_{t-12} \quad (3-20)$$

com as previsões k passos à frente

$$\hat{x}_t(k) = (L_t + kT_t)I_{t-12+k}, k = 1, 2, \dots \quad (3-21)$$

Sendo α , δ e γ os parâmetros de alisamento para cada componente da série, geralmente escolhidos no intervalo de (0,1) ou, estimados pela soma de quadrados dos erros, como citado na seção 3.6, valendo os mesmos comentários sobre a natureza dos parâmetros, suas descrições e influências na previsão.

3.7 Modelo Neurofuzzy ANFIS

Redes neurais (MARQUES e al., 2008) são largamente utilizadas para a previsão de séries temporais e mostram viabilidade nesta utilização. No entanto, o tempo de processamento e a soma de dados aumentam à medida que cresce o número de camadas e neurônios, aumentando também a capacidade de mapeamentos complexos.

Na prática, muitos dos parâmetros devem ser ajustados e uma pequena quantidade de dados está disponível. Ainda observa-se que estes dados apresentam ruídos, podendo conter contradições e imperfeições. Exige-se também tolerância a imprecisão e incertezas para a consideração da robustez e tratabilidade.

Com o desenvolvimento das teorias relacionadas às redes neurais e aos sistemas *fuzzy* (MARQUES et al., 2008), observa-se que , apresentam propriedades individuais que contribuem para compensar as deficiências de cada uma, além de exibirem características comuns como tratamento de incertezas e raciocínio aproximado. Por exemplo: as redes neurais falham na representação do conhecimento de forma explícita, mas apresentam sua inclinação para o aprendizado. E, os sistemas

fuzzy são fracos na aquisição automática de conhecimento, mas são fortes com relação à manipulação de termos linguísticos. Esta associação resultou nos chamados sistemas *neurofuzzy* (PEDRY, 1998).

A abordagem dos sistemas *neurofuzzy* auxiliam na modelagem de sistemas não-lineares, na estimação de parâmetros (MARQUES et al., 2008; FIGOMI, 1998), e, dentre outras, na previsão de vazões (BALLINI, 2000).

Segundo Ballini (2000), a análise e previsão de vazões usando modelos de redes neurais nebulosas para a previsão um passo à frente apresentou melhor desempenho que as abordagens de séries temporais e redes neurais. Já em (MARQUES et al., 2008), o desenvolvimnto do modelo ANFIS para a resolução do problema de previsão, em comparação com uma rede neural (MLP) obteve melhores resultados. Porém, os resultados não foram suficientes em relação aos modelos de redes neurais nebulosas (BALLINI, 2000). No entanto, o modelo ANFIS utilizou somente funções de pertinencia gaussianas.

Em (MARQUES et al., 2008) o modelo ANFIS foi ajustado com diferentes funções de pertinência e, desta forma, foi comprovado o melhor desempenho em relação aos resultados anteriores.

Para mais informações sobre modelo Neurofuzzy ANFIS consultar (MARQUES et al., 2008). Posteriormente, será feita a comparação com os demais métodos apresentados neste capítulo 3.

Comparação dos Modelos

Neste capítulo são apresentados os estudos feitos para os modelos descritos no capítulo 3, fazendo uma análise dos erros de previsão e dos modelos. Para estes estudos considera-se períodos do histórico de vazões afluentes médias mensais da usina de Furnas e, para a análise comparativa da previsão, os cinco anos seguintes ao histórico.

4.1 Comentários Gerais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizados estudos nos modelos descritos no capítulo 3, para os grupos abaixo:

- **Grupo 1 - Previsão Atual:** Considera o final do histórico no ano de 2000.
- **Grupo 2 - Altas Vazões:** Considera os tempos do histórico (início/fim) com base nos registros de vazões elevadas, acima do esperado, nos meses de janeiro e fevereiro.
- **Grupo 3 - Baixas Vazões:** Considera os tempos do histórico (início/fim) com base nos registros de baixas de vazões, além do esperado, nos meses de janeiro e fevereiro.

A seleção dos períodos do histórico foi realizada por meio da observação do mesmo, na tentativa de identificar diferenças no comportamento dos previsores de cada modelo/método. Nas seções 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3, os critérios utilizados na seleção, são detalhados.

A Figura 2.1 apresenta o histórico de vazões afluentes médias mensais para o aproveitamento de Furnas. Observa-se a sazonalidade decorrente dos períodos úmidos ou secos ao longo dos anos.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as estatísticas mensais da série de vazões afluentes médias mensais de Furnas. Notadamente, o desvio-padrão para os meses

Tabela 4.1: *Informações estatísticas das vazões afluentes médias mensais para UHE Furnas*

Mês	Mínima	Máxima	Média	Desvio-padrão
1	594	3621	1739,21	677,04
2	357	3230	1656,29	627
3	477	3757	1478,16	593,86
4	401	2327	996,84	344,34
5	310	1572	736,88	231,65
6	276	2303	609,99	247,53
7	240	1308	502,11	154,4
8	240	1308	502,11	154,4
9	214	1889	441,24	227,98
10	210	1822	515,63	223,32
11	295	1989	729,88	311,62
12	334	3123	1239,56	460,91
Média	329	2354,08	928,99	354,5

mais úmidos são maiores em relação aos demais meses, influenciando diretamente nos modelos de previsão, gerando, nestes meses, erros superiores aos demais.

A Figura 4.1 apresenta a Média de Longo Termo (MLT) do histórico de vazões. Pode-se destacar a característica de sazonalidade e, o mês de março como período final do enchimento da usina.

A avaliação dos modelos neste trabalho é realizada com base na análise dos erros quadrático médio (EQM), absoluto médio (EAM), relativo percentual médio (EPM), definidos por:

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (4-1)$$

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |(y_j - \hat{y}_j)| \quad (4-2)$$

$$EPM = \frac{100}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|y_j - \hat{y}_j|}{y_j} \quad (4-3)$$

onde $n = 5$, y_j é o valor observado e \hat{y}_j é o valor estimado.

4.1.1 Grupo 1 - Previsão Atual

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos, utilizando os modelos PAR, PARMA, ANFIS, SAR e o método de Holt-Winters, considerando o histórico de vazões afluentes médias mensais da usina de Furnas, com início em 1931 até o



Figura 4.1: Média Longo Termo (MLT) de Furnas

ano 2000. A previsão é analisada em comparação com os valores reais dos cinco anos seguintes, ou seja, de janeiro de 2001 a dezembro de 2005, do histórico.

As figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, apresentam a previsão das vazões afluentes médias mensais para os modelos PAR, PARMA, SAR, ANFIS e, para o método de Holt-Winters. Os modelos PAR e PARMA apresentaram um desempenho muito similar, com correlação idênticas, ou seja, não houve ganho na previsão do modelo PAR, considerando Médias Móveis (MA).

Nas tabelas 4.3, 4.4, 4.7, 4.5 e 4.6, encontra-se os erros EQM, EAM e EPM¹ para cada modelo estudado. O menor erro geral é encontrado no modelo ANFIS, porém a previsão do método de Holt-Winters (correlação de 0,85433), nos meses de setembro, outubro e novembro, apresentou erros médios menores e, o erro apresentado, no mês de junho, para os modelos PAR e PARMA, foi o menor 5,24%, em relação ao erro, no mesmo mês, para modelo ANFIS.

Observa-se erro zero para o mês de agosto, nos modelos PAR, PARMA e ANFIS, significando boa previsão neste mês.

A Tabela 4.8, apresenta os valores reais e previstos para cada um dos modelo/método, no período de 5 anos. Observa-se o melhor desempenho geral do modelo ANFIS e, para os meses de setembro, outubro e novembro, o método de Holt-Winters. Importante notar que, o ano de 2001, o primeiro da previsão, foi a menor média geral de vazões médias mensais para o histórico, sendo melhor previsto no modelo ANFIS, porém os próximos dois anos são melhor ajustados pelo método Holt-Winters, na maioria dos meses.

¹ Respectivamente, Erro Quadrático Médio, Erro Absoluto Médio, Erro Percentual Médio.

Tabela 4.2: *Previsão para os anos 2001 a 2005.***Tabela 4.3:** *Erros PAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	171730,00	380,95	31,44
2	158395,27	356,71	30,51
3	70398,95	226,25	23,70
4	31829,56	164,94	22,77
5	13983,61	97,40	14,80
6	1615,55	37,68	7,56
7	594,25	22,51	6,09
8	0,00	0,00	0,00
9	14319,16	96,12	32,22
10	17536,27	116,23	37,30
11	15274,62	113,72	20,30
12	50514,70	152,74	11,18

Tabela 4.4: *Erros PARMA*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	171730,00	380,95	31,44
2	158395,27	356,71	30,51
3	70398,95	226,25	23,70
4	31829,56	164,94	22,77
5	13983,61	97,40	14,80
6	1615,55	37,68	7,56
7	594,25	22,51	6,09
8	0,00	0,00	0,00
9	14319,16	96,12	32,22
10	17536,27	116,23	37,30
11	15274,62	113,72	20,30
12	50514,70	152,74	11,18

Tabela 4.5: *Erros SAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	218330,44	446,39	34,08
2	158688,07	312,93	30,10
3	139436,09	298,68	35,90
4	79597,10	241,51	39,39
5	50309,93	202,80	39,32
6	35392,76	171,93	44,19
7	18879,95	122,20	36,21
8	13845,55	96,78	37,24
9	13381,85	109,71	36,72
10	25768,08	133,20	47,30
11	24968,80	145,84	28,55
12	54528,08	218,38	18,71

Tabela 4.6: *Erros Holt-Winters*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	315038,91	502,76	42,09
2	184738,09	336,59	32,43
3	116013,98	262,58	31,70
4	51780,81	192,12	30,88
5	43195,37	186,18	32,02
6	26562,83	156,69	35,63
7	17226,45	101,34	23,85
8	7075,48	69,56	20,81
9	7002,27	68,77	19,69
10	8390,43	74,00	25,16
11	12068,88	95,98	17,76
12	58875,54	206,26	16,67

Tabela 4.7: *Erros ANFIS*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	162236,15	372,84	26,99
2	141493,76	331,88	28,48
3	17914,96	125,96	12,53
4	28623,58	155,06	21,25
5	15796,00	77,21	10,24
6	3594,07	58,44	12,80
7	422,59	17,56	5,02
8	0,00	0,00	0,00
9	8904,07	76,81	26,63
10	20873,51	118,83	41,64
11	24361,42	126,22	21,97
12	50862,53	147,82	11,00

Tabela 4.8: Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (2001 a 2005).

Mês	REAL	PAR	PARMA	SAR	Holt-Winters	ANFIS
1	896	1328,12	1595,39	1500,19	1780,81	1328,12
2	713	1257,82	1295,62	1451,05	1515,06	1257,82
3	628	764,14	907,04	1339,51	1297,91	764,14
4	494	550,45	570,91	948,89	878,578	550,45
5	374	410,48	402,38	709,09	625,89	410,48
6	294	345,32	267,81	589,73	513,45	345,32
7	250	278,28	287,59	492,04	382,30	278,28
8	217	250	250	410,10	289,19	250,00
9	272	172,5	132,18	412,81	328,84	172,50
10	400	426,97	278,23	491,60	378,98	426,97
11	567	602,78	610,39	681,96	599,62	602,78
12	1029	1085,43	1045,78	1158,88	1098,29	1085,43
13	1240	1326,41	1607,10	1642,04	1780,81	1326,41
14	1982	1471,05	1445,96	1541,80	1515,06	1471,05
15	1147	1308,81	1546,44	1395,20	1297,91	1308,81
16	641	904,56	918,34	975,20	878,57	904,56
17	512	520,32	627,21	722,23	625,89	520,32
18	420	456,65	388,74	597,05	513,45	456,65
19	381	373,07	371,65	496,13	382,30	373,07
20	308	381	381	412,39	289,19	381,00
21	354	350,08	289,1	414,36	328,84	350,08
22	222	476,1	399,39	492,8365	378,98	476,1
23	549	405,19	425,98	683,11	599,62	405,19
24	998	1067,74	920,28	1160,19	1098,29	1067,74
25	1882	1343,26	1584,42	1643,29	1780,81	1343,26
26	1396	1734,06	1726,54	1542,58	1515,06	1734,06
27	1072	1199,01	1398,30	1395,68	1297,91	1199,01
28	718	886,74	872,07	975,43	878,57	886,74
29	531	574,77	613,66	722,34	625,89	574,77
30	394	469,39	416,42	597,11	513,45	469,39
31	385	353,51	368	496,16	382,30	353,51
32	271	385	385	412,41	289,19	385

Continua...

Tabela 4.8: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (2001 a 2005).*

33	261	353,58	293,89	414,37	328,84	353,58
34	302	419,9	369,45	492,84	378,98	419,9
35	433	448,2	508,86	683,12	599,62	448,2
36	916	953,25	892,54	1160,21	1098,29	953,25
37	1252	1679,92	1524,42	1643,30	1780,81	1679,92
38	1614	1478,49	1451,20	1542,59	1515,06	1478,49
39	1326	1490,66	1381,55	1395,69	1297,91	1490,66
40	1048	926,40	925,43	975,43	878,57	926,40
41	761	784,41	717,28	722,34	625,89	784,41
42	692	625,40	634,49	597,11	513,45	625,40
43	564	559,24	539	496,16	382,30	559,24
44	386	564	564	412,41	289,19	564
45	294	452,65	508,31	414,37	328,84	452,65
46	483	440,76	507,16	492,84	378,98	440,76
47	520	785,24	696,38	683,12	599,62	785,24
48	1526	1039,19	1066,74	1160,21	1098,29	1039,19
49	2239	1860,02	1970,73	1643,30	1780,81	1860,02
50	1711	1841,06	1882,57	1542,59	1515,06	1841,06
51	1536	1576,16	1606,91	1395,69	1297,91	1576,16
52	887	1051,94	1080,78	975,43	878,57	1051,94
53	961	686,93	743,99	722,34	625,89	686,93
54	686	748,24	737,04	597,11	513,45	748,24
55	571	555,64	594,60	496,16	382,30	555,64
56	431	571	571	412,41	289,19	571
57	488	458,62	516,70	414,37	328,84	458,62
58	390	542,94	580,41	492,84	378,98	542,94
59	750	578,93	600,03	683,12	599,62	578,93
60	1350	1261,14	1163,51	1160,21	1098,29	1261,14

4.1.2 Grupo 2 - Altas Vazões

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos, utilizando os modelos PAR, PARMA, ANFIS, SAR e Holt-Winters, para a UHE de Furnas, considerando os tempos do histórico (início/fim) com base nos registros de vazões elevadas, acima

do esperado, nos meses de janeiro e fevereiro. A definição dos períodos do histórico foi realizada, por meio da observação da série temporal da UHE de FURNAS, obedecendo os seguintes passos:

- Identificação das maiores vazões médias mensais registradas nos meses de janeiro e/ou fevereiro.
- Definição dos subconjuntos de previsões ou histórico, contendo o ano de maior vazão.

Desta forma, os períodos de previsão, contendo cheias, além do esperado, são:

1. janeiro de 1996 a dezembro de 2000 - análise do ano 1997;
2. janeiro de 1979 a dezembro de 1983 - análise do ano 1983;
3. janeiro de 1965 a dezembro de 1969 - análise dos anos 1966 e 1967.

E, os períodos de previsão, cujo histórico termina em anos onde ocorreram cheias, além do esperado, são:

1. janeiro de 1996 a dezembro de 2000;
2. janeiro de 1984 a dezembro de 1988;
3. janeiro de 1998 a dezembro de 2002.

O objetivo, desta definição do histórico, é analisar o comportamento dos modelos, verificando o desempenho dos mesmos na previsão das vazões acima do esperado para os meses de janeiro e fevereiro ou, na previsão dos anos seguintes às cheias.

As Figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, apresentam a previsão das vazões afluentes médias mensais para os modelos PAR, PARMA, SAR, ANFIS e, para o método de Holt-Winters. Os modelos PAR e PARMA, apresentaram um desempenho muito similar com correlação idênticas, ou seja, não houve ganho na previsão do modelo PAR, considerando Médias Móveis (MA).

Nas Tabelas 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14, encontram-se os erros EQM, EAM e EPM para cada modelo estudado. O menor erro geral é encontrado no modelo modelo PAR ou PARMA, porém a previsão do método de Holt-Winters (correlação de 0,83685), nos meses de janeiro, março, abril e outubro, apresentou erros médios menores. Ainda, os erros apresentados nos meses de julho e dezembro para os modelos PAR e PARMA, são os menores em todo o ano, em relação a todos os modelos. Observa-se erro zero para o mês de agosto, nos modelos PAR, PARMA e ANFIS, significando bom ajuste na previsão deste mês. Ainda, a ANFIS apresenta

a maior correlação (0,90266) entre os modelos e, os menores erros para os meses de fevereiro, maio, junho e agosto.

Na Tabela 4.15 são apresentados os valores reais e previstos. Para a previsão do ano de 1997, o modelo ANFIS e SAR apresentaram melhor previsão: ANFIS, nos meses de cheia e SAR, nos meses de seca. Vale ressaltar a previsão do último ano (2000), apresentando o método de Holt-Winters com melhores resultados.

Tabela 4.15: *Valores Reais e Previstos -PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1996 a 2000).*

Mês	REAL	PAR	PARMA	SAR	Holt-Winters	ANFIS
1	1928	1548,06	1548,06	1437,76	1679,14	1001,86
2	1231	1780,36	1780,36	1432,18	1563,21	1750,96
3	1431	1355,01	1355,01	1330,62	1308,40	1278,91
4	829	983,77	983,77	955,06	916,30	1018,00
5	664	671,72	671,72	714,10	627,83	660,46
6	499	519,69	519,69	589,0394	486,23	593,86
7	442	444,49	444,49	494,85	361,59	426,77
8	389	442,00	442,00	412,56	265,03	442,00
9	681	353,65	353,65	410,8229	300,21	409,54
10	518	576,62	576,62	500,45	384,38	795,78
11	1455	722,57	722,57	682,59	565,07	776,25
12	1736	1723,18	1723,18	1161,96	1106,68	2035,21
13	3621	2081,83	2081,83	1605,38	1679,14	3667,52
14	1824	2593,64	2593,64	1543,68	1563,21	1908,68
15	1498	1984,93	1984,93	1400,20	1308,40	1707,48
16	1066	1243,09	1243,09	988,74	916,30	1047,94
17	765	904,68	904,68	731,13	627,83	801,22
18	863	634,44	634,44	598,55	486,23	630,29
19	578	602,81	602,81	500,27	361,59	713,35
20	437	578,00	578,00	415,62	265,03	578,00
21	405	520,84	520,84	412,89	300,21	508,96
22	502	555,72	555,72	502,16	384,38	521,35
23	715	705,88	705,88	684,18	565,07	773,40
24	1185	1212,97	1212,97	1163,80	1106,68	1200,26
25	1191	1688,64	1688,64	1607,10	1679,14	1609,44
26	1248	1426,33	1426,33	1544,81	1563,21	956,81

Continua...

Tabela 4.15: *Valores Reais e Previstos -PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1996 a 2000).*

27	965	1201,81	1201,81	1400,90	1308,40	1259,83
28	676	775,50	775,50	989,07	916,30	803,40
29	571	552,02	552,02	731,30	627,83	548,57
30	513	426,68	426,68	598,64	486,23	530,30
31	362	423,50	423,50	500,32	361,59	436,09
32	360	362,00	362,00	415,65	265,03	362,00
33	260	255,30	255,30	412,91	300,21	298,28
34	501	359,76	359,76	502,18	384,38	429,12
35	525	704,84	704,84	684,20	565,07	772,98
36	1010	1083,94	1083,94	1163,82	1106,68	1057,95
37	1681	1563,76	1563,76	1607,12	1679,14	1037,72
38	1410	1661,71	1661,71	1544,82	1563,21	1471,71
39	1545	1379,89	1379,89	1400,91	1308,40	1096,70
40	754	1013,85	1013,85	989,07	916,30	1068,76
41	531	664,48	664,48	731,30	627,83	607,54
42	502	414,59	414,59	598,64	486,23	492,65
43	400	408,38	408,38	500,32	361,59	428,75
44	278	400,00	400,00	415,65	265,03	400,00
45	290	302,02	302,02	412,91	300,21	360,36
46	210	396,00	396,00	502,18	384,38	445,75
47	335	401,36	401,36	684,20	565,07	356,18
48	796	770,46	770,46	1163,82	1106,68	911,59
49	2248	1411,05	1411,05	1607,12	1679,14	1517,48
50	1817	1934,08	1934,08	1544,82	1563,21	1783,13
51	1376	1682,52	1682,52	1400,91	1308,40	1712,07
52	811	1069,35	1069,35	989,07	916,30	993,22
53	540	743,33	743,33	731,30	627,83	648,11
54	493	431,78	431,78	598,64	486,23	501,68
55	419	407,68	407,68	500,32	361,59	422,81
56	380	419,00	419,00	415,65	265,03	419,00
57	558	325,37	325,37	412,91	300,21	388,41
58	302	513,50	513,50	502,18	384,38	478,73
59	703	497,30	497,30	684,20	565,07	429,23

Continua...

Tabela 4.15: *Valores Reais e Previstos -PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1996 a 2000).*

60	1013	1077,64	1077,64	1163,82	1106,68	1191,18
----	------	---------	---------	---------	---------	---------

Para a previsão dos anos de 1979 a 1983 observa-se na Tabela 4.16 um rendimento muito inferior do modelo ANFIS, apresentando grandes erros para os meses de outubro. O modelo de Holt-Winters, também, apresenta um desempenho inferior em relação aos estudos anteriores. O menor erro nas previsões é obtido à partir dos modelos PAR e PARMA.

A Tabela 4.22 mostra os valores reais e previstos para todos os modelos estudados. Para o modelo SAR é importante observar a baixa qualidade na previsão, especialmente para os meses de junho a novembro. A Figura 4.19 apresenta os valores reais e previstos. Para o modelo ANFIS, observa-se os erros significativos para os meses outubro do ano de 1979 e novembro de 1983. O modelo SAR e o método de Holt-Winters possuem desempenho muito semelhante.

Ainda, para a previsão dos últimos 12 meses, ano de 1983, a melhor previsão é obtida com os modelos PAR e PARMA. Porém, para os meses de cheia fevereiro/março e, para o mês de abril, o melhor ajuste é observado no modelo ANFIS.

Tabela 4.22: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1979 a 1983).*

Mês	REAL	PAR	PARMA	SAR	Holt-Winters	ANFIS
1	1385	1537,43	1537,43	1470,638	1461,4617	1246,57
2	2413	1493,31	1493,31	1429,5535	1351,8322	1583,20
3	1422	1948,82	1948,82	1314,4443	1275,7261	1665,85
4	963	1054,57	1054,57	922,1083	953,9654	998,52
5	808	827,79	827,79	678,0965	701,9765	717,67
6	642	642,01	642,01	566,7159	608,2715	653,42
7	578	537,61	537,61	482,614	513,8179	527,50
8	552	578,00	578,00	397,0381	400,3966	578,00
9	733	484,56	484,56	392,3084	415,8086	485,58
10	527	637,73	637,73	492,0309	473,9958	10270,7
11	946	753,39	753,39	714,7897	773,627	825,29
12	1651	1335,54	1335,54	1145,8502	1156,489	1420,51

Continua...

Tabela 4.22: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1979 a 1983).*

13	2690	2037,65	2037,65	1512,8794	1461,4617	1817,65
14	1929	2220,68	2220,68	1457,9039	1351,8322	1512,51
15	1121	1665,53	1665,53	1332,4665	1275,7261	1810,36
16	1709	912,81	912,81	930,8573	953,9654	858,00
17	915	930,11	930,11	682,5516	701,9765	1210,36
18	784	711,83	711,83	569,2952	608,2715	707,30
19	674	649,17	649,17	484,1361	513,8179	641,55
20	487	674,00	674,00	397,9061	400,3966	674,00
21	492	567,43	567,43	392,9029	415,8086	500,22
22	459	633,11	633,11	492,5479	473,9958	649,16
23	824	678,76	678,76	715,3104	773,627	774,17
24	1762	1218,58	1218,58	1146,429	1156,489	1268,21
25	2713	2138,42	2138,42	1513,4093	1461,4617	2408,25
26	1297	2233,50	2233,50	1458,2579	1351,8322	1720,86
27	1216	1295,61	1295,61	1332,6909	1275,7261	1243,31
28	917	875,06	875,06	930,966	953,9654	904,30
29	698	637,77	637,77	682,6069	701,9765	690,69
30	704	570,23	570,23	569,3272	608,2715	587,7
31	504	586,32	586,32	484,155	513,8179	572,81
32	469	504,00	504,00	397,9169	400,3966	504,00
33	355	420,69	420,69	392,9102	415,8086	365,78
34	819	496,48	496,48	492,5543	473,9958	462,76
35	1325	1073,88	1073,88	715,3169	773,627	1096,59
36	2333	1757,66	1757,66	1146,4361	1156,489	1714,26
37	2417	2656,79	2656,79	1513,4159	1461,4617	1891,09
38	1820	2068,52	2068,52	1458,2623	1351,8322	3398,77
39	2845	1601,73	1601,73	1332,6936	1275,7261	2846,01
40	1651	1421,91	1421,91	930,9673	953,9654	1434,28
41	1061	1049,08	1049,08	682,6076	701,9765	1164,13
42	952	807,10	807,10	569,3276	608,2715	775,24
43	760	781,15	781,15	484,1552	513,8179	823,22
44	627	760,00	760,00	397,917	400,3966	760,00
45	488	641,66	641,66	392,9103	415,8086	1193,27

Continua...

Tabela 4.22: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1979 a 1983).*

46	769	683,39	683,39	492,5543	473,9958	647,22
47	798	1019,00	1019,00	715,317	773,627	1093,41
48	2073	1429,87	1429,87	1146,4362	1156,489	1236,02
49	3506	2420,76	2420,76	1513,4159	1461,4617	775,97
50	3230	2675,49	2675,49	1458,2624	1351,8322	3005,97
51	3046	2427,02	2427,02	1332,6937	1275,7261	3236,81
52	2327	1630,82	1630,82	930,9674	953,9654	1487,40
53	1572	1447,89	1447,89	682,6076	701,9765	1734,69
54	2303	1140,55	1140,55	569,3276	608,2715	1087,48
55	1308	1842,52	1842,52	484,1552	513,8179	2562,01
56	921	1308,00	1308,00	397,917	400,3966	1308,00
57	1889	1114,67	1114,67	392,9103	415,8086	887,74
58	1822	1370,22	1370,22	492,5543	473,9958	1795,41
59	1989	2174,72	2174,72	715,317	773,627	3467,91
60	3123	2854,94	2854,94	1146,4362	1156,489	1847,55

Para o grupo de previsão dos anos de 1965 a 1969, o resultado do desempenho dos modelos foi similar ao obtido com a previsão para os anos de 1979 a 1983. O melhor ajuste é obtido com os modelos PAR e PARMA. Observa-se na Tabela 4.23 que o modelo SAR e o método Holt-Winters apresentam erros próximos, com variações percentuais médias de menos de três pontos percentuais.

Na Figura 4.25 observa-se, novamente, erros significativos para o modelo ANFIS, provavelmente em decorrência do pequeno período de treinamento para a rede neural.

Na Tabela 4.29 destaque para a previsão dos anos de 1966 (ano que contém cheia) e 1967 (ano após cheia). Ambos apresentam melhor ajuste para os modelos PAR e PARMA.

Tabela 4.29: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1965 a 1969).*

Mês	REAL	PAR	PARMA	SAR	Holt-Winters	ANFIS
1	2464	1671,88	1671,88	1697,42	1676,53	1903,02
2	3125	2079,27	2079,27	1723,88	1835,35	2661,97

Continua...

Tabela 4.29: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1965 a 1969).*

3	2523	2262,65	2262,65	1491,36	1597,82	506,71
4	1321	1471,20	1471,20	1007,81	1110,34	1329,87
5	1438	1068,45	1068,45	741,19	862,25	875,45
6	1062	1050,17	1050,17	590,05	691,68	1023,03
7	947	853,34	853,34	483,60	569,33	896,76
8	777	947,00	947,00	400,16	470,72	947
9	641	776,43	776,43	380,62	444,93	770,87
10	973	618,81	618,81	451,60	517,02	865,49
11	1188	1037,25	1037,25	625,15	699,33	1343,62
12	1869	1845,79	1845,79	1011,50	1123,50	1681,46
13	3033	2129,69	2129,69	1473,39	1676,53	-30107,00
14	2092	2343,93	2343,93	1570,97	1835,35	1861,11
15	2679	1743,65	1743,65	1403,18	1597,82	291,61
16	1450	1406,43	1406,43	968,30	1110,34	1444,46
17	1034	989,59	989,59	721,99	862,25	1156,77
18	726	782,50	782,50	579,97	691,68	803,97
19	581	592,08	592,08	478,17	569,33	585,88
20	486	581,00	581,00	397,20	470,72	581
21	484	476,69	476,69	378,78	444,93	447,01
22	805	527,63	527,63	450,16	517,02	714,78
23	1343	906,74	906,74	623,84	699,33	963,88
24	1856	2050,77	2050,77	1010,11	1123,50	1576,4
25	3014	2119,99	2119,99	1472,06	1676,53	-30002,00
26	2594	2335,09	2335,09	1570,04	1835,35	1930,25
27	1916	1995,87	1995,87	1402,63	1597,82	1468,24
28	1168	1231,73	1231,73	968,05	1110,34	1100,34
29	880	923,09	923,09	721,87	862,25	826,69
30	763	680,47	680,47	579,91	691,68	682,3
31	624	620,85	620,85	478,13	569,33	617,28
32	546	624,00	624,00	397,18	470,72	624
33	503	511,91	511,91	378,76	444,93	518,1
34	523	538,66	538,66	450,15	517,02	509,44
35	1080	687,66	687,66	623,84	699,33	757,63

Continua...

Tabela 4.29: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1965 a 1969).*

36	1303	1702,97	1702,97	1010,10	1123,50	1754,59
37	1656	1707,67	1707,67	1472,05	1676,53	2068,39
38	988	1703,46	1703,46	1570,04	1835,35	1568,2
39	959	1188,98	1188,98	1402,63	1597,82	192,71
40	612	771,14	771,14	968,05	1110,34	743,71
41	471	513,67	513,67	721,87	862,25	450,73
42	409	409,49	409,49	579,91	691,68	409,58
43	358	345,59	345,59	478,13	569,33	345,58
44	367	358,00	358,00	397,18	470,72	358
45	363	294,06	294,06	378,76	444,93	301,45
46	453	457,36	457,36	450,15	517,02	324,08
47	390	633,28	633,28	623,84	699,33	709,61
48	1337	790,49	790,49	1010,10	1123,50	868,94
49	1171	1733,02	1733,02	1472,05	1676,53	1949,96
50	1193	1477,87	1477,87	1570,04	1835,35	918,32
51	966	1291,98	1291,98	1402,63	1597,82	3363,3
52	636	795,38	795,38	968,05	1110,34	745,89
53	413	545,53	545,53	721,87	862,25	514,08
54	436	371,07	371,07	579,91	691,68	349,31
55	338	366,59	366,59	478,13	569,33	367,87
56	313	338,00	338,00	397,18	470,72	338
57	214	277,68	277,68	378,76	444,93	287,29
58	478	370,84	370,84	450,15	517,02	493,5
59	1241	652,70	652,70	623,84	699,33	732,37
60	1143	1915,88	1915,88	1010,10	1123,50	1645,54

A previsão para os anos de 1984 a 1988 mantiveram como melhor ajuste os modelos PAR e PARMA, apresentando erros médios menores, como observa-se na Tabela 4.30. Observa-se também o pior ajuste para o método de Holt-Winters (ver Figura 4.31) em comparação com as demais previsões e, com as previsões anteriores, considerando outros históricos a partir do método de Holt-Winters.

A melhor correlação é obtida no modelo ANFIS (0,89912), porém, a correlação em Holt-Winters apresenta valor muito próximo ao da ANFIS, 0,88082.

Tabela 4.9: *Previsão para os anos 1996 a 2000.***Tabela 4.10:** *Erros PAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	695057,92	674,19	29,64
2	200600,81	373,22	25,08
3	84033,97	254,27	19,06
4	39896,21	189,91	23,26
5	15818,37	100,64	17,11
6	14300,89	96,84	15,46
7	920,38	21,70	5,33
8	0,00	0,00	0,00
9	34971,95	138,51	24,86
10	21119,95	130,22	41,76
11	123119,87	238,69	26,99
12	2249,04	40,98	4,00

Tabela 4.11: *Erros PARMA*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	695057,92	674,19	29,64
2	200600,81	373,22	25,08
3	84033,97	254,27	19,06
4	39896,21	189,91	23,26
5	15818,37	100,64	17,11
6	14300,89	96,84	15,46
7	920,38	21,70	5,33
8	0,00	0,00	0,00
9	34971,95	138,51	24,86
10	21119,95	130,22	41,76
11	123119,87	238,69	26,99
12	2249,04	40,98	4,00

Tabela 4.12: *Erros SAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	978473,86	727,34	29,79
2	59881,27	237,06	16,01
3	46206,79	160,62	13,97
4	41370,17	185,91	24,38
5	21214,26	127,18	22,64
6	21175,35	128,49	21,21
7	8929,77	90,11	21,62
8	4866,21	54,78	17,06
9	26519,86	139,80	33,76
10	25151,44	102,26	41,82
11	149039,60	266,08	38,93
12	102333,74	253,54	22,24

Tabela 4.13: *Erros Holt-Winters*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	878924,02	649,91	26,59
2	73123,54	263,04	18,28
3	45889,75	191,96	15,41
4	25041,81	148,98	18,93
5	8088,82	82,97	13,57
6	28624,25	87,76	11,19
7	11613,89	78,61	15,81
8	13468,16	103,76	26,50
9	44831,50	158,76	29,40
10	16496,47	124,92	36,56
11	177599,82	289,58	35,61
12	103364,08	241,74	20,14

Tabela 4.14: *Erros ANFIS*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	396490,69	552,98	31,04
2	73454,15	198,28	15,29
3	93571,50	288,16	21,72
4	36911,20	166,29	21,51
5	3875,03	49,37	8,73
6	12722,62	72,58	10,59
7	4976,27	51,45	11,09
8	0,00	0,00	0,00
9	23934,67	130,73	26,98
10	33902,20	156,30	48,52
11	120202,18	256,02	29,46
12	27433,67	131,24	11,08

Tabela 4.16: *Previsão para os anos 1979 a 1983.***Tabela 4.17:** *Erros PAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	402838,88	540,88	19,46
2	435434,07	590,18	31,25
3	501848,60	602,64	31,24
4	236243,87	370,99	20,89
5	3958,79	46,23	4,35
6	279078,71	302,66	18,78
7	59036,35	140,64	14,13
8	0,00	0,00	0,00
9	138984,96	263,51	28,04
10	71604,95	228,95	26,85
11	40917,54	199,14	18,79
12	242261,25	469,08	22,84

Tabela 4.18: *Erros PARMA*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	402838,88	540,88	19,46
2	435434,07	590,18	31,25
3	501848,60	602,64	31,24
4	236243,87	370,99	20,89
5	3958,79	46,23	4,35
6	279078,71	302,66	18,78
7	59036,35	140,64	14,13
8	0,00	0,00	0,00
9	138984,96	263,51	28,04
10	71604,95	228,95	26,85
11	40917,54	199,14	18,79
12	242261,25	469,08	22,84

Tabela 4.19: *Erros SAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	507632,32	514,99	18,76
2	530629,08	519,75	22,74
3	653186,83	712,85	40,36
4	291109,16	402,62	31,08
5	83044,17	224,20	20,06
6	453391,29	511,45	50,65
7	116720,05	331,93	52,24
8	59177,81	235,76	45,85
9	314802,21	435,03	57,58
10	352891,95	556,50	105,44
11	430209,54	635,30	104,06
12	550555,92	605,90	36,74

Tabela 4.20: *Erros Holt-Winters*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	1634938,23	1111,32	39,03
2	1041780,34	807,90	32,40
3	1129078,74	740,05	28,46
4	588521,31	574,22	30,07
5	188494,91	310,41	25,23
6	606287,21	468,73	30,19
7	144240,97	254,91	25,99
8	71513,43	210,80	30,51
9	457123,54	399,91	33,73
10	405241,00	411,20	33,56
11	362797,53	402,77	26,02
12	1340504,15	1031,91	44,39

Tabela 4.21: *Erros ANFIS*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	1720532,83	914,29	30,66
2	716879,41	694,59	36,47
3	114367,06	230,47	17,44
4	295504,00	391,11	20,82
5	26511,54	131,77	12,92
6	305652,67	319,34	19,89
7	316973,76	293,80	26,28
8	0,00	0,00	0,00
9	312265,26	394,59	47,20
10	19023778,86	2087,70	390,23
11	5986866,25	1230,25	69,48
12	601420,63	691,09	29,94

Tabela 4.23: *Previsão para os anos 1965 a 1969.***Tabela 4.24:** *Erros PAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	512242,07	640,63	28,54
2	363414,89	511,38	30,36
3	221637,14	366,30	21,43
4	15849,41	115,20	14,18
5	31956,86	126,45	15,21
6	2871,97	43,26	6,95
7	1975,26	29,78	4,85
8	0,00	0,00	0,00
9	5456,48	56,85	14,63
10	42827,26	151,75	19,45
11	154452,24	362,19	38,26
12	218894,03	387,47	30,19

Tabela 4.25: *Erros PARMA*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	512242,07	640,63	28,54
2	363414,89	511,38	30,36
3	221637,14	366,30	21,43
4	15849,41	115,20	14,18
5	31956,86	126,45	15,21
6	2871,97	43,26	6,95
7	1975,26	29,78	4,85
8	0,00	0,00	0,00
9	5456,48	56,85	14,63
10	42827,26	151,75	19,45
11	154452,24	362,19	38,26
12	218894,03	387,47	30,19

Tabela 4.26: *Erros SAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	1104420,09	870,63	34,10
2	752804,81	781,04	39,95
3	668601,46	740,22	41,35
4	121426,37	336,59	36,89
5	153247,64	345,34	44,93
6	65501,15	223,18	32,67
7	56131,57	194,47	33,00
8	36007,91	145,76	25,83
9	24339,73	134,07	33,68
10	80773,63	195,96	23,61
11	295528,15	517,83	50,57
12	332229,81	491,22	30,00

Tabela 4.27: *Erros Holt-Winters*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	900984,52	801,49	33,09
2	687045,14	758,93	44,48
3	586686,64	719,04	45,13
4	127282,54	316,13	40,06
5	143240,80	321,15	50,10
6	57736,29	202,86	35,34
7	48786,71	177,33	35,62
8	27068,16	131,66	27,00
9	20676,64	121,21	36,14
10	59301,14	170,60	21,22
11	237420,15	472,80	49,45
12	234104,65	378,10	22,16

Tabela 4.28: *Erros ANFIS*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	446263340,86	13706,06	464,55
2	224071,06	442,51	26,64
3	3407802,29	1680,09	112,13
4	6822,20	64,73	9,13
5	69000,39	172,00	17,17
6	4325,03	56,98	9,00
7	727,90	20,83	3,91
8	0,00	0,00	0,00
9	5524,74	63,36	16,42
10	7348,54	71,14	11,31
11	126545,69	337,07	38,82
12	157779,96	377,86	27,75

A Tabela 4.36 apresenta todos os valores previstos pelos modelos/método e, os valores reais. Em 21 meses, o melhor ajuste apresentado foi ANFIS, em 19 meses, SAR e, em 23 meses, PAR/PARMA. Em alguns meses, os modelos PAR, PARMA e ANFIS mostram previsões iguais. Outro fator relevante é, em meses que o melhor ajuste é apresentado apenas por PAR e PARMA, a ANFIS apresenta um valor muito próximo e, em meses em que a ANFIS apresenta melhor desempenho, os valores de PAR e PARMA são, também, muito próximos.

Tabela 4.36: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1984 a 1988).*

Mês	REAL	PAR	PARMA	SAR	Holt-Winters	ANFIS
1	2192	3149,13	3149,13	3251,46	3230,99	2903,47
2	1315	1931,91	1931,91	2499,70	2984,03	1869,25
3	994	1440,75	1440,75	1980,60	2875,49	1067,70
4	914	899,10	899,10	1310,43	2471,24	856,42
5	861	644,63	644,63	882,00	2143,38	681,68
6	577	686,38	686,38	736,11	2121,17	716,94
7	466	533,31	533,31	589,67	1934,92	482,39
8	482	466,00	466,00	469,67	1828,94	466,00
9	547	380,55	380,55	470,06	1911,51	383,86
10	424	547,82	547,82	578,26	1977,79	598,47
11	631	653,06	653,06	836,49	2247,26	658,92
12	1326	1106,41	1106,41	1370,44	2837,40	1146,55
13	2594	1635,83	1635,83	1787,83	3230,99	1825,00
14	2210	2146,53	2146,53	1619,08	2984,03	1940,43
15	2434	1964,93	1964,93	1444,88	2875,49	2015,69
16	1343	1459,63	1459,63	1042,21	2471,24	1356,62
17	881	1012,69	1012,69	746,88	2143,38	978,26
18	680	789,53	789,53	652,38	2121,17	735,48
19	565	574,91	574,91	540,17	1934,92	554,98
20	476	565,00	565,00	440,70	1828,94	565,00
21	503	502,80	502,80	448,82	1911,51	442,48
22	470	591,01	591,01	559,17	1977,79	580,08
23	759	699,96	699,96	816,34	2247,26	816,64
24	1036	1224,35	1224,35	1346,39	2837,40	1272,89
25	1716	1555,93	1555,93	1764,99	3230,99	2367,56

Continua...

Tabela 4.36: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1984 a 1988).*

26	1540	1677,79	1677,79	1604,04	2984,03	1769,66
27	1365	1462,77	1462,77	1435,12	2875,49	1554,65
28	806	978,65	978,65	1037,09	2471,24	924,36
29	833	660,31	660,31	744,21	2143,38	609,59
30	555	643,73	643,73	650,69	2121,17	690,02
31	565	517,33	517,33	539,15	1934,92	467,10
32	590	565,00	565,00	440,10	1828,94	565,00
33	369	502,80	502,80	448,37	1911,51	442,48
34	294	535,49	535,49	558,76	1977,79	500,09
35	343	520,51	520,51	815,91	2247,26	444,86
36	1700	818,27	818,27	1345,88	2837,40	862,28
37	1945	2578,78	2578,78	1764,50	3230,99	2304,60
38	1757	1800,05	1800,05	1603,72	2984,03	1819,68
39	1209	1614,88	1614,88	1434,91	2875,49	1151,18
40	1232	979,65	979,65	1036,98	2471,24	967,05
41	838	797,66	797,66	744,15	2143,38	899,95
42	703	735,37	735,37	650,65	2121,17	694,87
43	548	570,02	570,02	539,13	1934,92	572,72
44	434	548,00	548,00	440,08	1828,94	548,00
45	573	481,81	481,81	448,36	1911,51	427,99
46	459	609,47	609,47	558,76	1977,79	607,51
47	590	688,75	688,75	815,90	2247,26	777,01
48	1345	1111,40	1111,40	1345,87	2837,40	1106,08
49	1303	1811,83	1811,83	1764,49	3230,99	1667,01
50	1788	1457,30	1457,30	1603,71	2984,03	1537,04
51	1421	1508,28	1508,28	1434,91	2875,49	1544,53
52	843	974,27	974,27	1036,98	2471,24	974,52
53	713	693,31	693,31	744,15	2143,38	634,17
54	645	564,21	564,21	650,65	2121,17	581,39
55	435	512,64	512,64	539,13	1934,92	529,46
56	384	435,00	435,00	440,08	1828,94	435,00
57	321	342,27	342,27	448,36	1911,51	370,43
58	563	434,93	434,93	558,76	1977,79	462,66

Continua...

Tabela 4.36: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1984 a 1988).*

59	655	794,79	794,79	815,90	2247,26	677,42
60	810	1240,64	1240,64	1345,87	2837,40	1170,24

Para a previsão dos anos de 1998 a 2002 é importante considerar o registro de cheia do ano 1997, o maior de todo o histórico. Nenhum dos modelos apresentou bom ajuste, fato que pode ser observado com o auxílio da Tabela 4.37. Para o ano de 2001 (ver Tabela 4.43), pode-se observar o ajuste inferior em relação aos demais estudos, para cada modelo. Neste ano de 2001 encontra-se a menor média geral das vazões afluentes médias mensais. Nota-se, também, que em 25 meses, o valor mais ajustado ao valor real foi encontrado a partir do método de Holt-Winters. Ainda, pontualmente, a ANFIS se ajusta melhor em 13 dos 60 meses.

Para os meses de julho e agosto, as previsões dos modelo PAR, PARMA e ANFIS mantém a característica de qualidade. A Figura 4.37 apresenta o comparativo entre os valores reais e previstos para cada modelo estudado. A maior correlação observada foi o modelo ANFIS, 0,90795.

Tabela 4.43: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1998 a 2002).*

Mês	REAL	PAR	PARMA	SAR	Holt-Winters	ANFIS
1	1191	3149,13	3149,13	1664,87	1875,32	2903,47
2	1248	1931,91	1931,91	1556,13	1605,91	1869,25
3	965	1440,75	1440,75	1406,80	1389,88	1067,70
4	676	899,10	899,10	993,03	997,01	856,42
5	571	644,63	644,63	736,08	725,65	681,68
6	513	686,38	686,38	605,15	599,79	716,94
7	362	533,31	533,31	504,21	469,32	482,39
8	360	466,00	466,00	418,19	374,15	466,00
9	260	380,55	380,55	420,35	420,08	383,86
10	501	547,82	547,82	506,42	489,35	598,47
11	525	653,06	653,06	696,50	708,95	658,92
12	1010	1106,41	1106,41	1175,85	1217,45	1146,55
13	1681	1635,83	1635,83	1656,19	1875,32	1825,00
14	1410	2146,53	2146,53	1550,65	1605,91	1940,43

Continua...

Tabela 4.43: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1998 a 2002).*

15	1545	1964,93	1964,93	1403,46	1389,88	2015,69
16	754	1459,63	1459,63	991,44	997,01	1356,62
17	531	1012,69	1012,69	735,28	725,65	978,26
18	502	789,53	789,53	604,71	599,79	735,48
19	400	574,91	574,91	503,96	469,32	554,98
20	278	565,00	565,00	418,05	374,15	565,00
21	290	502,80	502,80	420,25	420,08	442,48
22	210	591,01	591,01	506,34	489,35	580,08
23	335	699,96	699,96	696,43	708,95	816,64
24	796	1224,35	1224,35	1175,76	1217,45	1272,89
25	2248	1555,93	1555,93	1656,11	1875,32	2367,56
26	1817	1677,79	1677,79	1550,60	1605,91	1769,66
27	1376	1462,77	1462,77	1403,43	1389,88	1554,65
28	811	978,65	978,65	991,43	997,01	924,36
29	540	660,31	660,31	735,27	725,65	609,59
30	493	643,73	643,73	604,71	599,79	690,02
31	419	517,33	517,33	503,96	469,32	467,10
32	380	565,00	565,00	418,05	374,15	565,00
33	558	502,80	502,80	420,25	420,08	442,48
34	302	535,49	535,49	506,34	489,35	500,09
35	703	520,51	520,51	696,43	708,95	444,86
36	1013	818,27	818,27	1175,76	1217,45	862,28
37	896	2578,78	2578,78	1656,11	1875,32	2304,60
38	713	1800,05	1800,05	1550,60	1605,91	1819,68
39	628	1614,88	1614,88	1403,43	1389,88	1151,18
40	494	979,65	979,65	991,43	997,01	967,05
41	374	797,66	797,66	735,27	725,65	899,95
42	294	735,37	735,37	604,71	599,79	694,87
43	250	570,02	570,02	503,96	469,32	572,72
44	217	548,00	548,00	418,05	374,15	548,00
45	272	481,81	481,81	420,25	420,08	427,99
46	400	609,47	609,47	506,34	489,35	607,51
47	567	688,75	688,75	696,43	708,95	777,01

Continua...

Tabela 4.43: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1998 a 2002).*

48	1029	1111,40	1111,40	1175,76	1217,45	1106,08
49	1240	1811,83	1811,83	1656,11	1875,32	1667,01
50	1982	1457,30	1457,30	1550,60	1605,91	1537,04
51	1147	1508,28	1508,28	1403,43	1389,88	1544,53
52	641	974,27	974,27	991,43	997,01	974,52
53	512	693,31	693,31	735,27	725,65	634,17
54	420	564,21	564,21	604,71	599,79	581,39
55	381	512,64	512,64	503,96	469,32	529,46
56	308	435,00	435,00	418,05	374,15	435,00
57	354	342,27	342,27	420,25	420,08	370,43
58	222	434,93	434,93	506,34	489,35	462,66
59	549	794,79	794,79	696,43	708,95	677,42
60	998	1240,64	1240,64	1175,76	1217,45	1170,24

4.1.3 Grupo 3 - Baixas Vazões

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos utilizando os modelos PAR, PARMA, ANFIS, SAR e Holt-Winters, para a UHE de Furnas, considerando os tempos do histórico (início/fim) com base nos registros de baixas vazões, além do esperado nos meses de janeiro e fevereiro. A definição dos períodos do histórico foi realizada por meio da observação do mesmo, obedecendo os seguintes passos:

- Identificar as menores vazões médias mensais registradas nos meses de janeiro e fevereiro.
- Definir subconjuntos de previsões, contendo o ano de menor vazão ou, que o histórico contenha este ano.

Assim, foram definidos os estudos:

1. janeiro de 1998 a dezembro de 2002 (observações sobre o ano de 2001 - menor média geral anual) ;
2. janeiro de 1997 a dezembro de 2001 (ano de 2001- verificar se existe modificação significativa em relação ao histórico do item anterior);
3. janeiro de 1950 a dezembro de 1954 (observações sobre o ano de 1953- segunda menor média geral anual).

Tabela 4.30: *Previsão para os anos 1984 a 1988.***Tabela 4.31:** *Erros PAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	504078,70	643,60	32,31
2	102962,66	238,38	15,94
3	120304,45	301,35	22,22
4	24908,32	137,56	13,56
5	19199,13	116,16	13,68
6	7881,43	84,16	13,64
7	2682,55	44,91	9,30
8	0,00	0,00	0,00
9	10875,46	82,58	17,85
10	25466,84	152,97	38,52
11	12954,64	99,43	20,22
12	220231,44	390,78	31,43

Tabela 4.32: *Erros PARMA*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	504078,70	643,60	32,31
2	102962,66	238,38	15,94
3	120304,45	301,35	22,22
4	24908,32	137,56	13,56
5	19199,13	116,16	13,68
6	7881,43	84,16	13,64
7	2682,55	44,91	9,30
8	0,00	0,00	0,00
9	10875,46	82,58	17,85
10	25466,84	152,97	38,52
11	12954,64	99,43	20,22
12	220231,44	390,78	31,43

Tabela 4.33: *Erros SAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	404063,94	511,32	25,39
2	362850,79	435,45	28,00
3	401576,73	457,13	32,94
4	75338,27	263,46	26,66
5	7218,30	73,78	8,78
6	7601,26	68,08	11,44
7	5500,32	57,47	12,21
8	5410,38	51,94	10,28
9	9382,33	92,50	21,56
10	22363,23	122,44	33,58
11	69216,69	224,51	48,17
12	102174,26	249,14	24,07

Tabela 4.34: *Erros Holt-Winters*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	1830278,50	1280,99	74,87
2	1681221,84	1262,03	78,49
3	2181842,85	1390,89	111,66
4	2131571,26	1443,64	150,95
5	1741050,82	1318,18	161,19
6	2220929,82	1489,17	238,47
7	2016890,29	1419,12	279,61
8	1842661,55	1355,74	294,27
9	2109279,64	1448,91	335,32
10	2366239,32	1535,79	368,43
11	2747031,38	1651,66	306,28
12	2632138,22	1594,00	143,20

Tabela 4.35: *Erros ANFIS*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	356778,18	571,13	29,30
2	99902,54	273,42	17,37
3	46996,71	172,60	10,39
4	21001,17	117,21	11,82
5	20315,77	128,15	15,43
6	9000,85	80,44	13,55
7	3897,69	48,70	9,77
8	0,00	0,00	0,00
9	11829,79	98,32	20,50
10	23431,57	147,90	36,97
11	9990,28	79,37	15,37
12	195387,92	370,64	29,58

Tabela 4.37: *Previsão para os anos 1998 a 2002.***Tabela 4.38:** *Erros PAR*

Ms	EQM	EAM	EPM
1	313312,65	498,47	38,37
2	144899,70	323,22	29,08
3	83010,01	278,10	27,54
4	44703,13	194,14	28,14
5	14316,63	100,22	19,41
6	4035,19	59,74	13,13
7	1106,93	25,57	7,89
8	0,00	0,00	0,00
9	15628,11	92,38	24,13
10	28776,01	166,07	59,18
11	19458,99	126,08	23,51
12	3253,39	51,63	5,26

Tabela 4.39: *Erros PARMA*

Ms	EQM	EAM	EPM
1	313312,65	498,47	38,37
2	144899,70	323,22	29,08
3	83010,01	278,10	27,54
4	44703,13	194,14	28,14
5	14316,63	100,22	19,41
6	4035,19	59,74	13,13
7	1106,93	25,57	7,89
8	0,00	0,00	0,00
9	15628,11	92,38	24,13
10	28776,01	166,07	59,18
11	19458,99	126,08	23,51
12	3253,39	51,63	5,26

Tabela 4.40: *Erros SAR*

Ms	EQM	EAM	EPM
1	265284,33	453,36	37,20
2	214675,40	396,84	37,71
3	176605,73	328,53	40,55
4	111933,85	316,55	51,20
5	57496,94	229,84	48,75
6	32435,19	160,40	42,15
7	23573,54	141,61	43,88
8	15395,99	109,48	40,99
9	17604,07	128,57	40,90
10	44351,67	179,35	72,90
11	39714,84	163,27	38,23
12	50271,59	206,58	22,45

Tabela 4.41: *Erros Holt-Winters*

Ms	EQM	EAM	EPM
1	401532,47	573,19	49,23
2	229953,22	406,78	39,68
3	168843,98	319,73	39,51
4	115293,02	321,81	52,00
5	53114,78	220,05	46,77
6	30865,89	155,39	40,98
7	14950,56	106,92	33,98
8	7710,07	67,89	26,79
9	17572,42	128,45	40,85
10	38547,33	167,01	68,03
11	43889,32	173,15	40,34
12	69226,56	248,25	26,79

Tabela 4.42: *Erros ANFIS*

Ms	EQM	EAM	EPM
1	356778,18	571,13	29,30
2	99902,54	273,42	17,37
3	46996,71	172,60	10,39
4	21001,17	117,21	11,82
5	20315,77	128,15	15,43
6	9000,85	80,44	13,55
7	3897,69	48,70	9,77
8	0,00	0,00	0,00
9	11829,79	98,32	20,50
10	23431,57	147,90	36,97
11	9990,28	79,37	15,37
12	195387,92	370,64	29,58

E, os períodos de previsão, cujo histórico termina em anos onde ocorreram secas, além do esperado,são:

1. janeiro de 1955 a dezembro de 1959 (considerações sobre o desempenho dos modelos após anos de seca 1953 e 1954);
2. janeiro de 1972 a dezembro de 1976 (considerações sobre o desempenho dos modelos após de seca de 1971).

O objetivo desta definição do histórico, assim como da seção 4.1.2, é verificar e analisar o comportamento dos modelos, observando como ocorre o desempenho dos mesmos nos períodos de seca e, após estes períodos.

Na Tabela 4.43 observa-se que os meses de previsão de 37 ao 48 foram mal ajustados em todos os modelos. A melhor aproximação dos valores é apresentada pelo método de Holt-Winters porém, na maioria, o erro se aproxima 90%. Para todos os modelos/método, a previsão apresentou valores muito superiores aos reais.

Na Tabela 4.50 observa-se comportamento semelhante ao encontrado na Tabela 4.43. Os modelos não se ajustaram a essa modificação no comportamento padrão dos meses de cheia. Mas, para os meses de seca e, para os anos que antecederam 2000, o ajuste aconteceu como o esperado.

A maior correlação é apresentada na ANFIS, como observa-se na Figura 4.43. Ainda, o modelo SAR apresentou um dos piores desempenhos até então.

A Tabela 4.44 apresenta os erros para cada modelo. Para o período em questão, 1997 a 2001, a previsão dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, junho o modelo indicado é ANFIS e, para julho, outubro, novembro e dezembro, os modelos periódicos autoregressivos. Ressalta-se o fato de que para o mês de agosto a previsão dos modelos ANFIS e PAR/PARMA apresentam erro zero.

Tabela 4.50: Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1997 a 2001).

Mês	REAL	PAR	PARMA	SAR	Holt-Winters	ANFIS
1	1824	2076,13	2076,13	2115,24	2231,22	1001,86
2	1498	2578,86	2578,86	1850,21	2082,34	1750,96
3	1066	1988,59	1988,59	1586,77	1861,00	1278,91
4	765	1236,26	1236,26	1072,86	1453,17	1018,00
5	863	904,38	904,38	772,89	1171,98	660,46
6	578	634,15	634,15	620,35	1027,60	593,86
7	437	602,80	602,80	512,51	905,31	426,77

Continua...

Tabela 4.50: Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1997 a 2001).

8	405	578,00	578,00	422,58	809,06	442,00
9	502	524,89	524,89	421,01	854,67	409,54
10	715	556,70	556,70	506,45	920,59	795,78
11	1185	717,09	717,09	695,79	1140,57	776,25
12	1191	1213,16	1213,16	1175,09	1655,60	2035,21
13	1248	1686,83	1686,83	1624,82	2231,22	3667,52
14	965	1419,88	1419,88	1548,08	2082,34	1908,68
15	676	1203,04	1203,04	1406,63	1861,00	1707,48
16	571	773,19	773,19	988,94	1453,17	1047,94
17	513	551,88	551,88	731,49	1171,98	801,22
18	362	426,13	426,13	597,69	1027,60	630,29
19	360	423,44	423,44	499,78	905,31	713,35
20	260	362,00	362,00	415,46	809,06	578,00
21	501	262,69	262,69	416,20	854,67	508,96
22	525	358,48	358,48	502,53	920,59	521,35
23	1010	716,05	716,05	692,15	1140,57	773,40
24	1681	1083,68	1083,68	1170,93	1655,60	1200,26
25	1410	1563,19	1563,19	1620,93	2231,22	1609,44
26	1545	1653,59	1653,59	1545,57	2082,34	956,81
27	754	1381,52	1381,52	1405,09	1861,00	1259,83
28	531	1010,48	1010,48	988,21	1453,17	803,40
29	502	664,27	664,27	731,12	1171,98	548,57
30	400	414,11	414,11	597,49	1027,60	530,30
31	278	408,33	408,33	499,66	905,31	436,09
32	290	400,00	400,00	415,39	809,06	362,00
33	210	308,82	308,82	416,16	854,67	298,28
34	335	395,05	395,05	502,49	920,59	429,12
35	796	413,58	413,58	692,12	1140,57	772,98
36	2248	770,48	770,48	1170,89	1655,60	1057,95
37	1817	1411,99	1411,99	1620,90	2231,22	1037,72
38	1376	1924,01	1924,01	1545,55	2082,34	1471,71
39	811	1684,15	1684,15	1405,08	1861,00	1096,70
40	540	1066,30	1066,30	988,20	1453,17	1068,76

Continua...

Tabela 4.50: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1997 a 2001).*

41	493	743,13	743,13	731,12	1171,98	607,54
42	419	431,35	431,35	597,49	1027,60	492,65
43	380	407,63	407,63	499,66	905,31	428,75
44	558	419,00	419,00	415,39	809,06	400,00
45	302	331,88	331,88	416,16	854,67	360,36
46	703	509,13	509,13	502,49	920,59	445,75
47	1013	509,21	509,21	692,11	1140,57	356,18
48	896	1078,31	1078,31	1170,89	1655,60	911,59
49	713	1565,31	1565,31	1620,90	2231,22	1517,48
50	628	1279,19	1279,19	1545,55	2082,34	1783,13
51	494	904,07	904,07	1405,08	1861,00	1712,07
52	374	579,95	579,95	988,20	1453,17	993,22
53	294	406,84	406,84	731,12	1171,98	648,11
54	250	256,60	256,60	597,49	1027,60	501,68
55	217	290,08	290,08	499,66	905,31	422,81
56	272	250,00	250,00	415,39	809,06	419,00
57	400	126,73	126,73	416,16	854,67	388,41
58	567	288,72	288,72	502,49	920,59	478,73
59	1029	611,07	611,07	692,11	1140,57	429,23
60	998	1048,18	1048,18	1175,76	1217,45	1191,18

A Tabela 4.57 apresenta os valores previstos por todos os modelos/método PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters, ANFIS. As previsões de todos os modelos, nos anos de 1950, 1951, 1952 e 1954, apresentaram valores próximos aos reais mas, no ano de 1954, considerando os meses de cheia, nenhum dos previsores apresentou bom ajuste.

De todos os modelo estudados, a ANFIS apresentou aproximação de 24, dos 60 meses, em relação aos valores reais. Seguidos pelos modelos PAR e PARMA que, apresentam a mesma previsão para todos meses.

Na Figura 4.49, observa-se os gráficos de ajuste de cada modelo/método estudado e, suas correlações. A maior correlação é obtida pelos modelos PAR e PARMA (0,804339), valor baixo em relação aos obtidos em outros períodos de previsão. Ainda, para o 49° mês, a ANFIS gerou valor negativo.

Tabela 4.44: *Previsão para os anos 1997 a 2001.***Tabela 4.45:** *Erros PAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	758645,37	732,77	40,64
2	198142,02	368,71	31,55
3	99048,64	295,27	26,87
4	35356,06	173,03	22,65
5	15979,00	105,55	18,61
6	14568,29	100,53	17,24
7	1239,06	29,20	8,42
8	0,00	0,00	0,00
9	17393,65	102,56	26,21
10	22566,78	140,14	44,77
11	16435,71	101,92	19,10
12	2301,32	42,37	4,24

Tabela 4.46: *Erros PARMA*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	758645,37	732,77	40,64
2	198142,02	368,71	31,55
3	99048,64	295,27	26,87
4	35356,06	173,03	22,65
5	15979,00	105,55	18,61
6	14568,29	100,53	17,24
7	1239,06	29,20	8,42
8	0,00	0,00	0,00
9	17393,65	102,56	26,21
10	22566,78	140,14	44,77
11	16435,71	101,92	19,10
12	2301,32	42,37	4,24

Tabela 4.47: *Erros SAR*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	226808,39	396,60	39,85
2	266933,45	404,59	48,48
3	482384,65	681,53	100,19
4	211326,84	449,09	89,35
5	71225,13	242,59	59,13
6	49789,66	200,30	60,68
7	33718,22	167,85	59,52
8	16219,53	116,89	37,13
9	13908,77	100,45	34,61
10	23283,50	132,71	24,67
11	113521,22	313,74	30,04
12	381938,56	513,94	32,02

Tabela 4.48: *Erros Holt-Winters*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	856705,76	828,82	79,02
2	898534,26	879,94	94,50
3	1246588,17	1100,80	160,58
4	820132,68	896,97	175,15
5	442097,08	638,98	146,82
6	402818,57	625,80	174,97
7	331983,50	570,91	187,94
8	217125,29	452,06	146,47
9	235446,71	471,67	148,90
10	142809,76	351,59	74,44
11	33295,32	151,74	16,68
12	298146,16	515,36	43,41

Tabela 4.49: *Erros ANFIS*

Mês	EQM	EAM	EPM
1	396490,69	552,98	31,04
2	73454,15	198,28	15,29
3	93571,50	288,16	21,72
4	36911,20	166,29	21,51
5	3875,03	49,37	8,73
6	12722,62	72,58	10,59
7	4976,27	51,45	11,09
8	0,00	0,00	0,00
9	23934,67	130,73	26,98
10	33902,20	156,30	48,52
11	120202,18	256,02	29,46
12	27433,67	131,24	11,08

A Tabela 4.51 aponta os erros médios obtidos em cada modelo. Os valores mostram a qualidade da previsão para cada mês e, observa-se o baixo ajuste geral. Os meses de seca nos modelos PAR, PARMA e ANFIS, se mostram bem ajustados, como nos demais grupos de estudo considerados.

Tabela 4.57: *Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1950 a 1954).*

Mês	REAL	PAR	PARMA	SAR	Holt-Winters	ANFIS
1	1559	1952,13	1952,13	1585,40	1747,75	2402,31
2	2519	1642,32	1642,32	1570,44	1688,67	1734,50
3	1581	1917,61	1917,61	1503,82	1588,27	1920,23
4	1185	1146,14	1146,14	995,07	888,21	993,34
5	852	843,19	843,19	719,98	584,24	851,34
6	655	663,04	663,04	577,65	458,38	656,68
7	592	534,98	534,98	479,03	348,36	516,84
8	496	592,00	592,00	394,98	275,53	592,00
9	428	499,57	499,57	391,92	305,51	496,58
10	485	581,54	581,54	486,28	428,15	556,69
11	1059	771,36	771,36	660,63	636,01	857,51
12	1649	1637,19	1637,19	1183,85	1253,65	1950,89
13	1568	2525,96	2525,96	1612,94	1747,75	1858,31
14	1994	1645,26	1645,26	1588,19	1688,67	1746,74
15	1806	1712,04	1712,04	1514,88	1588,27	1188,95
16	1276	1128,64	1128,64	999,84	888,21	978,07
17	899	893,23	893,23	722,23	584,24	930,33
18	700	696,19	696,19	578,82	458,38	681,72
19	557	586,94	586,94	479,66	348,36	557,62
20	476	557,00	557,00	395,32	275,53	557,00
21	388	469,82	469,82	392,14	305,51	415,54
22	432	549,26	549,26	486,46	428,15	484,87
23	377	726,56	726,56	660,79	636,01	639,91
24	761	472,45	472,45	1184,03	1253,65	952,29
25	1214	1193,31	1193,31	1613,11	1747,75	1611,86
26	1881	1529,37	1529,37	1588,29	1688,67	1366,76
27	2356	1667,79	1667,79	1514,95	1588,27	2143,03
28	1386	1267,57	1267,57	999,87	888,21	1364,05

Continua...

Tabela 4.57: Valores Reais e Previstos - PAR, PARMA, SAR, Holt-Winters e ANFIS (1950 a 1954).

29	770	863,45	863,45	722,24	584,24	1009,01
30	706	605,21	605,21	578,83	458,38	621,82
31	507	631,80	631,80	479,67	348,36	564,46
32	406	507,00	507,00	395,33	275,53	507,00
33	404	427,32	427,32	392,14	305,51	375,99
34	382	526,27	526,27	486,46	428,15	509,13
35	661	639,21	639,21	660,79	636,01	637,17
36	791	1095,19	1095,19	1184,03	1253,65	1142,00
37	605	1667,71	1667,71	1613,11	1747,75	370,59
38	680	1330,00	1330,00	1588,30	1688,67	1079,71
39	839	1197,51	1197,51	1514,95	1588,27	1370,90
40	1040	649,51	649,51	999,87	888,21	671,37
41	509	547,31	547,31	722,24	584,24	737,35
42	409	421,14	421,14	578,83	458,38	416,85
43	354	457,13	457,13	479,67	348,36	382,47
44	303	354,00	354,00	395,33	275,53	354,00
45	307	297,27	297,27	392,14	305,51	376,64
46	330	409,79	409,79	486,46	428,15	448,21
47	513	495,81	495,81	660,79	636,01	570,81
48	813	1153,70	1153,70	1184,03	1253,65	1058,03
49	743	1619,76	1619,76	1613,11	1747,75	-1105,82
50	1261	1375,18	1375,18	1588,30	1688,67	1144,76
51	666	1425,02	1425,02	1514,95	1588,27	1335,10
52	661	690,50	690,50	999,87	888,21	563,82
53	632	468,16	468,16	722,24	584,24	521,20
54	450	507,88	507,88	578,83	458,38	535,71
55	328	353,15	353,15	479,67	348,36	414,61
56	273	328,00	328,00	395,33	275,53	328,00
57	222	275,17	275,17	392,14	305,51	307,94
58	299	368,35	368,35	486,46	428,15	228,79
59	420	494,30	494,30	660,79	636,01	409,02
60	593	989,23	989,23	1184,03	1253,65	986,72

Considerações Finais

Nas últimas décadas, pesquisas têm sido feitas no sentido do desenvolvimento de métodos e análises das características estocásticas das séries temporais hidrológicas. A presença da sazonalidade, devido aos períodos de seca e umidade do ano, representa uma das dificuldades na previsão de vazões.

No setor elétrico brasileiro, a maioria dos modelos empregados tem como base os modelos de séries temporais, cujo tratamento é feito segundo a metodologia de Box & Jenkins (1979).

O objetivo principal do trabalho concentrou-se na análise e previsão de vazões médias mensais, utilizando modelos periódicos auto-regressivos sem sazonalidade (PAR e PARMA), com sazonalidade (SAR), método de alisamento exponencial de Holt-Winters e, os resultados da ANFIS (Marques et al., 2006). Buscou-se verificar se haveria ganhos em se trabalhar com os dados sem “*desazonalizá-lo*”.

A comparação dos resultados obtidos através do erro percentual médio, absoluto médio e erro quadrático médio, foi realizada.

O desempenho do modelo foi avaliado considerando a série temporal para o aproveitamento de FURNAS, nos grupos de estudos:

- **Grupo 1 - Previsão Atual:** Considera o final do histórico no ano de 2000 e faz a previsão de 2001 a 2005.
- **Grupo 2 - Altas Vazões:** Considera os tempos do histórico (início/fim) com base nos registros de vazões elevadas, acima do esperado, nos meses de janeiro e fevereiro.
- **Grupo 3 - Baixas Vazões:** Considera os tempos do histórico (início/fim) com base nos registros de baixas de vazões, além do esperado, nos meses de janeiro e fevereiro.

Os modelos periódicos auto regressivos PAR e PARMA, apresentaram desempenho idênticos, sem melhora ao se associar médias móveis (MA) ao modelo periódico autoregressivo (PAR). Os meses de seca apresentaram, como esperado,

erros menores para todos os estudos, em especial o mês de agosto apresentou erro zero, nos modelos PAR, PARMA e ANFIS.

Os estudos apontaram para a análise mais ampla de cada modelo, não observando apenas os erros médio gerados ou, a correlação obtida. Em vários estudos, os erros médios apresentavam valores menores para determinado modelo, correlação para um segundo modelo e, previsão efetiva (pontual) para um terceiro.

Em geral, a ANFIS e os modelos PAR/PARMA apresentaram desempenhos melhores, porém, com comportamentos similares entre si. Já o modelo SAR e o método Holt-Winters, nos estudos em que se destacaram, apresentaram desempenho diferentes dos demais modelos.

Para seção 4.1.1 a ANFIS apresentou melhor desempenho geral e, melhor desempenho para o ano de 2001 (menor média anual do histórico) porém, o método de Holt-Winters apresentou melhor ajuste para a maioria dos meses do 2° e 3° ano do período de previsão.

5.1 Contribuições

Como contribuições deste trabalho destacam-se:

- Sugestões de modelos matemáticos para séries temporais, ainda não trabalhados para a previsão energética;
- O estudo comparativo de modelos de séries temporais;
- O tratamento dos dados com a variável sazonal.

5.2 Trabalhos Futuros

Alguns trabalhos futuros foram identificados para a evolução desta pesquisa. São eles:

- Estudar outros modelos matemáticos não utilizados para esse tipo de série temporal;
- Investigar quanto ao tempo de histórico/previsão e sua influência na previsão dos modelos;
- Propor um modelo misto, ANFIS e Holt-Winters, ANFIS e SAR, para verificar se existe melhora no desempenho;
- Associar a ferramenta R, aos softwares de previsão, com o intuito de aproveitar as rotinas de programação estatística.

Referências Bibliográficas

- [Ballini 2000] BALLINI, R. *Análise e previsão de vazões utilizando modelos de séries temporais, redes neurais e redes neurais nebulosas*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2000.
- [Box 1976] BOX, G. J. G. *Time series analysis*. [S.I.]: Holden-Day, 1976.
- [Box G.M. Jenkins 1994] BOX G.M. JENKINS, G. R. G. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. San Francisco: Prentice-Hall, 1994.
- [CEPEL 1983] CEPEL, C. de Pesquisas de E. E. *Modelo de Séries Hidrológicas-Manual de Metodologia, Relatório Técnico*. [S.I.], 1983.
- [Costa M.E.P. Maceira] COSTA M.E.P. MACEIRA, E. D. F. *Modelo de previsão hidrológica aplicados ao planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro*. Disponível em http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao.
- [Cross 1987] CROSS, F. D. G. G. Short-term load forecasting. proceedings of the. *IEEE*, Vol. 75, p. 12, 1987.
- [Cruz 1998] CRUZ, G. J. *Modelo Equivalente não linear para o planejamento da operação a longo prazo de sistemas de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 1998.
- [Delleur V. Yevjevich 1980] DELLEUR V. YEVJEVICH, W. L. J. S. J. *Applied modeling of hydrologic time series*. [S.I.]: Water Resources Publications, 1980.
- [Diniz 1998] DINIZ, e. a. H. *Architecture desing of artificial neural networks based on Box & Jenkis models for time series predication*. São Paulo, Brasil, 1998.
- [Ehlers] EHLERS, R. *Análise de Séries Temporais*. Disponível em <http://leg.est.ufpr.br/~ehlers/notas>.

- [Figueiredo 1998] FIGUEIREDO, F. G. M. Fuzzy system design using neurofuzzy networks. *Proceedings of the 7th Information Processing and Management of Uncertainty on Knowledge-Based Systems - IPMU 98*, 1998.
- [Fortunato T.A.A. Neto 1970] FORTUNATO T.A.A. NETO, J. A. C. F. L. *Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica*. Niterói, RJ: Editora Universitária, 1970.
- [Francelin R. Ballini 1997] FRANCELIN R. BALLINI, M. A. R. *Back-propagation vs. box and jenkins model to streamflow forecasting*. São Paulo, Brasil, 1997. Technical Report 38.
- [GCOI 1983] GCOI, G. C. para a O. I. *Manual do Sistema PREVAZ*. 1983.
- [Gershenfeld 1994] GERSHENFELD, A. W. N. *The future of time series: learning and understanding, Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past*. Massachusetts - EUA: Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [Hoffmann 1998] HOFFMANN, R. *Estatística par Economistas*. São Paulo, Brasil: Pioneira Thomson Learning, 1998.
- [Jang 1993] JANG, J. Anfis: Adaptive-network-based fuzzy inference systems. *IEEE Transactions on Systems - Man and Cybernetics*, v. 23, p. 665–685, 1993.
- [Jones 1967] JONES, W. B. R. Time series with periodic structure. *Biometrika*, n. 54, p. 403–408, 1967.
- [Maceira 1997] MACEIRA, C. M. M. Stochastic streamflow model for hydroelectric systems. *Anais do V International Conference PMAPS - Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Vancouver, Canada, p. 22–27, 1997.
- [Marinho S. Soares 2003] MARINHO S. SOARES, R. B. M. H. Previsão de vazões afluentes naturais usando o modelo anfis. *Proceedings of the VI Brazilian Conference on Neural Networks*, Vol. 4, p. 163–168, 2003.
- [Marques G. Jr. Cruz 2008] MARQUES G. JR. CRUZ, C. V. T. *Relatório Técnico I - Anexo 1- Relatório de Previsão de Vazões*. [S.l.], 2008.
- [Morettin 2004] MORETTIN, C. M. T. P. A. *Análise de Séries Temporais*. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.
- [Mueller 1996] MUELLER, A. *Uma Aplicação de Redes Neurais Artificiais na Previsão do Mercado Acionário*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1996.

- [Nascimento 2005] NASCIMENTO, G. D. do. *Previsores Híbridos de Carga de Curto Prazo Baseados em Redes Neurais e Sistemas Nebulosos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2005.
- [Nelson] NELSON, H. *The use of Box-Cox transformation in economic time series analysis: an empirical study*. Tese (Doutorado) — University Of California.
- [Pedrycz 1998] PEDRYCZ, F. G. W. *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*. Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- [Plosser 1979] PLOSSER, C. Short-term forecasting and seasonal adjustment. *Journal of American Statistical Association*, p. 15–24, 1979.
- [Priestley 1979] PRIESTLEY, M. B. Discussion of the paper by professor makridakis and dr. hibon. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979.
- [Reis 2007] REIS, J. I. R. J. G. M. *Ferramentas Estatísticas Básicas da Qualidade - guia prático do R*. Viçosa: <http://www.estatisticador.xpg.com.br>, 2007.
- [Rocha 2005] ROCHA, G. C. *Ambiente de previsão baseado em redes neurais artificiais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2005.
- [Schwarz 1978] SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. *Ann. Statistic* 2. 1978.
- [Silva 2005] SILVA, L. M. O. da. *Uma Aplicação de Árvores de Decisão, Redes Neurais e KNN para a Identificação de Modelos ARMA Não-Sazonais e Sazonais*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.
- [Steveson 1981] STEVESON, W. J. *Estatística Aplicada a Administração*. Brasil: Haroer & Row do Brasil, 1981.
- [Vecchia 1985] VECCHIA, A. Maximum likelihood estimation for periodic autoregressive moving average models. *Technometrics*, n. 27, p. 375–384, 1985.
- [Vinhai 1994] VINHAL, C. *Um sistema de apoio a decisão no planejamento da Operação Energética de Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas -UNICAMP, Campinas, SP, 1994.
- [Westergaard 2006] WESTERGAARD, M. *CPNMouse: Multiple Mice in Windows*. 2006. Disponível em <http://cpnmouse.sourceforge.net>.
- [Wheelwright 1985] WHEELWRIGHT, e. a. S. C. *Forecasting Methods for Management*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1985.