

TESTES DE ESTACIONARIEDADE PARA SÉRIES TEMPORAIS COM DEPENDÊNCIA TEMPORAL. APLICAÇÃO À SÉRIE DE VAZÕES ANUAIS DO FUTURO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO SÃO LUIZ DO TAPAJÓS DOS ESTUDOS DE INVENTÁRIO

Jorge Machado Damazio¹; Fernanda da Serra Costa²; Maria Elvira P. Maceira³; Renata Leite Falcão⁴; Arlete Rodarte Neves⁵

RESUMO – A prática do planejamento do setor elétrico tomou como padrão usual que estudos hidrológicos disponibilizem para os estudos energéticos de aproveitamentos hidroelétricos séries de afluições médias mensais a partir de janeiro de 1931, o que leva a que hoje estejam disponíveis séries correspondentes a quase oitenta anos. Registros tão longos possibilitam maior precisão nas inferências quanto ao comportamento das flutuações de longo prazo, porém permitem que se levante a hipótese de que estas flutuações sejam evidências de mudanças em curso nos regimes hidrológicos das bacias. Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de testes estatísticos para distinguir flutuações naturais de séries temporais com estrutura de dependência temporal de mudanças de regime hidrológico suaves ou abruptas. Os testes são aplicados à série de 74 anos de afluições anuais ao aproveitamento de São Luiz do Tapajós fornecida pelos estudos hidrológicos dos Estudos de Inventário da Bacia dos Rios Tapajós e Jimanxim.

ABSTRACT - The practice of hydrological studies in the electricity sector is to make available for hydroelectric plants series of monthly inflows from January 1931, which led that now are available inflow records with more than eighty years length. Providing as long records improves precision in inferences about the behavior of long-term fluctuations but let stand up hypothesis that these fluctuations are evidence of changes underway in the hydrological regime of the river basins. This paper presents the development of statistical tests that distinguish natural fluctuations of time series with autocorrelation structure from smooth or abrupt changes of hydrological regime. The tests are applied to a series with 74 values of annual inflows at São Luis do Tapajós project provided by hydrological studies done in the context of Inventory Studies of the Tapajós and Jimanxim Rivers Basin

Palavras-chave: estacionariedade de séries de vazões, estudos hidrológicos, extensão de séries de vazões.

¹ Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ. Av. Horácio Macedo, 354 – Rio de Janeiro. E-mail: damazio@cepel.br

² Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ. Av. Horácio Macedo, 354 – Rio de Janeiro. E-mail: fernanda@cepel.br

³ Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ. Av. Horácio Macedo, 354 – Rio de Janeiro. E-mail: elvira@cepel.br

⁴ Centrais Elétricas Brasileiras – ELETROBRAS, Avenida Marechal Floriano, 19 – Centro- Rio de Janeiro - RJ, Email: renata@eletrobras.br

⁵ Centrais Elétricas Brasileiras – ELETROBRAS, Avenida Marechal Floriano, 19 – Centro- Rio de Janeiro - RJ, Email: rodarte@eletrobras.br

1 – INTRODUÇÃO

Em qualquer das etapas da exploração do potencial hidroelétrico de bacias hidrográficas, os estudos hidrológicos devem se apoiar em registros fluviométricos que cubram períodos de tempo suficientemente longos, capazes de caracterizar com boa precisão o regime hidrológico vigente nos locais dos aproveitamentos, seja nos aspectos relacionados com a frequência e intensidade dos períodos de estiagem, seja no que se refere ao regime de ocorrência de cheias. No caso brasileiro, para as usinas que operam ou que virão a operar (caso de usinas em etapa de planejamento) no âmbito do sistema interligado, a caracterização estatística adequada das flutuações temporais de médio e longo prazo das afluências é fundamental para que os cenários de afluências futuras utilizados nos modelos da cadeia de otimização da operação (Maceira et al., 2002) contenham na intensidade e frequência adequada possíveis seqüências de maior ou de menor afluência. O uso de registros fluviométricos de curta duração neste aspecto é especialmente danoso, já que fica impossibilitada a caracterização estatística de flutuações de longo prazo.

Seguindo a orientação de procurar o uso de registros hidrológicos longos como base de apoio, a prática do planejamento do setor elétrico tomou como padrão usual que estudos hidrológicos disponibilizem para os estudos energéticos séries de afluências médias mensais a partir de janeiro de 1931. Este padrão levou a que hoje estejam disponíveis registros de afluências médias mensais correspondentes a quase oitenta anos. Se por um lado registros tão longos possibilitam maior precisão nas inferências quanto ao comportamento das flutuações de longo prazo, por outro lado permitem que seja levantada a hipótese de que estas flutuações passem a ser consideradas como evidências de mudanças em curso nos regimes hidrológicos das bacias.

Outro aspecto do padrão de disponibilizar séries a partir de 1931 consiste no desafio que enfrentam os estudos hidrológicos, já que, em todo o país são relativamente poucas as estações fluviométricas cuja operação foi iniciada antes de 1931. As metodologias mais comumente utilizadas para suplantar o problema são a extensão do registro por transladação de dados de estações fluviométricas de longo registro na mesma rede fluvial ou uso de dados de estações pluviométricas de longo registro na região através de modelos de chuva-vazão ou através de regressão. Desta forma obtém-se uma série estendida até janeiro de 1931, que passa ser considerada como se fosse série medida e cujas características estocásticas passam a orientar os estudos energéticos para o local. Por outro lado, quando a extensão abrange um intervalo de tempo da mesma ordem de grandeza do intervalo das medições é natural que se procure analisar se o trecho estendido pode ser considerado como representativo das vazões que ocorreram no local verificando-se se as diferenças entre as características das duas partes da série (parte estendida e parte medida)

são apenas flutuações naturais do processo ou manifestação de uma improvável mudança abrupta do regime hidrológico coincidente com o início das medições.

A distinção entre mudanças no regime hidrológico, suaves ou abruptas, e flutuações naturais de longo prazo feita a partir da análise das séries de vazões fornecidas pelos estudos hidrológicos não é simples, já que o processo natural de formação das vazões fluviais incorpora a estas séries uma estrutura de dependência temporal (Hipel e McLeod, 1994) cuja flutuação natural pode ser facilmente confundida com as hipóteses alternativas (mudança suave ou abrupta no regime hidrológico). Nos dois casos, a aplicação de testes estatísticos clássicos, onde o pressuposto é que as observações nas amostras são resultado de sorteios independentes, passam a apresentar uma maior probabilidade de identificar erroneamente como mudança de regime hidrológico uma flutuação natural de processos com dependência temporal embutida.. Usando técnicas de Monte-Carlo, Hirsch e Slack, 1984 desenvolvem um teste estatístico que considera a estrutura de dependência temporal para identificação de tendência em séries de qualidade da água. Hirsch et al, 1991 aponta a necessidade do desenvolvimento de métodos de detecção de tendências que façam o melhor uso dos dados, tendo em vista correlações seriais. Utilizando também técnicas de Monte-Carlo, Yue e Wang, 2002, analisa a influência da estrutura de dependência temporal na capacidade do teste clássico de Mann-Whitney de distinguir mudanças de flutuações naturais.

Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento, através da técnica de Monte-Carlo, de testes estatísticos que permitem distinguir flutuações naturais de séries temporais com estrutura de dependência temporal de mudanças de regime hidrológico suaves ou abruptas. Os testes são aplicados a série de aflúências anuais ao aproveitamento de São Luiz do Tapajós fornecida pelos estudos hidrológicos dos Estudos de Inventário da Bacia dos Rios Tapajós e Jimanxim.

2 – TESTES DE ESTACIONARIEDADE DE PATAMAR PARA SÉRIES COM DEPENDENCIA TEMPORAL

A distinção entre flutuações naturais de séries de vazões e mudanças de regime hidrológico pode ser efetuada a partir da aplicação de testes estatísticos para verificação da hipótese, comumente utilizada como pressuposto em diversos modelos estocásticos de séries temporais, referida como estacionariedade da série. Se uma série temporal é estacionária, suas características probabilísticas são invariantes no tempo. Em particular, média e variância dos valores da série são invariantes temporalmente (estacionariedade de segunda ordem). Os testes apresentados neste artigo focam a invariância temporal do patamar dos valores médios de vazões anuais em bacias hidrográficas onde não ocorrem mudanças de regime hidrológico. Consideram ainda que:

- Uma série de vazões anuais observadas pode indicar uma mudança de patamar durante o período da observação.
- Flutuações naturais podem ser confundidas com mudanças de patamar.
- Quanto maior o grau de dependência temporal da série maior a probabilidade da confusão.

A mudança de patamar será modelada através da função:

$$y(t) = K + \alpha \left[2F\left(\frac{t-a}{L} + 0.5 \mid p\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Onde:

K – nível médio da série

$|\alpha|$ – metade do tamanho da mudança de patamar

a – centro do período da transição

L – comprimento da transição

p - parâmetro de forma da transição

F(t|p) - é a função acumulada da distribuição Beta padrão normalizada simétrica cuja densidade é:

$$f(t \mid p) = \frac{1}{B(p, p)} t^{p-1} (1-t)^{p-1} \quad (2)$$

A figura 1 mostra esta modelagem para os casos de α positivo ou negativo.

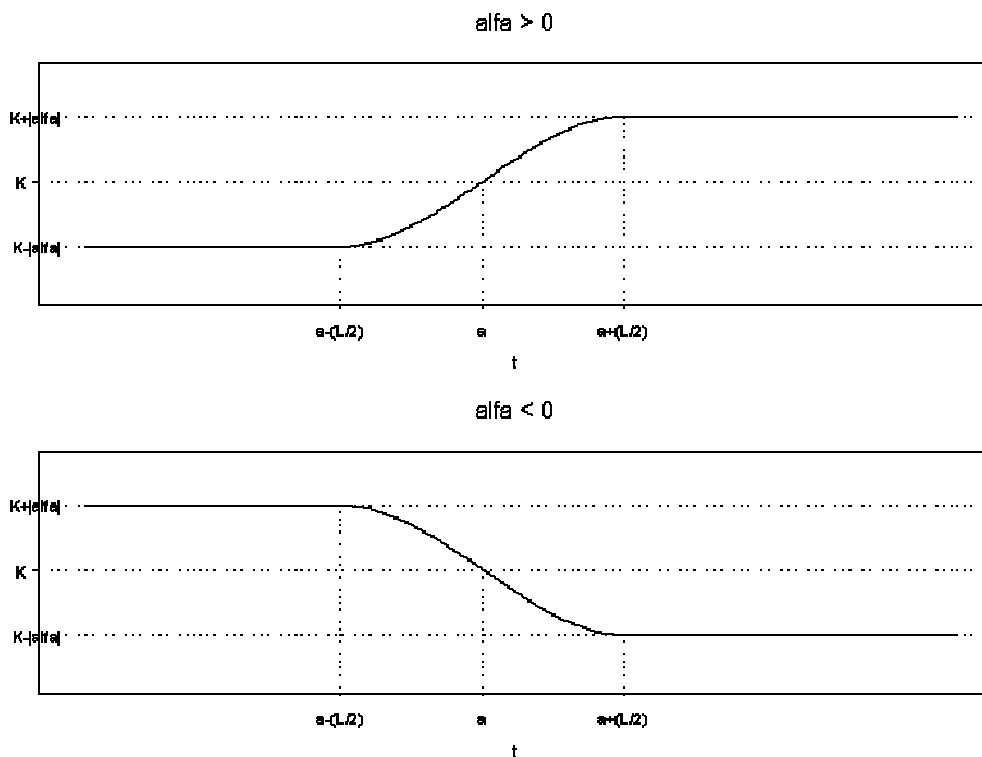


Figura 1 – Função adotada para modelar mudança de patamar

O Teste de Mudança de Patamar com Transição baseia-se na verificação da significância de estimativas do parâmetro α . Dada uma série observada, o procedimento consiste em estimar os parâmetros K , α , a , L e p e verificar a hipótese nula $\alpha = 0$. Como método de estimação adotou-se o método dos mínimos quadrados em duas fases:

fase 1: estimar a , L e p utilizando em substituição aos valores da série uma descrição de tendências observadas na série através de uma suavização por regressões locais. Como algoritmo de otimização utiliza-se a procura exaustiva.

fase 2: fixados a , L e p estimar K e α por regressão linear utilizando os valores da série.

No caso do teste orientado para verificar mudanças abruptas de regime (Teste de Degrau) a fase 1 reduz-se em fixar os valores de $L = 1$, $a =$ ano do início das medições (ano do degrau) -0.5 , e $p=1$

Na fase 2 a teoria clássica de regressão linear fornece um teste de significância para α usando valores críticos obtidos da distribuição t-student. Este teste é aproximadamente válido para o caso de independência temporal. Para se considerar a dependência temporal da série, a distribuição da estatística t é obtida por simulação de séries sintéticas utilizando um modelo de série temporal auto-

regressivo ajustado à série analisada. Para cada série sintética gerada aplica-se o procedimento de ajuste da função de mudança de patamares obtendo-se da regressão linear da fase 2 o valor da estatística t correspondente ao parâmetro α . Com estes valores constrói-se a distribuição empírica da estatística $|t|$.

3 – APLICAÇÃO

Utilizou-se a série de vazões médias mensais entre janeiro de 1931 e dezembro de 2005 no local do AH São Luiz do Tapajós obtida nos estudos de Inventário da bacia dos rios Tapajós e Jimanxim (ELETRONORTE, CNEC e Camargo Corrêa, 2008). Esta série contém um período estendido por modelo chuva-vazão no período compreendido entre janeiro de 1931 e dezembro de 1972, sendo o restante oriundo de medições fluviométricos na rede fluvial da bacia. Na figura 2 apresenta-se o gráfico da evolução das vazões médias anuais, os círculos vazios correspondem aos valores do período de 1931 a 1972 e os círculo cheios aos valores do período de 1973 a 2005. As linhas tracejadas correspondem às médias de cada nuvem de pontos, a média das vazões médias anuais do período entre 1931 a 1972 ($12.278,6 \text{ m}^3/\text{s}$) é superior a média das vazões médias anuais do período entre 1973 a 2005 ($11.256,3 \text{ m}^3/\text{s}$). A figura 3 apresenta o ajuste da função de mudança de patamar que sugere a hipótese de mudança suave entre os dois patamares. Um patamar inicial no entorno dos $12700 \text{ m}^3/\text{s}$ até o meio da década de 50, seguido de uma tendência decrescente a partir do meio da década de 50 que ao final do registro atinge um patamar no entorno dos $10600 \text{ m}^3/\text{s}$.

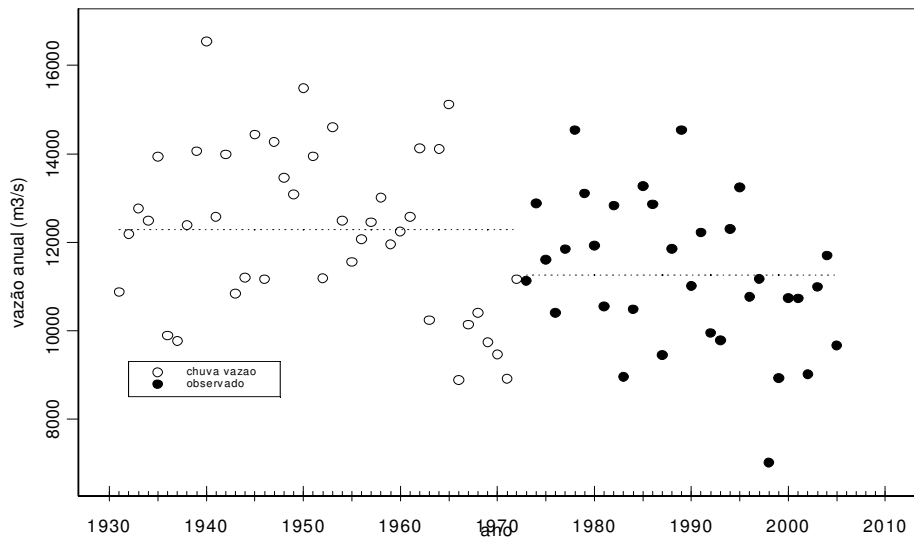


Figura 2 – Vazões médias anuais no AH São Luiz do Tapajós

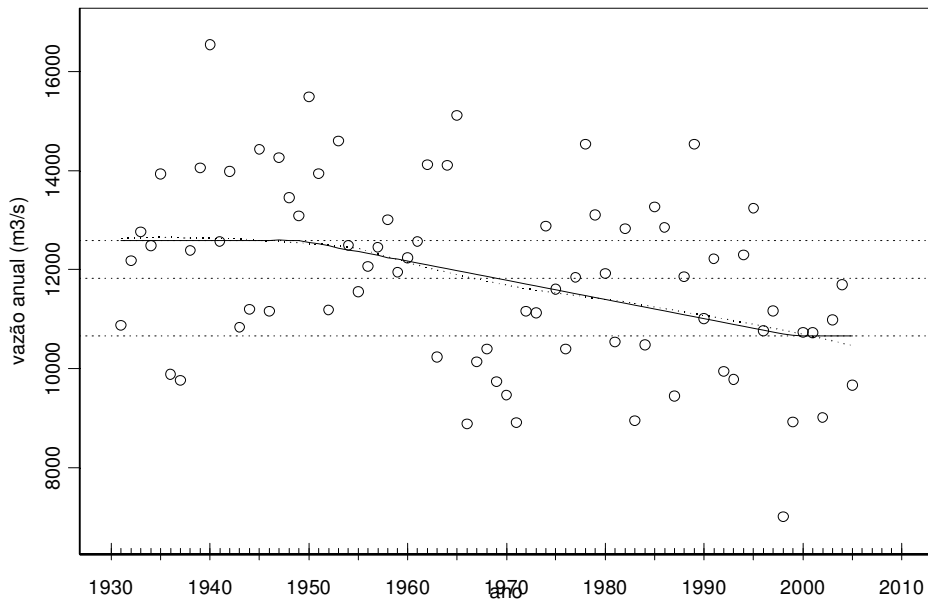


Figura 3- Vazões médias anuais no AH São Luiz do Tapajós com curva de mudança suave entre patamares,

A análise da série de vazões anuais através das figuras 1 e 2 leva à três possíveis hipóteses para as flutuações da série:

H1) Série flutua entorno de patamar constante 11.828 m³/s

H2) Série flutua entorno de dois patamares distintos (primeiro patamar de 12.278,6 m³/s e segundo de 11.256 m³/s), degrau em 1973.

H3) Série flutua entorno de dois patamares distintos (primeiro patamar de 12.278,6 m³/s e segundo de 11.256 m³/s) com mudança suave ocorrendo do meio da década de 50 até o final do registro.

3.1- Aplicação de Teste t clássico de igualdade de médias

Neste caso a hipótese H1: série flutua entorno de patamar constante 11.828 m³/s é considerada como hipótese nula e, a hipótese H2: série flutua entorno de dois patamares distintos (primeiro patamar de 12.278,6 m³/s e segundo de 11.256 m³/s), degrau em 1973, é considerada como hipótese alternativa e, aplicando-se o teste t clássico de igualdade de médias (mais especificamente o teste *Welch Modified Two-Sample t-Test*) obtém-se para a estatística do teste o valor $t = 2.4918$, com número de graus de liberdade = 71.62 e $p\text{-value} = 0.015$.

3.2- Cálculo da Estatística do Teste de Degrau

No calculo da estatística do Teste de Degrau descrito no item 2 para as série de vazões médias anuas do AH São Luiz do Tapajós, na fase 1 fixou-se o parâmetro a em 1972,5. A figura 4 apresenta as estimativas dos parâmetros e os resultados da regressão linear da segunda fase e o gráfico da função. O valor obtido na fase 2 para a estatística t do parâmetro α foi -2,46.

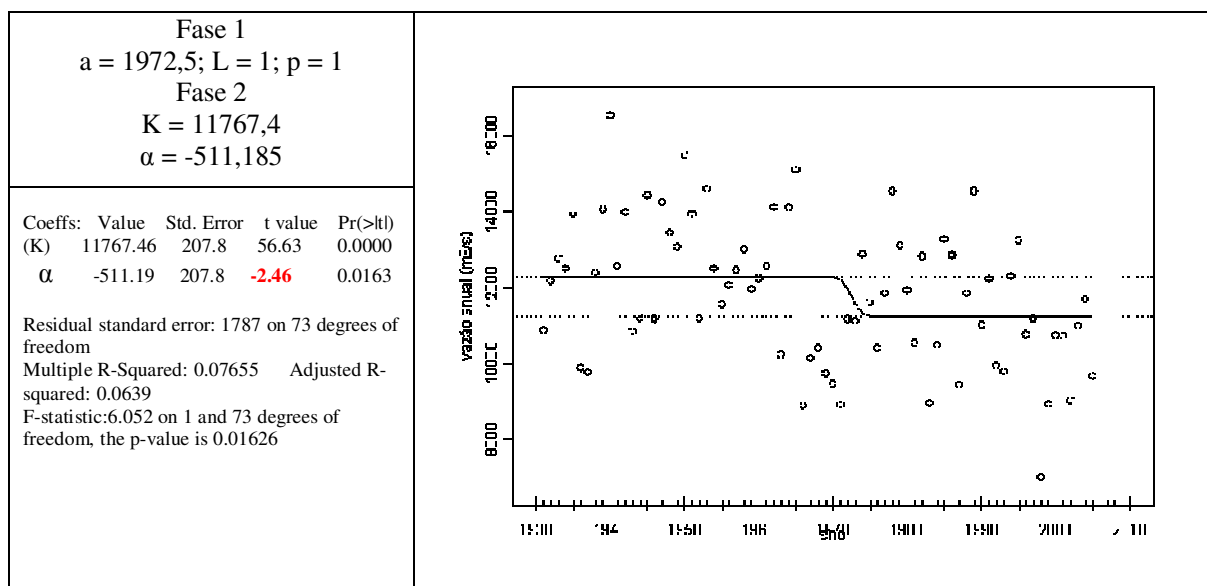


Figura 4 – Ajuste da Função Degrau a série de vazões médias anuais de São Luiz do tapajós

3.3- Aplicação do Teste de Mudança de Patamar com Transição

A estatística do Teste de Mudança de Patamar com Transição, descrito no item 2, foi calculada para a série de vazões médias anuais de São Luiz do Tapajós. A figura 5 apresenta a função ajustada nas fases 1 e 2. O quadro 3 apresenta o resultado do ajuste da fase 2. O valor obtido para a estatística t do parâmetro α foi 4,0006.

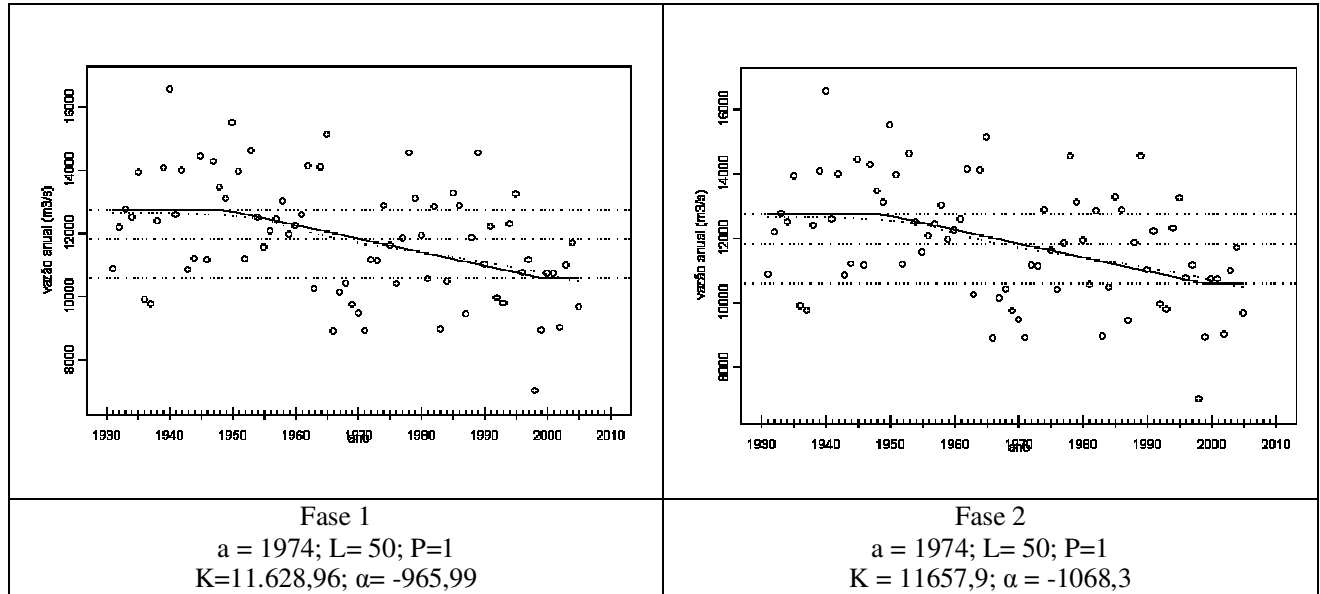


Figura 5– Ajuste da Função Mudança de Patamar a série de vazões médias anuais de São Luiz do Tapajós.

```

Call: lm(formula = obs ~ aux)
Residuals:
    Min     1Q   Median     3Q    Max
-3614 -1292  37.86 1272 3815

Coefficients:
            Value      Std. Error  t value Pr(>|t|)
(Intercept) 11657.8785   199.0591   58.5649  0.0000
          aux  -1068.2596    267.0231   -4.0006  0.0001

Residual standard error: 1684 on 73 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.1798    Adjusted R-squared: 0.1686
F-statistic: 16.01 on 1 and 73 degrees of freedom, the p-value is 0.0001499
    
```

Quadro 3 – Resultado do ajuste da Função Mudança de Patamar a série de vazões médias anuais de São Luiz do Tapajós

3.4- Construção das distribuições empíricas de l_t

As distribuições das estatísticas l_t dos testes de degrau e de mudança de patamar com transição considerando a dependência temporal foram obtidas através simulação com 7.000 séries sintéticas. Para a geração das séries sintéticas utilizou-se um modelo autoregressivo. Através dos correlograma e correlograma parcial amostrais da série, apresentados na figura 6, pode-se concluir

que o modelo indicado é o autoregressivo de ordem 1. Observar também o bom ajuste do AR(1) no spectrum apresentado na figura 6.

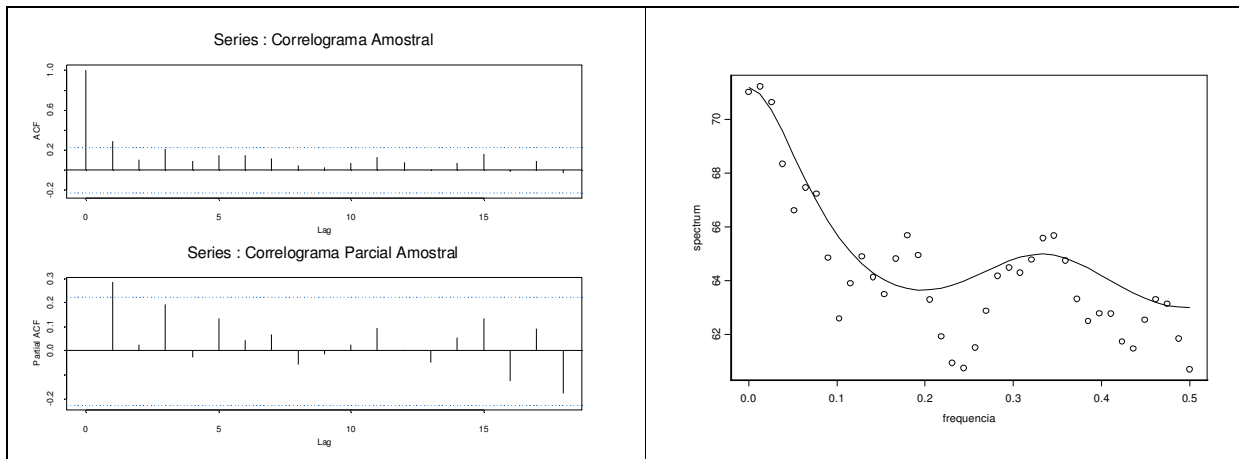


Figura 6 – Correlograma e correlograma parcial amostrais da série de vazões médias anuais de São Luiz do Tapajós e Spectrum ajustado do modelo AR(1)

A figura 7 apresenta a distribuição da estatística l para o Teste de Degrau obtida na simulação com 7.000 séries gerada pelo modelo AR(1) ajustado a série de vazões médias anuais de São Luiz do Tapajós e a mesma distribuição obtida em simulação com 7.000 séries de vazões médias anuais independentes.

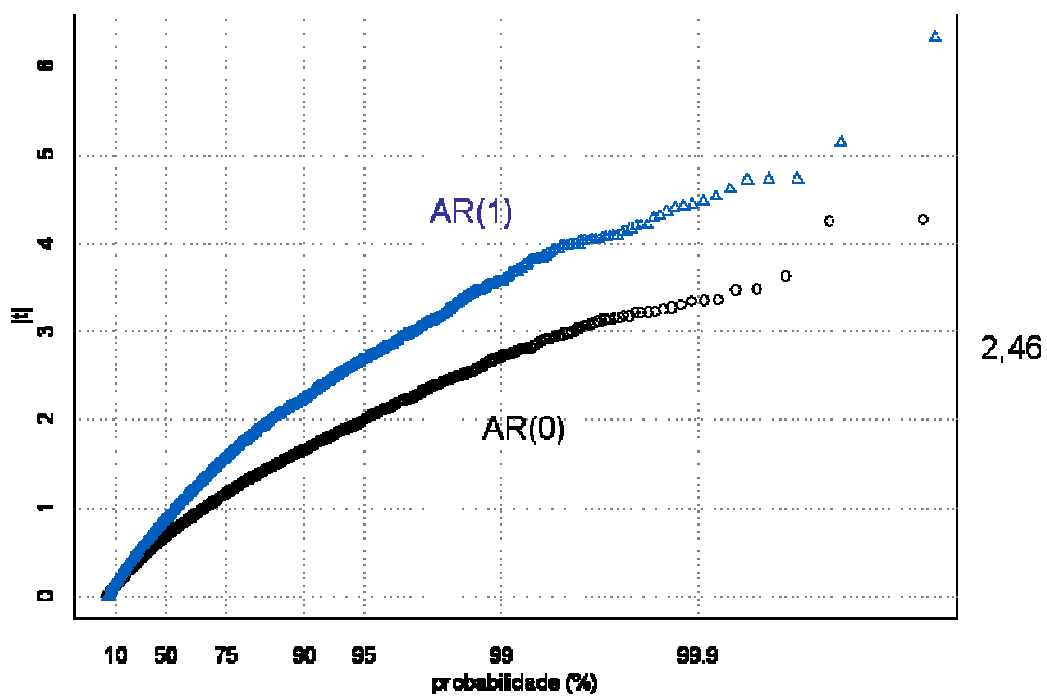


Figura 7 – Distribuições de l_t para Teste de Degrau obtidas por simulação considerando valores dependentes, AR(1), e independentes, AR(0).

A figura 8 apresenta a distribuição da estatística l_t para o Teste de Mudança de Patamar com Transição obtida na simulação quando se considerou a dependência temporal através do modelo AR(1) ajustado a série de vazões médias anuais de São Luiz do Tapajós, e a mesma distribuição obtida em simulação com 7.000 séries de vazões médias anuais independentes.

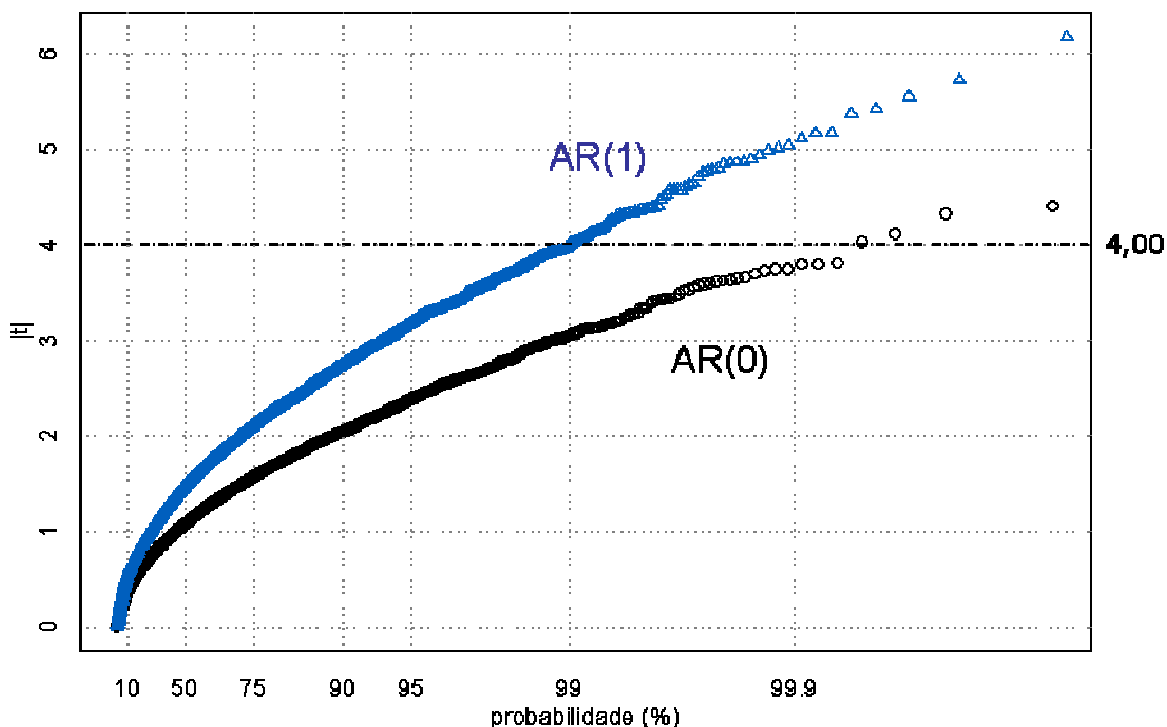


Figura 8 – Distribuições de $|t|$ para Teste de Mudança de Patamar com Transição obtidas por simulação considerando valores dependentes, AR(1), e independentes, AR(0).

No que se refere ao Teste de Degrau pode-se observar que, enquanto o valor da estatística $|t|$ obtida para a série de São Luiz do Tapajós ($t=2,46$) é recusado quando se avalia ao nível de significância de 95% na distribuição construída considerando a independência das vazões, este valor é aceito no mesmo nível de significância quando se avalia a significância da estatística na distribuição construída considerando-se a dependência temporal das vazões.

No que se refere ao Teste de Mudança de Patamar com Transição pode-se observar que, enquanto o valor da estatística $|t|$ obtida para a série de São Luiz do Tapajós ($t=4,0$) é recusado ao nível de significância de 99% quando se avalia a significância da estatística na distribuição construída considerando a independência das vazões, este valor é aceito ao mesmo nível de significância quando se avalia a significância da estatística na distribuição construída considerando-se a dependência temporal das vazões.

5 – CONCLUSÕES

Séries com estrutura de dependência temporal costumam se manter por longos períodos acima ou abaixo do nível médio. Entre períodos concomitantes acima e abaixo da média, ou vice-versa, ocorre sempre uma transição, que pode ser também longa. Quando isto ocorre na janela do histórico, as flutuações observadas podem ser confundidas como uma mudança de patamar.

Neste artigo apresentou-se teste desenvolvido com o objetivo de discriminar mudanças de patamar reais das aparentes em séries com estrutura de autocorrelação temporal, podendo-se aplicá-los para testar mudanças de patamar com transição ou em degrau.

Apresentou-se uma aplicação com a série de vazões anuais de São Luiz do Tapajós fornecidas pelos estudos hidrológicos dos Estudos de Inventário das Bacias dos Rios Tapajós e Jamanxim. Esta série é formada por um trecho inicial, com 42 anos, obtido por técnica de extensão de registro com uso de modelos chuva-vazão, e um segundo trecho, com 32 anos, obtido a partir de medições em estações fluviométricas.

Numa verificação se os dois trechos podem ser considerados como oriundos de uma mesma população, tanto o teste t clássico de diferenças de média, que pressupõem independência temporal, quanto a distribuição de l_{tl} do Teste do Degrau desenvolvido neste trabalho obtida pressupondo independência temporal, apontam como significativa a 95% a diferença entre os valores médios dos dois trechos da série. Por outro lado, a distribuição de l_{tl} do Teste do Degrau, quando obtida pressupondo a estrutura de dependência temporal da série (autoregressiva de ordem 1), aponta a mesma diferença como não significativa a 95%.

Aceito o trecho estendido da série como representativo das vazões médias anuais que ocorreram no local de 1931 a 1972, uma análise gráfica da flutuação temporal dos 74 valores permitiu se levantar a hipótese de uma possível mudança de patamar nos valores médios das aflúncias no local durante o período. A distribuição l_{tl} do Teste de Mudança de Patamar com Transição desenvolvido neste trabalho, obtida pressupondo independência temporal, apontam como significativa a 99% a aparente mudança de patamar da série. Por outro lado, a distribuição de l_{tl} do mesmo teste, quando obtida com a estrutura de dependência temporal da série, aponta a mesma diferença como não significativa a 99%, mostrando que a aparente mudança de patamar na série de vazões anuais de São Luiz do Tapajós pode ser considerada como uma manifestação da sua estrutura de dependência temporal.

BIBLIOGRAFIA

MACEIRA, M. E. P., TERRY, L. A., COSTA, F. S., DAMAZIO, J. M. e MELO, A. C. G. (2002), "*Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System*", XIV Power Systems Computation Conference, Seville, Spain.

HIPEL, K. W. e MCLEOD A. I. (1994), *Time Series Modelling on Water Resource and Environmental Systems*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.

ELETRONORTE, CNEC Engenharia S.A. e Camargo Correa (2008), *Estudos de Inventário Hidrelétrico das Bacias dos Rios Tapajós e Jamanxim*, Brasília, Brasil.

HIRSCH, R. M., SLACK, J.R. (1984) Nonparametric Trend Test for Seasonal Data with Serial Dependence, *Water Resources Research*, V 20, N° 6 p 727 -732

HIRSCH, R. M., ALEXANDER, R. B., SMITH, A.B. (1991) Selection of Methods for the Detection and Estimation of Trends in Water Quality, *Water Resources Research*, V 27, N° 5 p 107-121

YUE, S e WANG, C. Y., (2000), The Influence of Serial Correlation on the Mann-Whitney test for detecting a shift in median, *Advances in Water Resources*, 25, p 325-333