



Modelo PAR(p) com resíduo multiplicativo aplicado na simulação de cenários de Energia Natural Afluente

Bruno Agrélio Ribeiro

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22430-060
agrelio@ele.puc-rio.br

Hugo Ribeiro Baldioti

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22430-060
baldioti@ele.puc-rio.br

Reinaldo Castro Souza

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22430-060
reinaldo@ele.puc-rio.br

RESUMO

Em função da dependência dos regimes hidrológicos, a incerteza associada ao planejamento energético no Brasil exige a modelagem estocástica das Séries Temporais associadas de maneira adequada e coerente. Percebe-se, portanto, a importância dos modelos de geração de cenários hidrológicos no desempenho das operações do sistema elétrico. Esta modelagem estocástica é, em geral, realizada através do ajuste de um modelo autorregressivo de ordem p para cada um dos estágios das séries históricas que compõem as configurações do sistema. Este artigo propõe uma nova estrutura para o processo de simulação de séries sintéticas, através de um novo método para o cálculo dos resíduos, método esse que, ao invés de utilizar a diferença entre os valores realizados e simulados, utiliza a razão entre esses. Através de diversos testes estatísticos, o novo modelo proposto apresentou resultados melhores do que o modelo vigente, podendo ser considerado como uma alternativa para utilização no Setor Elétrico Brasileiro.

PALAVRAS CHAVE. Simulação Estocástica; PAR(p) Multiplicativo; Planejamento Energético.

Tópicos: EN – PO na Área de Energia; SIM – Simulação; MP – Modelos Probabilísticos.

ABSTRACT

Due to the dependence of hydrological regimes, the uncertainty associated with energy planning in Brazil requires the stochastic modeling of the Time Series to be associated in an adequate and coherent way. Therefore, the importance of the hydrological scenario generation models in the performance of the electrical system operations is perceived. This stochastic modeling is usually performed by fitting a p -order autoregressive model for each one of the stages of the historical series that composes the system configurations. This paper proposes a new structure for the simulation process of synthetic series, using a new method for the residual calculations, which, instead of using the difference between real and simulated values, uses the ratio between them. Through several statistical tests, the proposed new model presented better results than the current model, and can be considered as an alternative for use in the Brazilian Electric Sector.

KEYWORDS. Stochastic simulation; PAR(p) Multiplicative; Energy Planning.

Paper topics: EN – OR in Energy; SIM – Simulation; MP – Probabilistic Models.



1. Introdução

Observa-se no contexto do planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro um déficit no que diz respeito a qualidade da representação das séries de Energia Natural Afluente (ENA) no que tange a aderência dos cenários em relação a assimetria dos resíduos, bem como das séries em si. Mesmo sabendo que o modelo PAR(p) utilizado atualmente representa com qualidade as características básicas das séries, tais como média, variância etc., muito ainda pode ser melhorado. Tendo em vista tal questão, a proposta deste trabalho é apresentar o desenvolvimento e aplicação do modelo PAR(p) utilizando resíduos multiplicativos para simulação de cenários sintéticos, aliando a qualidade inerente à modelagem clássica com as questões deficitárias citadas. Na abordagem clássica o resíduo é calculado através da diferença entre valores realizados e valores estimados por um modelo. Na proposição multiplicativa a diferença é substituída por uma razão e esses resíduos passam então a serem obtidos através da divisão dos valores realizados pelos valores estimados.

2. Setor Elétrico Brasileiro

De acordo com [ONS, 2017] o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, com predominância de usinas hidrelétricas

A capacidade instalada de geração do Sistema Interligado Nacional (SIN) é composta principalmente por usinas hidrelétricas distribuídas em diferentes regiões do país. As usinas térmicas, em geral são localizadas nas proximidades dos principais centros de carga e desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN. Essas usinas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro. A tabela 1 apresenta a estrutura da capacidade instalada do SIN em janeiro de 2016.

Tabela 1 – Estrutura da Capacidade Instalada no SIN [MME, 2016]

	Potência (MW)	%
<i>Hidráulica</i>	96.929	64,4
<i>Térmica</i>	43.276	28,8
<i>Eólica</i>	10.124	6,7
<i>Solar</i>	80	<0,1
<i>Total</i>	150.410	100

O SIN é constituído por quatro subsistemas, atualmente denominados submercados, sendo eles: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias no país.

É de se esperar que cada subsistema apresente características específicas de consumo e demanda, de forma que a maior carga de demanda se encontra no Sudeste/Centro-Oeste. Para ilustrar essa diferença a projeção do consumo de energia elétrica para 2017 é exposto na tabela 2.

Tabela 2 – Projeção do Consumo de Energia Elétrica [MME, 2016]

Sudeste/centro-oeste	58,65 %
Sul	17,96 %
Nordeste	15,78 %
Norte	7,62 %



2.1. Planejamento da Operação Hidrotérmica

Com o objetivo de minimizar o custo da operação do sistema, o planejamento da operação energética visa principalmente a redução do consumo de combustíveis. As características singulares do SIN fazem com que a coordenação da operação e o planejamento sejam problemas complexos. O objetivo de minimização dos custos globais só é atingido com base na interdependência operativa entre as usinas, a interconexão dos subsistemas elétricos e com a integração dos recursos de geração e transmissão.

Segundo [MARCATO, 2002], a interconexão entre os sistemas elétricos e a integração dos recursos de geração e transmissão são de suma importância para o planejamento e redução de custos, pois em períodos hidrológicos desfavoráveis em determinadas regiões, outras podem estar em situação hidrológica favorável, reduzindo a necessidade da utilização de energia térmica, por outro lado, em períodos de déficit hidrológicos as térmicas contribuem para o atendimento da carga.

Sabe-se que o sistema apresenta uma forte dependência dos regimes hidrológicos. Sendo assim, o planejamento da operação de médio/longo prazo determina metas de geração para as usinas hidrelétricas e termelétricas para cada um dos estágios (períodos) ao longo do horizonte de estudo [PEREIRA, 1989].

Diariamente o Operador Nacional do Sistema (ONS) toma uma decisão em relação à utilização de energia hidrelétrica ou térmica, impactando diretamente no valor final dessa energia e na garantia de fornecimento. Por exemplo, como apresentado em [OLIVEIRA, 2013], imagine que a decisão tomada foi utilizar as hidrelétricas para o abastecimento energético, minimizando os custos da operação e, ainda nesse cenário hipotético, as afluições futuras foram boas, para tal situação a decisão foi adequada e não houve gastos extras ou cortes de energia, ou seja, o custo total foi baixo. Agora imagine a mesma decisão, porém, neste segundo caso as afluições futuras foram baixas, para este cenário será necessário despachar as térmicas devido ao baixo volume de água nos reservatórios, isso gerará um gasto extra e provável corte de carga no sistema. Analogamente pode-se desenvolver a análise para a decisão de se utilizar as térmicas como complemento da geração hídrica, analisam-se os impactos futuros tendo em vista as possíveis afluições futuras (chover ou não).

Na etapa do planejamento de médio prazo o horizonte de estudo é de cinco anos, segmentados em etapas mensais (períodos). Faz-se uma representação detalhada do processo estocástico de vazões afluentes aos reservatórios, e as usinas hidrelétricas que compõem cada sistema são representadas de forma agregada (sistemas equivalentes) em subsistemas [MARCATO, 2002]. O desenvolvimento estocástico necessário é realizado através de um modelo gerador de séries sintéticas de ENAs que deve reproduzir certas características do histórico.

Utiliza-se o modelo NEWAVE para determinação de estratégias ótimas de operação em médio prazo [CEPEL, 2015]. A partir das ENAs, é ajustado um modelo estocástico auto regressivo periódico de ordem p , a fim de gerar séries sintéticas, tendo como objetivo o cálculo da função de custo futuro. Mais detalhes sobre a modelagem são descritos em [MACEIRA & BEZERRA, 1997], [MARCATO, 2002], [PENNA, 2009], [PENNA, et al., 2011], [CASTRO, 2012], [FERREIRA, 2013], [OLIVEIRA, 2013], [RIBEIRO & BALDIOTI, 2014].

3. Modelos Geradores de Cenários

Como dito anteriormente, é de suma importância a utilização de modelos de séries temporais no contexto do planejamento e operação de sistemas hidrotérmicos [SALAS & OBEYSEKERA, 1982], uma vez que, com predominância hídrica no sistema de geração, a previsão e simulação de cenários é fundamental. Diversos trabalhos já foram realizados na área utilizando diferentes horizontes de tempo (horário, diário, semanal, mensal e anual). Desde a década de 60 os modelos Auto Regressivos e Auto Regressivos Periódicos são utilizados no contexto de previsão de sistemas hidrológicos. Ao longo das décadas seguintes diversos autores propuseram melhorias e variações aos modelos apresentados originalmente. Uma extensa revisão de tais métodos é apresentada em [FERREIRA, 2013].



O estudo de caso proposto nesse trabalho envolve a utilização do modelo clássico PAR(p) porém com resíduos multiplicativos. Posteriormente são apresentados os resultados dos testes estatísticos utilizados para avaliação de desempenho do modelo.

3.1. Modelo PAR(p)

Não somente a auto correlação caracteriza as séries hidrológicas históricas, mas também o intervalo de tempo entre as observações, caracterizando-se dessa forma um comportamento periódico [HIPEL & MCLEOD, 1994]. Em especial tem-se o modelo PAR(p), que ajusta para cada período pré-definido um modelo AR(p), onde “p” refere-se a ordem do modelo. Para o caso periódico, “p” é um vetor de ordens. No caso de interesse, tem-se que $p = 12$, referente a cada um dos meses do ano. Tem-se o modelo PAR(p) em sua forma padronizada como se segue:

$$\left(\frac{Y_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = \varphi_1^m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \dots + \varphi_{p_m}^m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}}\right) + a_t^m \quad (1)$$

Onde:

- Y_t série sazonal de período $s = 12$;
- t índice de tempo, $t = 1, 2, \dots, sN$, função do ano T ($T = 1, 2, \dots, N$) e do período m ($m = 1, 2, \dots, s$);
- N número de anos;
- μ_m média sazonal do período m ;
- φ_m^i i -ésimo coeficiente auto regressivo do período m ;
- p_m ordem do operador auto regressivo do período m ;
- a_t^m série de ruídos independentes com média zero e variância $\sigma_a^2(m)$.

O modelo apresentado acima é aplicado ao contexto do SEB nas séries de ENA para cada um dos subsistemas [OLIVEIRA, 2010]. As etapas de identificação das ordens “p” e a estimação dos parâmetros do modelo são apresentadas detalhadamente em [PENNA, 2009], [OLIVEIRA, 2010], [OLIVEIRA, 2013], [FERREIRA, 2013].

Com o objetivo de simular cenários sintéticos é preciso que se faça um “tratamento” nos dados no que diz respeito a modelagem dos resíduos históricos. Para tanto, devido à grande volatilidade dos dados nos diversos subsistemas, é utilizado o modelo padronizado do PAR(p) e, a partir do ajuste, ou seja, uma vez definido a ordem e os parâmetros, calculam-se os erros históricos através da diferença entre o realizado e o ajustado. Especificamente no caso do modelo utilizado pelo NEWAVE são ajustados aos resíduos calculados uma distribuição LogNormal de três parâmetros [CEPEL, 2015] onde a correlação entre os subsistemas é embutida na distribuição ajustada pelo terceiro parâmetro (chamado de deslocamento), dessa forma a característica de complementariedade é preservada na modelagem. Detalhes sobre a modelagem exata podem ser encontradas em [OLIVEIRA, 2013] e [FERREIRA, 2013], sendo que neste último é apresentada a questão das interconfigurações, característica peculiar para geração de cenários sintéticos adotada exclusivamente pelo SEB e levada em consideração neste trabalho.

3.2. Modelo PAR(p) com resíduo multiplicativo

O modelo PAR(p) multiplicativo pode ser considerado como um caso particular da modelagem desenvolvida em [CABRAL, 2016], onde o autor apresenta um modelo periódico multivariado autorregressivo multiplicativo, ou PVARm.



Partindo do desenvolvimento inicialmente proposto em [HIPEL & MCLEOD, 1994] e posteriormente adaptado para o contexto do setor elétrico brasileiro com a especificidade de utilizar amostragem de resíduos bootstrap [OLIVEIRA, 2010], juntamente com a conceituação sobre a questão das interconfigurações exposta em [FERREIRA, 2013], pode-se desenvolver o modelo multiplicativo. Considerando a formulação da equação 1, pode-se escrever o ruído como se segue:

$$a_t^m = \left(\frac{Y_t - \mu_m}{\sigma_m} \right) - \varphi_1^m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}} \right) + \dots + \varphi_{p_m}^m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}} \right) \quad (2)$$

Neste caso estima-se o resíduo a partir da diferença entre o realizado e o estimado. O processo de estimação da ordem e parâmetros é desenvolvido da forma como exposto em [FERREIRA, 2013], através do sistema de equação de Yule-Walker e a função de autocorrelação parcial interconfigurações. No desenvolvimento da proposta do modelo com resíduos multiplicativos considera-se a seguinte formulação:

$$\left(\frac{Y_t - \mu_m}{\sigma_m} \right) = \left[\varphi_1^m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}} \right) + \dots + \varphi_{p_m}^m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}} \right) \right] \cdot a_t^m \quad (3)$$

Dessa forma, tem-se:

$$\hat{a}_t^m = \frac{\left(\frac{Y_t - \mu_m}{\sigma_m} \right)}{\left[\hat{\varphi}_1^m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}} \right) + \dots + \hat{\varphi}_{p_m}^m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}} \right) \right]} \quad (4)$$

Para que as características da modelagem básica do PAR(p) sejam preservadas, ou seja, a estimação dos parâmetros e ordens não sejam alteradas, considera-se que o ruído desse modelo segue um comportamento i.i.d. (independente e identicamente distribuído) com a seguinte condição:

$$E[\hat{a}_t^m] = 1 \quad (5)$$

Uma vez estimado o modelo os resíduos multiplicativos são calculados como indicado na equação 4. A simulação de cenários sintéticos de ENA é realizada utilizando o modelo ajustado e as amostras de resíduos. Utilizando a técnica de simulação bootstrap é possível amostrar e, consequentemente, gerar tantos cenários quanto se queira.

Vale ressaltar que as discretizações, ou seja, a periodicidade, é mensal. Mais especificamente, um AR(p) será ajustado para cada período de interesse do estudo. Assim, para o estudo de planejamento em um horizonte de cinco anos tem-se sessenta modelos.

4. Estudo de Caso

Com o intuito de se avaliar dez anos completos, ou seja, 120 períodos, foi utilizado o PMO (Programa Mensal da Operação) de janeiro de 2016, disponível na biblioteca virtual da CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica). Para o estudo de caso desenvolvido foram gerados 200 cenários sintéticos para cada um dos 4 submercados. Toda implementação computacional foi realizada utilizando os programas Matlab e Excel, ambos fornecidos pela PUC-Rio.



4.1. PAR(p) Multiplicativo

A verificação da aderência ao histórico do modelo foi realizada através de testes estatísticos propostos como padronização para avaliação de modelos neste contexto [BALDIOTI, 2014]. Os testes utilizados foram: 1-Teste de média (t-test); 2-Teste de Variância (Levene); 3-Teste de Aderência (Kolmogorov-Smirnov); 4-Teste de Mediana (Wilcoxon); 5-Análise de Assimetria; 6-Análise de Sequência Negativa; 7-Análise de Sequência Positiva; 8-Teste de Média nos Ruídos; 9-Teste ARCH; 10-Teste de LJUNG-BOX.

Por questões de simplificação da exibição dos resultados, os quatro submercados são indicados através de números como se segue: Sudeste/Centro Oeste (1); Sul (2); Nordeste (3); Norte (4).

Tendo como objetivo principal verificar a aderência dos cenários simulados ao histórico, os testes de (1) à (7) são realizados nas séries geradas, já os testes (8), (9) e (10) são aplicados aos resíduos calculados para avaliar o ajuste do modelo.

1) Teste de Média:

Na figura 2 são apresentados os resultados dos testes-t realizados para os quatro subsistemas. Devido ao fato de que para cada período tem-se um modelo diferente, os testes são realizados n vezes, onde $n = n^{\circ}$ de períodos. Assim, em cada período é avaliada a hipótese nula da média dos cenários gerados ser igual a média histórica.

Observa-se que apenas no subsistema Norte (4) houveram períodos em que a hipótese nula foi rejeitada. Assim, pode-se dizer que o modelo proposto reproduz adequadamente as médias históricas.

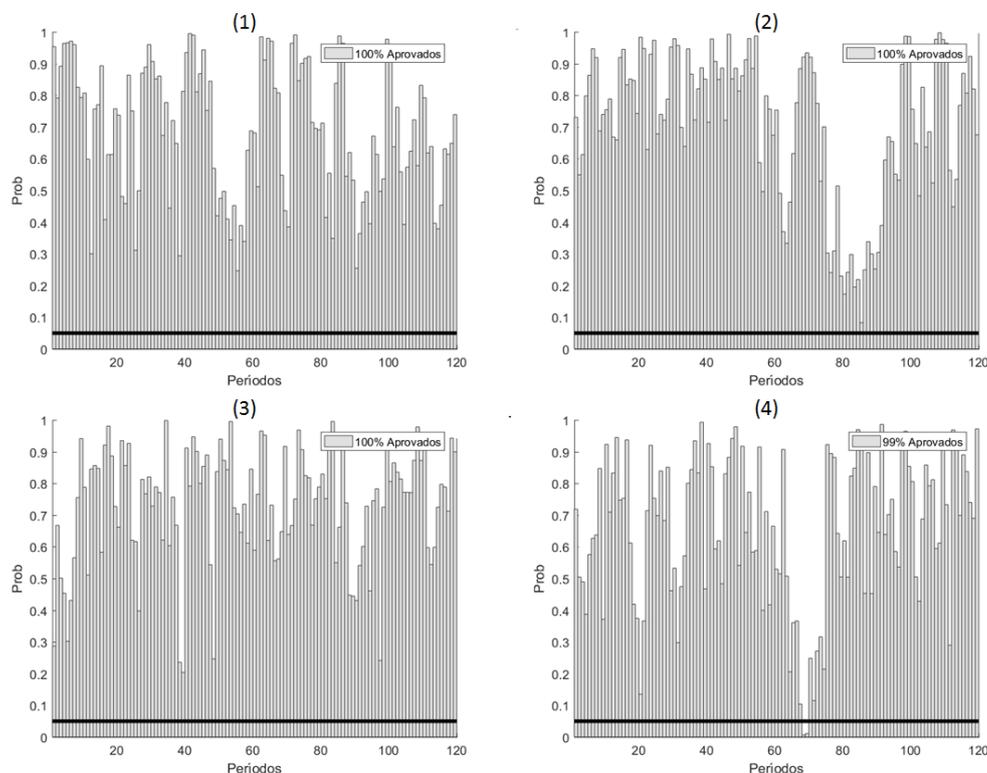


Figura 2 – Porcentagem dos aprovados no teste-t

2) Teste de Variância:

A figura 3 apresenta os resultados dos testes de Levene, utilizados nas mesmas condições anteriores, para os quatro subsistemas. Este teste, que tem como objetivo avaliar a



igualdade das variâncias, observa-se que o comportamento do modelo proposto segue reproduzindo as estatísticas do histórico.

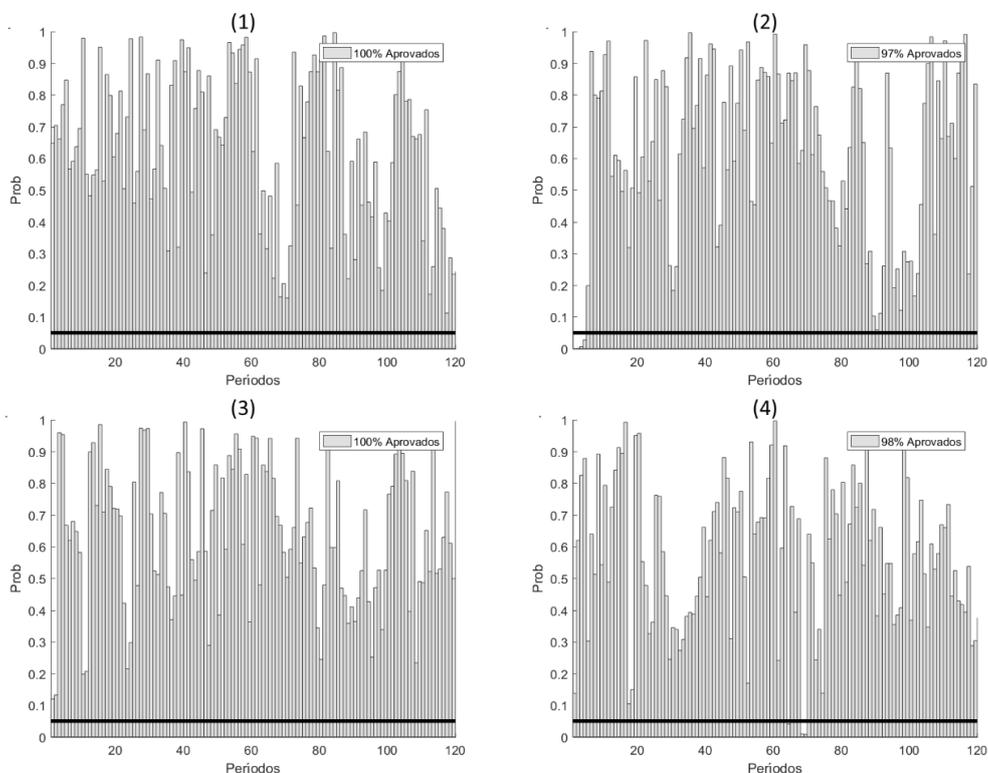


Figura 3 – Porcentagem dos aprovados no teste de Levene

3) Teste de Aderência:

Apresenta-se na figura 4 os resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov. Tal avaliação foi usada para verificar a igualdade entre as distribuições de probabilidade que descrevem os períodos do histórico e das séries geradas.

Seguindo o comportamento dos testes anteriores, o modelo proposto apresenta um comportamento de aderência em relação ao histórico, neste caso o pior resultado foi para o subsistema Norte (4), com 94% dos testes aceitando a hipótese nula de igualdade, ou seja, dos 120 períodos testados aproximadamente 113 seguem a distribuição do histórico.

4) Teste de Mediana:

Os resultados dos testes de Wilcoxon para mediana estão expostos na figura 5. Tal variação é utilizada devido ao tamanho da amostra. Outro motivo para se utilizar este teste é devido ao fato de não ser necessário assumir normalidade das amostras testadas. Também vale ressaltar que este teste é não paramétrico.

Mais uma vez o modelo proposto mostra aderência em relação a mediana, de forma que somente o subsistema Norte não tenha todos os períodos aprovados.

5) Teste de Assimetria:

A discussão acerca da capacidade de reprodução das assimetrias históricas vem se tornando cada vez mais relevante no setor elétrico, isso se dá devido a crescente necessidade de análise da não-linearidade inerente aos regimes, até então desconsiderada. Os regimes de afluências baixos, registrados nos últimos anos e não indicado nos modelos de previsão/simulação, fomentou a discussão e o desenvolvimento do modelo multiplicativo, uma vez que sua capacidade de reprodução da assimetria é considerada melhor do que a do modelo vigente (lognormal).

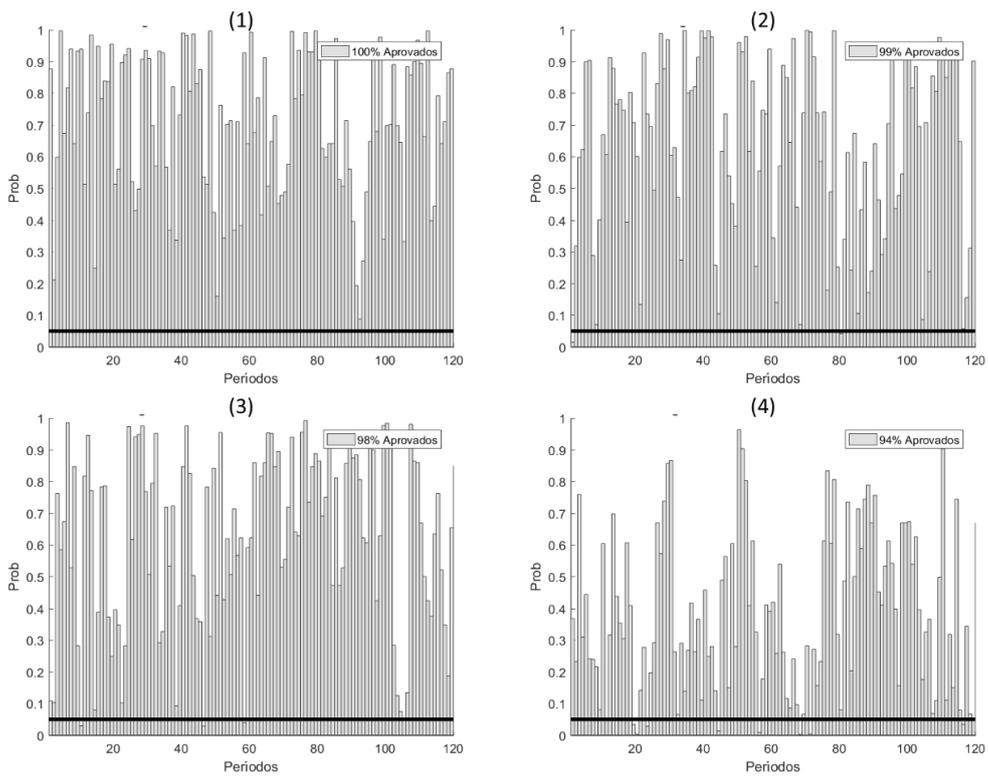


Figura 4 – Porcentagem dos aprovados no teste de Kolmogorov-Smirnov

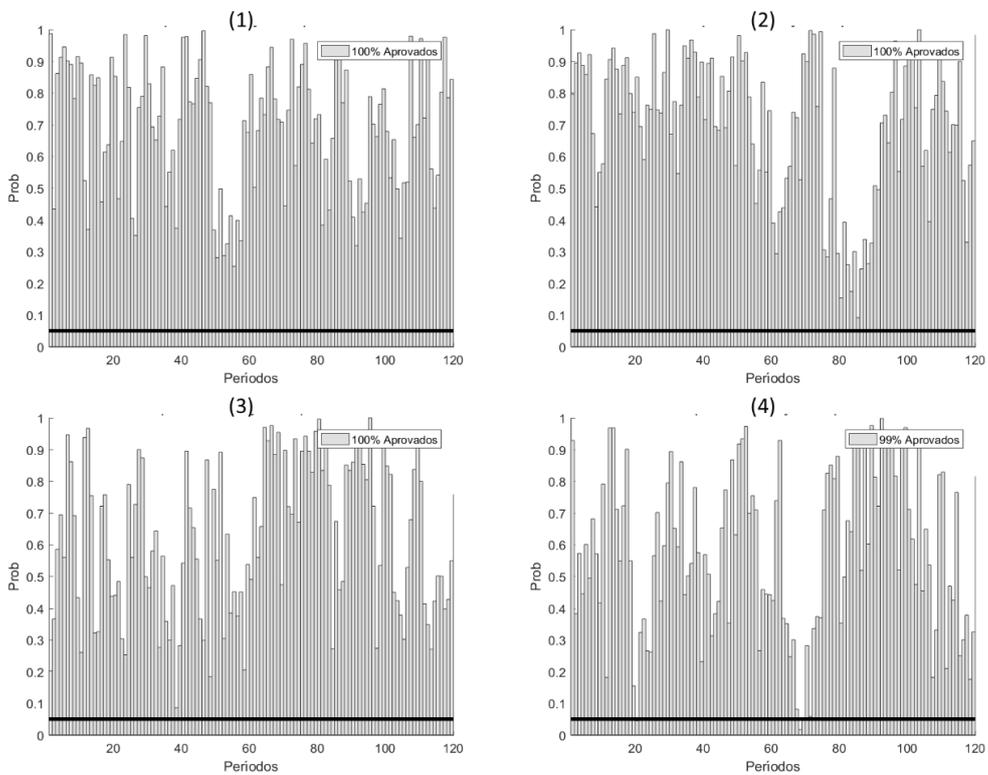


Figura 5 – Porcentagem dos aprovados no teste de Wilcoxon

A figura 6 apresenta os resultados da análise de Assimetria. Tal análise é proposta em [BALDIOTI, 2014] e tem como objetivo avaliar a assimetria de duas populações distintas e desconhecidas que não assumem normalidade. Esta é uma análise não paramétrica que avalia a



distância, ou proporção, relativa entre as assimetrias das duas populações. Espera-se que essa distância seja a menor possível, de forma que os períodos “aprovados” estejam localizados abaixo de uma medida pré-definida, no caso 0.4, indicado por uma linha preta na figura.

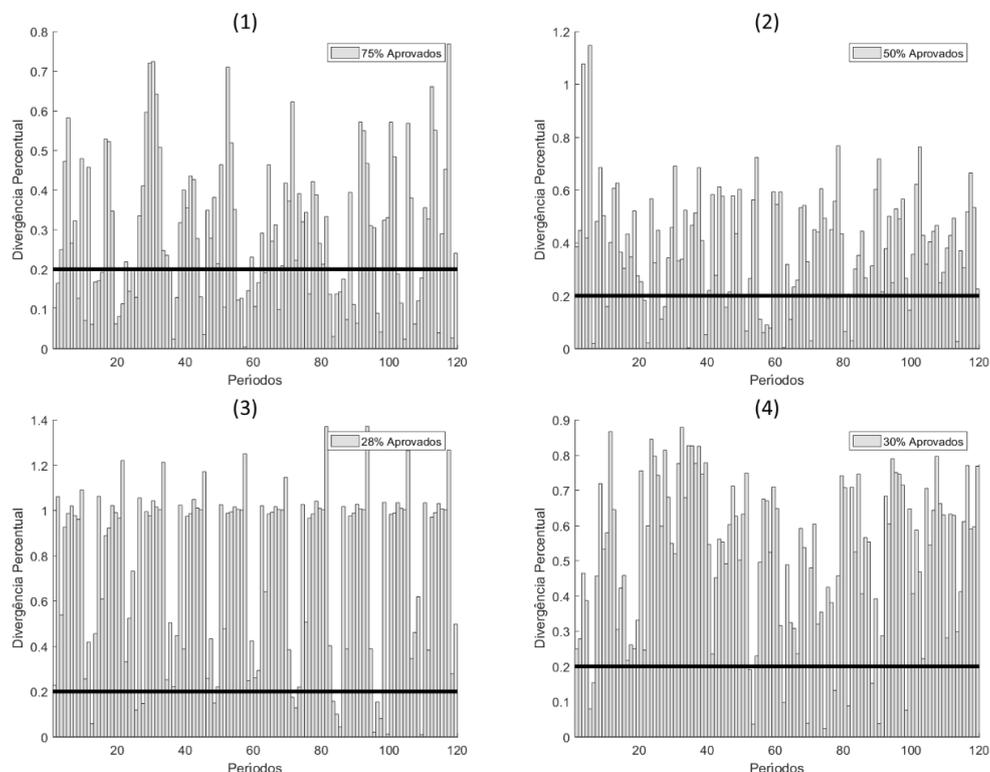


Figura 6 – Porcentagem dos aprovados na análise de Assimetria

Observa-se que o melhor resultado se refere ao submercado SE/CO. Ressalta-se a importância deste subsistema em termos de geração e carga, logo, tal resultado por si só já seria relevante, porém o baixo índice de aprovação para os outros subsistemas nos leva a averiguar mais profundamente o comportamento do modelo em relação ao desempenho desta característica, comparativamente ao modelo Lognormal, vigente no setor.

Dessa forma, é apresentado na figura 7 os resultados do mesmo teste para o modelo utilizado pelo SEB. A partir de tais resultados pode-se dizer que o modelo proposto consegue reproduzir a assimetria com muito mais acurácia que o modelo vigente. Vale destacar os resultados: para o subsistema sudeste o modelo vigente apresenta um total de 14% de aprovação enquanto o modelo proposto 75%; no subsistema sul também houve uma melhora significativa nos resultados, de 20% (modelo vigente) para 50% (modelo proposto); nos subsistemas Nordeste e Norte, houveram melhoras marginais, de 20% para 28% e 26% para 30%, respectivamente.

6) Análise de Sequência Negativa:

Tal análise é realizada a partir de três métricas principais: comprimento de sequência; soma de sequência; intensidade de sequência. Após a aplicação de tais conceitos nas séries geradas e no histórico, testa-se a hipótese de as amostras serem provenientes de uma mesma distribuição, através dos testes estatísticos de aderência [PENNA, 2009]. Uma sequência negativa é o período de tempo em que as vazões afluentes estão continuamente abaixo de valores predeterminados, no caso as médias mensais históricas, precedidos e sucedidos por valores acima destes limites [OLIVEIRA, 2010].

É apresentado na tabela 3 os resultados das probabilidades de representação de sequências negativas das séries geradas. Observa-se que o modelo proposto consegue reproduzir, em suas séries simuladas, com boa qualidade, os períodos de aflúências baixas.

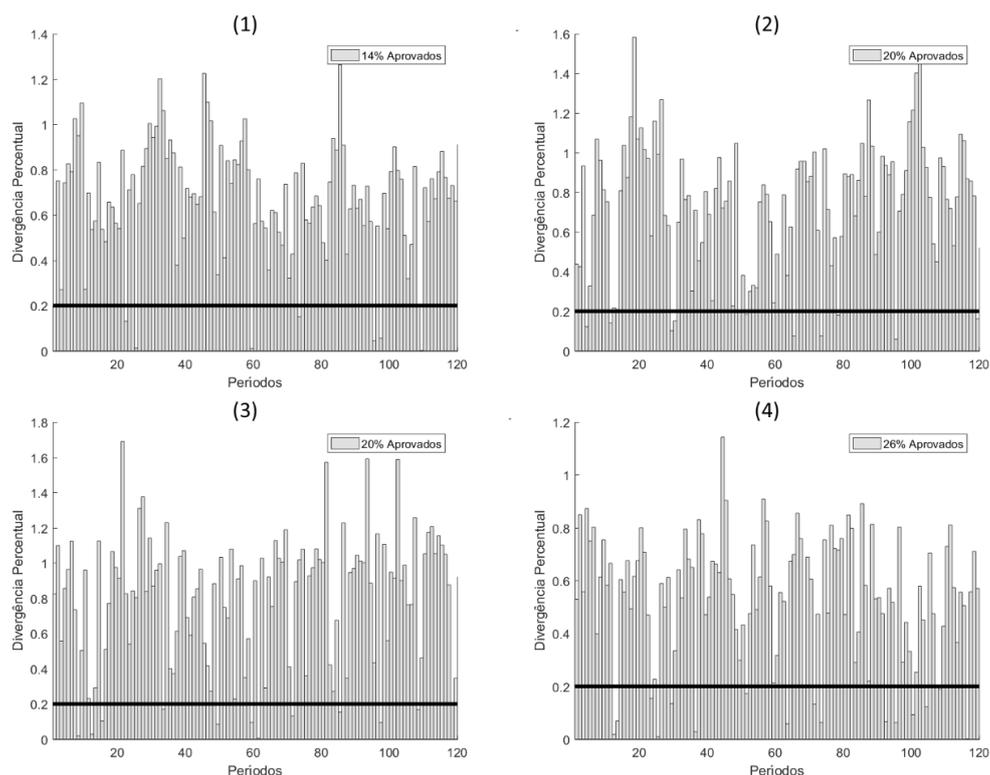


Figura 7 – Porcentagem dos aprovados na análise de Assimetria do modelo Lognormal

Tabela 3 – Resultados da Análise de Sequência Negativa

Sequência Negativa							
Sudeste				Sul			
Probabilidade de máximos (cenários < histórico)							
Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio	Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio
90	97	86	86	93	95	77	76
Nordeste				Norte			
Probabilidade de máximos (cenários < histórico)							
Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio	Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio
95	92	89	88	99	98	96	96

7) Análise de Sequência Positiva:

É análogo a sequência negativa, porém neste caso analisa-se o período de tempo que as vazões afluentes estão acima dos valores predeterminados, ou seja, representa a capacidade de reprodução dos períodos de cheia. Os valores de interesse são equivalentes ao critério anterior. Os resultados para essa análise são apresentados na tabela 4.

Neste caso o modelo proposto consegue reproduzir, com exceção do subsistema Nordeste os períodos de aflúências altas. Pode-se avaliar com esse resultado que tal característica ocorre devido ao subsistema nordeste apresentar de forma geral um comportamento de aflúências baixo. Dessa forma, o modelo ajustado representa as séries de baixa aflúência com melhor qualidade.

8) Análise dos Resíduos:

A análise dos resíduos tem como objetivo verificar se o modelo foi bem ajustado, sendo assim, avalia-se a média (através do teste-t), a heterocedasticidade condicional (através do teste ARCH) e por fim se as autocorrelações são diferentes de zero, ou seja, se os dados são independentemente distribuídos (através do teste de LJUNG-BOX). Os resultados para estes testes, por subsistema, são apresentados na tabela 5.



Tabela 4 – Resultados da Análise de Sequência Positiva

Sudeste				Sul			
Probabilidade de máximos (cenários > histórico)				Probabilidade de máximos (cenários > histórico)			
Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio	Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio
92	97	98	91	91	88	90	99
Nordeste				Norte			
Probabilidade de máximos (cenários > histórico)				Probabilidade de máximos (cenários > histórico)			
Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio	Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio
46	66	18	89	99	82	94	93

Tabela 5 – Análise dos Resíduos

	teste-t	ARCH	LJUNG-BOX
Sudeste	0,0000	0,9500	0,9500
Sul	0,0000	0,9667	0,8667
Nordeste	0,0000	0,9250	0,9250
Norte	0,0000	0,9250	0,9083

A partir dos resultados expostos é importante destacar: (a) o teste-t avalia se os resíduos seguem uma normal com média zero. Observando os resultados, onde nenhum subsistema aceita a hipótese nula, e lembrando que uma das considerações do modelo multiplicativo é que $E[a_t] = 1$, tem-se que o comportamento dos resíduos segue o esperado; (b) o teste ARCH avalia a hipótese nula de que a série de resíduos não apresenta heterocedasticidade condicional, ou seja, a partir dos resultados pode-se dizer que as séries não apresentam tal característica; (c) o teste de LJUNG-BOX, que testa sob a hipótese nula se os dados são independentes, aponta que os resíduos apresentam tal característica com uma boa margem.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

A proposta deste trabalho foi o desenvolvimento do modelo PAR(p) Multiplicativo, com o objetivo de gerar cenários sintéticos de aflúncias para serem aplicados no contexto do planejamento e operação de médio/longo prazo do setor elétrico brasileiro. Tendo em vista tal objetivo pode-se dizer que o mesmo foi cumprido.

As contribuições deste trabalho para as comunidades científica, acadêmica e industrial, estão no âmbito do desenvolvimento de um novo modelo para simulação de cenários, que apresentou resultados melhores do que o modelo vigente, podendo ser considerado como uma alternativa para utilização no SEB.

Por fim, propõe-se para trabalhos futuros a investigação do comportamento da modelagem no processo de otimização utilizado pelo setor.

É válido ressaltar que o desenvolvimento aqui apresentado faz parte de uma das etapas do projeto estratégico de pesquisa e desenvolvimento intitulado “Modelos de Otimização do Despacho Hidrotérmico”.

6. Referências

- BALDIOTI, H. R., 2014. *Abordagem Multicritério para Avaliação de Modelos Geradores de Cenários Aplicados ao Planejamento da Operação Hidrotérmica de Médio Prazo*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.
- CABRAL, F. G., 2016. *Uma proposta de um modelo periódico multivariado autorregressivo multiplicativo para geração de cenários de aflúncia aplicável ao modelo de planejamento do setor elétrico brasileiro*. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro: Brasil.



- CASTRO, C. M. B., 2012. *Planejamento Energético da Operação de Médio Prazo Conjugando as Técnicas de PDDE, PAR(p) e Bootstrap*. Juiz de Fora: Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- CEPEL, 2015. *NEWAVE - Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazo*. [Online]
Available at: <http://www.cepel.br/produtos/newave-modelo-de-planejamento-da-operacao-de-sistemas-hidrotermicos-interligados-de-longo-e-medio-prazo.htm>
[Acesso em 12 fevereiro 2017].
- FERREIRA, P. G. C., 2013. *A estocasticidade associada ao Setor Elétrico Brasileiro e uma nova abordagem para a geração de aflúências via Modelos Periódicos Gama*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.
- HIPEL, K. W. & MCLEOD, A. I., 1994. *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*. Amsterdam: The Netherlands Elsevier.
- MACEIRA, M. E. P. & BEZERRA, C. V., 1997. *Stochastic Streamflow model for Hydroelectric*. Vancouver, Canada, 5th Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS).
- MARCATO, A. L. M., 2002. *Representação híbrida de sistemas equivalentes e individualizados para o planejamento da operação a médio prazo de sistemas de potência de grande porte*. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, DEE, PUC-Rio.
- MME, 2016. *Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro - Dezembro de 2016*. [Online]
Available at:
<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3308684/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Dezembro-2016.pdf/f6b5284d-4105-4b79-a030-31755664721a>
[Acesso em 12 fevereiro 2017].
- OLIVEIRA, F. L. C., 2010. *Nova abordagem para geração de cenários de aflúências no planejamento da operação energética de médio prazo*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.
- OLIVEIRA, F. L. C., 2013. *Modelo de Séries Temporais para Construção de Árvores de Cenários Aplicadas à Otimização Estocástica*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.
- ONS, 2017. *Operador Nacional do Sistema Elétrico*. [Online]
Available at: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx
[Acesso em 12 02 2017].
- PENNA, D. D. J., 2009. *Definição da Árvore de Cenários de Aflúências para o Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.
- PENNA, D. D. J., MACEIRA, M. E. P. & DAMÁZIO, J. M., 2011. *Selective Sampling applied to long-term*. Stockholm, Sweden, Proceedings of 17th Power Systems Computation.
- PEREIRA, M. V. F., 1989. Optimal stochastic operations scheduling of large hydroelectric systems. *International Journal of Electric Power and Energy Systems*, 11(3), pp. 161-169.
- RIBEIRO, B. A. & BALDIOTI, H. R., 2014. *Multicriteria Approach for Evaluation of Scenarios Generation Models Applied to the Medium-Term Hydrothermal Operation Planning*. Washington, DC: Proceedings on The International Symposium on the Analytic Hierarchy Process.
- SALAS, J. D. & OBEYSEKERA, J. T. B., 1982. ARMA Model Identification of Hydrologic Time Series. *Water Resources Research*, Volume 18, pp. 1011-1021.