

Área: Sustentabilidade | **Tema:** Produção, Cadeia de Suprimento e Logística Sustentável

**ANÁLISE DE RESÍDUOS EM GRÁFICOS DE CONTROLE A PARTIR DE UM MODELO ARIMA:
PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA NO BRASIL.**

**HYDRAULIC ENERGY PRODUCTION IN BRAZIL ANALYZED BY RESIDUES CONTROL CHARTS
FROM ARIMA MODEL**

Adriano Mendonça Souza, Valentina Wolff Lirio , Renan Mitsuo Ueda, Cristiano Ziegler e Tobias Da Paixão

Fiegenbaum

RESUMO

O Brasil possui o maior potencial hidrelétrico do mundo, proporcionando uma vantagem competitiva excepcional na área de produção de energia renovável. O objetivo desta pesquisa é monitorar a produção de energia hidráulica brasileira por meio da análise de resíduos a partir da modelagem ARIMA utilizando gráficos de controle. A série temporal investigada da produção de energia hidráulica do Brasil foi obtida no Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). O período de análise compreende os anos de 1970 a 2017, totalizando assim, 48 observações anuais. A metodologia adotada foi a proposta por Box-Jenkins por meio da modelagem ARIMA. Ao final do estudo, o modelo que melhor representou o comportamento da produção de energia hidráulica brasileira foi o ARIMA (1,1,1), ou seja, o processo gerador da série configurou-se como sendo um autorregressivo de ordem 1, contendo um filtro de médias móveis de ordem 1, além disso, o modelo apresentou ruído branco e parâmetros significativos. De acordo com os testes de raízes unitárias, houve a necessidade de aplicação de uma diferença na série a fim de torná-la estacionária ($d=1$). Para a análise dos resíduos por meio de gráficos de controle, realizou-se a previsão in-sample e as medidas de acurácia do modelo ajustado foram calculadas. Pelo gráfico de controle de medidas individuais dos resíduos houve a presença de dois pontos fora dos limites de controle, indicando que nestes dois pontos (anos de 2001 e 2013) a produção de energia hidráulica foi abaixo do esperado. Tal modelagem auxiliou na compreensão do comportamento da série de produção de energia hidráulica brasileira.

Palavras-Chave: Energia renovável, hidráulica, Box-Jenkins, Análise de resíduos, ARIMA

ABSTRACT

Brazil has the largest hydroelectric potential in the world, providing an exceptional competitive advantage in the area of renewable energy production. The objective of this research is to monitor the Brazilian hydroelectric power production through residues analysis from ARIMA modeling using control charts. The investigated time series of Brazil's hydraulic energy production was obtained from the Institute of Applied Economic Research (IPEA). The analysis period comprises from 1970 to 2017, totaling 48 annual observations. The methodology adopted was proposed by Box-Jenkins through ARIMA modeling and the model selected to represent Brazilian hydraulic energy production was ARIMA (1,1,1). The time series generating process was an autoregressive of order 1 and a moving average of order 1 in first differences $d=1$. For the analysis of the residuals through control charts for individual measurements showed the presence of two points out of the control limits, indicating that in these two points (years 2001 and 2013) hydro production was below expectations. Such modeling helped to understand the Brazilian behavior of the series of hydraulic energy production.

Keywords: Box-Jenkins, Renewable energy, Hydro, residues analysis, ARIMA

ANÁLISE DE RESÍDUOS EM GRÁFICOS DE CONTROLE A PARTIR DE UM MODELO ARIMA: PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA NO BRASIL

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem o maior potencial hidrelétrico do mundo, do qual a metade ainda está por aproveitar, o que lhe confere uma vantagem comparativa excepcional. Entretanto, essa imensa reserva, de caráter renovável, está sendo utilizada cada vez menos, enquanto o abastecimento de energia elétrica passa a depender cada vez mais de fontes térmicas, mais caras e mais poluentes (ABBUD; TANCREDI, 2010).

A energia hidráulica é produzida a partir da força do movimento das águas. Assim, alguns fatores influenciam na produção da energia hidrelétrica, sendo eles: a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período de tempo e os desníveis do relevo, sejam eles naturais, como as quedas d'água, ou criados artificialmente. Em relação à estrutura da usina, a mesma é composta, basicamente, por: barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, que funcionam em conjunto e de maneira integrada (ANEEL, 2008).

Entretanto, a construção de hidrelétricas e conseqüentemente suas barragens e lagos causam diversos impactos sociais e ambientais negativos. As populações são atingidas direta e concretamente a partir do alagamento de suas casas, propriedades, áreas produtivas e até cidades. Em relação a área ambiental o principal impacto costuma ser o alagamento de importantes áreas florestais e o desaparecimento do habitat dos animais. Muitas vezes a hidrelétrica é construída em áreas onde se concentram os últimos remanescentes florestais da região, desmatando e inundando espécies ameaçadas de extinção (VIEIRA; VAINER, 20-).

O objetivo desta pesquisa é monitorar a produção de energia hidráulica brasileira por meio da análise de resíduos a partir da modelagem ARIMA utilizando gráficos de controle no período de 1970 a 2017. Os dados foram coletados do site do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (www.ipeadata.gov.br).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentado o referencial teórico sobre a temática que envolve o trabalho: energia renovável (2.1), energia hidráulica (2.2) e modelagem ARIMA (2.3).

2.1 ENERGIA RENOVÁVEL

As fontes renováveis têm se tornado cada vez mais importantes em âmbito global, devido principalmente ao esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e a busca pela redução de emissões de gases do efeito estufa (GEE). Dessa forma, é preciso uma mudança na produção de energia, visando a utilização das fontes renováveis (SANTOS et al., 2014).

Segundo Galdino et al. (2004), a maioria das fontes de energia, como por exemplo a hidroelétrica, solar, eólica, biomassa e combustíveis fósseis, pode ser considerada, proveniente direta ou indiretamente da energia solar. Porém, entre elas o combustível fóssil é definido como uma forma de energia não renovável, já que os processos de sua utilização são irreversíveis e geram resíduos nocivos ao meio ambiente. Logo, as demais fontes citadas, são consideradas renováveis e limpas, já que não produzem resíduos prejudiciais e causam, em geral, menores danos ao meio ambiente (RANGEL et al., 2016).

Assim, o sol pode ser visto como uma fonte de energia inesgotável. O aproveitamento da energia gerada por este astro, é, com certeza, uma das alternativas energéticas mais

promissoras para a humanidade. É a partir da energia dessa estrela, que se dá a evaporação, responsável pelo ciclo das águas, que possibilita o represamento de rios e com isso a geração de hidroelétricas, sendo esta a tecnologia responsável por mais de 90% da energia elétrica gerada no Brasil (GALDINO et al., 2004).

De acordo com Galdino et al. (2004), todas as tecnologias energéticas estão hoje unidas nos países desenvolvidos para enfrentar os problemas de esgotabilidade do energético mais utilizado - o petróleo - e da preocupação global com o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera terrestre. Além disso, deve-se ainda considerar o caráter estratégico da utilização de fontes alternativas de energia, em razão de que grande parcela das reservas mundiais de petróleo está localizada em regiões de conflitos políticos e étnicos de difícil solução a curto prazo.

A longo prazo, a escassez do petróleo poderá vir a ser o grande impulsionador da utilização das energias renováveis em larga escala. Tendo em vista também o aquecimento global e todos os efeitos associados (derretimento de geleiras, mudanças climáticas, entre outros) está se transformando num foco de atenções da humanidade, que começa a perceber que é preciso mudanças para garantir o desenvolvimento de forma sustentável (GALDINO et al., 2004).

Atualmente, já são debatidas medidas para diminuir impactos ambientais, como a taxação de emissões de carbono e a utilização de recursos energéticos renováveis em grande escala. O Protocolo de Kyoto, documento do qual o Brasil assinou, com o objetivo de definir um mecanismo de desenvolvimento limpo, já é fruto dessas preocupações. Neste cenário, a energia solar, a eólica, a biomassa e pequenas centrais hidroelétricas começam a disputar entre si e com as tecnologias já utilizadas em larga escala uma atenção maior, no sentido de aumentar-se a escala de produção e obter preços mais competitivos para a energia gerada (GALDINO et al., 2004).

2.2 ENERGIA HIDRÁULICA

Segundo o Atlas Nacional de Energia Elétrica, publicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2005, a energia hidráulica é resultado da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, que provocam a evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre. Ao contrário das demais fontes renováveis, representa uma parcela significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas. Atualmente, é a principal fonte geradora de energia elétrica para diversos países e responde por cerca de 17% de toda a eletricidade gerada no mundo.

Junto às quedas d'água das Cataratas do Niágara, foi construída a primeira hidrelétrica do mundo, no final do século XIX, quando o carvão era o principal combustível e as pesquisas sobre petróleo estavam em estágio inicial. Nesse mesmo período no Brasil, ainda no reinado de D. Pedro II, foi construída também a primeira hidrelétrica brasileira, no município de Diamantina, utilizando as águas do Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, com 0,5 MW (megawatt) de potência e linha de transmissão de dois quilômetros (ANEEL, 2008).

Em âmbito nacional, água e energia têm uma histórica interdependência. A colaboração da energia hidráulica ao desenvolvimento econômico do Brasil tem sido expressiva, tanto no atendimento das diversas demandas da econômica (atividades industriais, agrícolas, comerciais e de serviços, entre outros) ou da própria sociedade (melhoria do conforto das habitações e da qualidade de vida das pessoas). Além do que, desempenha papel importante na integração e no desenvolvimento de regiões distantes dos grandes centros urbanos e industriais (ANEEL, 2005).

Segundo Bortoleto (2001), em relação as instalações de hidrelétricas, os impactos causados à região receptora são complexos por se tratar de obras de grande amplitude, que

acabam ultrapassando os limites da área de implantação. No Brasil, houve um rápido crescimento e fortalecimento do setor elétrico, com a criação da Eletricidade Brasileira (Eletrobrás), em 1962, propiciando a instalação de um grande número de hidrelétricas, sem que se pensasse na amplitude de seus impactos no longo prazo, mas apenas no curto e médio prazos.

Em relação a estrutura de uma usina hidrelétrica, a mesma funciona de maneira integrada e em conjunto, e é formada principalmente, pelo sistema de captação e adução de água, pela barragem, casa de força e vertedouro. A barragem tem por objetivo interromper o curso normal do rio e permitir a formação do reservatório. Além de “estocar” a água, esses reservatórios têm outras funções: permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem. Os sistemas de captação e adução são formados por túneis, canais ou condutos metálicos que têm a função de levar a água até a casa de força. É nesta instalação que estão as turbinas, formadas por uma série de pás ligadas a um eixo conectado ao gerador. Durante o seu movimento giratório, as turbinas convertem a energia cinética (do movimento da água) em energia elétrica por meio dos geradores que produzirão a eletricidade. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio pelo canal de fuga. Por último, há o vertedouro. Sua função é permitir a saída da água sempre que os níveis do reservatório ultrapassam os limites recomendados. Uma das razões para a sua abertura é o excesso de vazão ou de chuva. Outra é a existência de água em quantidade maior que a necessária para o armazenamento ou a geração de energia (ANEEL, 2005).

De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2005), o setor elétrico brasileiro possui uma matriz energética bem mais “limpa”, com forte participação de fontes renováveis já que o parque onde tem-se as usinas não são caracterizados pela emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE).

Os maiores obstáculos à expansão hidrelétrica do país são de natureza ambiental e judicial, já que tem-se dificuldades para a obtenção do licenciamento ambiental causada por questionamentos na justiça, ações e liminares. Os opositores alegam que novas construções podem provocar impacto na vida da população, na flora e fauna dos locais, dado que interferem no traçado natural e no volume de água dos rios. Porém, é preciso construir novas usinas -com impacto socioambiental mínimo - para produzir a energia suficiente para o crescimento econômico e ampliação da oferta de empregos. Dessa forma, busca-se desenvolver projetos de maneira sustentável, buscando os resultados econômicos e simultaneamente, compensando os impactos socioambientais provocados pelas usinas, tem sido uma tendência na construção das hidrelétricas (ANEEL, 2005).

2.3 MODELAGEM ARIMA

O modelo intitulado Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), desenvolvido por Box-Jenkins (1970) configura-se como sendo um método utilizado para a análise de séries temporais, objetivando a realização de previsões. Sendo assim, a modelagem ARIMA busca identificar a correlação entre os valores da série analisada durante um período de tempo (SOUZA, 2016).

O uso dos modelos ARIMA proposto por Box-Jenkins tem como premissa a estacionariedade da série, o mesmo assegura que os parâmetros estimados ao longo das observações sejam significativos. Portanto, caso a série analisada em nível não seja estacionária, aplica-se uma diferença (MARTIN et al, 2016). Primeiramente, é construído um gráfico da série original, a fim de verificar visualmente o comportamento da série temporal. Porém, a confirmação da estacionariedade torna-se mais precisa por meio do uso dos testes de raízes unitárias.

Os testes de raízes unitárias mais utilizados são: Augmented Dickey e Fuller – ADF (DICKEY; FULLER, 1981; SAID; DICKEY, 1984); Teste Kwiatkowski, Phillips, Schmidt e Shin – KPSS (KWIATKOWSKI et al., 1992); e Phillips e Perron – PP (PHILLIPS; PERRON, 1988). Souza (2016) propõe a utilização de forma conjunta de tais testes, pois o uso conjunto dos mesmos aumenta a acurácia da obtenção do grau de estacionariedade da série.

Os modelos ARIMA são compostos por três filtros: autorregressivo (AR), integração (I) e médias móveis (MA). Após a aplicação da modelagem de Box-Jenkins e tendo como base informações sobre a autocorrelação serial, pode-se apontar o melhor modelo de previsão. A seguir são descritas as etapas para a aplicação da metodologia Box-Jenkins: identificação, estimação, validação e previsão (BOX-JENKINS, 1970).

Na etapa de identificação é verificado o comportamento da série por meio da função de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP). Na estimação é determinado os parâmetros do modelo – autorregressivos e de médias móveis. A constatação do modelo que melhor se ajustou ao comportamento da série original é realizada na etapa de verificação. Caso todas as etapas anteriores sejam realizadas, inicia-se a etapa de previsão (KIRCHNER et al., 2011; MARASCA et al., 2017).

Os modelos ARIMA podem ser representados genericamente de acordo com a equação 1 a seguir:

$$\phi(B)\Delta^d X_t = \theta(B)E_t$$

Na equação 1 o parâmetro autorregressivo de ordem p é representado por ϕ e o parâmetro de médias móveis q por θ . B é o operador retroativo do modelo ARIMA (p,d,q) e d a quantidade de diferenciação da série.

Os resíduos do modelo ajustado correspondem à diferença existente entre os valores da série original e os valores advindos do modelo ajustado. Os resíduos provenientes da diferenciação devem apresentar ruído branco, ou seja, possuir média igual a zero, variância constante e não conter autocorrelação.

Moretin (2008) sugere o uso de critérios penalizadores Akaike Information Criteria – AIC (AKAIKE, 1973) e Bayesian Information Criteria – BIC (SCHWARZ, 1978) para a escolha do modelo que melhor se ajusta ao comportamento da série original. Ambos os critérios consideram os parâmetros, os modelos e a variância dos erros. Portanto, o modelo selecionado será o que possuir o menor valor para os dois critérios, AIC e BIC. A seguir, são apresentadas as equações dos critérios penalizadores AIC (Equação 2) e BIC (Equação 3):

$$AIC(p, q) = \ln\sigma_{p,q}^2 + \frac{2(p+q)}{n}$$

$$BIC(p, q) = \ln\sigma_{p,q}^2 + (p+q) \frac{\ln N}{N}$$

Onde p e q representam os parâmetros do modelo, n configura-se como o tamanho da amostra, σ^2 corresponde à variância estimada dos erros e ln o logaritmo neperiano.

Para a verificação da acurácia da previsão de um modelo, Tubino (2009) propõe a realização da comparação entre os valores da série original e os valores estimados. Os mecanismos de medida de acurácia utilizados neste estudo foram: *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) e o coeficiente U-Theil. Tais medidas de acurácia são calculadas de acordo com as equações a seguir (Equações 4, 5 e 6):

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |E_t|}{n}$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n |E_t/Z_t| * 100}{n}$$

$$U - Theil = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (E_t)^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Z_t - Z_{t-1})^2}}$$

Nas Equações 4, 5 e 6, E_t corresponde ao erro de previsão no instante t e n configura-se como a quantidade de observações. Z_t é o valor real no tempo t . Por outro lado, o coeficiente U-Theil corresponde a comparação realizada entre os valores do modelo que foi ajustado e a previsão dita ingênua. Nesta medida de acurácia se o valor de U-Theil for maior ou igual a 1, tem-se que o erro médio do modelo que foi ajustado é superior ou igual ao da previsão ingênua. Caso o valor de U-Theil seja menor que 1, então pode-se dizer que o modelo que foi ajustado é considerado inferior ao da previsão ingênua.

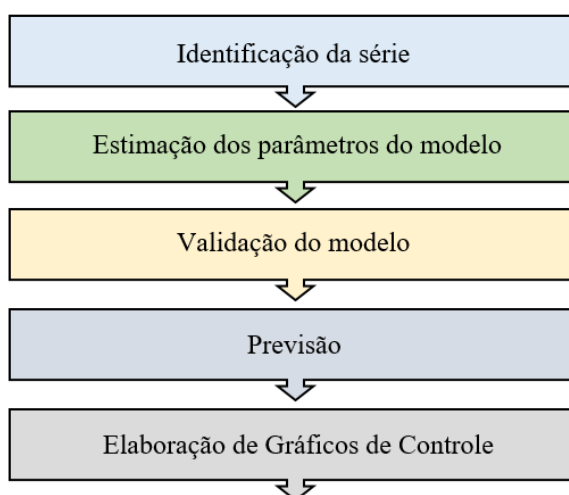
Na próxima seção são apresentados os métodos utilizados neste estudo, bem como os dados analisados.

3 MÉTODOS E DADOS

A série temporal a ser analisada corresponde à produção anual de energia primária renovável (energia hidráulica), proveniente do Ministério de Minas e Energia, Balanço Energético Nacional (MME). Os dados foram retirados do site do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (www.ipeadata.gov.br) e compreende os anos de 1970 até 2017, totalizando assim, 48 observações anuais.

Desta forma, as etapas propostas por Box-Jenkins (1970) foram seguidas para a modelagem ARIMA. Sendo assim, na Figura 1 é apresentada as etapas seguidas para a realização da modelagem da série.

Figura 1 – Etapas para a modelagem ARIMA



Fonte: autores.

As etapas a serem seguidas são: identificação da série, estimação dos parâmetros do modelo, validação do modelo, previsão e elaboração de gráficos de controle. Para uma melhor compreensão, as etapas da Figura 1 são detalhadas a seguir:

Identificação da série: primeiramente estacionariedade da série será verificada por meio de inspeção gráfica e em seguida confirmada pelos testes de raiz unitária (ADF, KPSS e PP). Caso seja constatada a não estacionariedade da série em nível, é aplicada uma diferença na mesma. Tal procedimento é repetido até que a série se torne estacionária.

Estimação dos parâmetros do modelo: Nesta etapa determina-se o número de defasagens dos parâmetros por meio da FAC e FACP. Os parâmetros dos modelos concorrentes são estimados, e, portanto, os resíduos provenientes dos modelos ajustados são avaliados.

Validação do modelo: A validação é realizada por meio dos critérios penalizadores AIC e BIC, e pela análise dos resíduos. O modelo concorrente que apresentar o melhor desempenho, será o validado.

Previsão: Nesta etapa é realizada a previsão, podendo ser *in-sample* ou *out-sample*. Para a análise da acurácia do modelo selecionado as estatísticas *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) e o coeficiente U-Theil são calculadas.

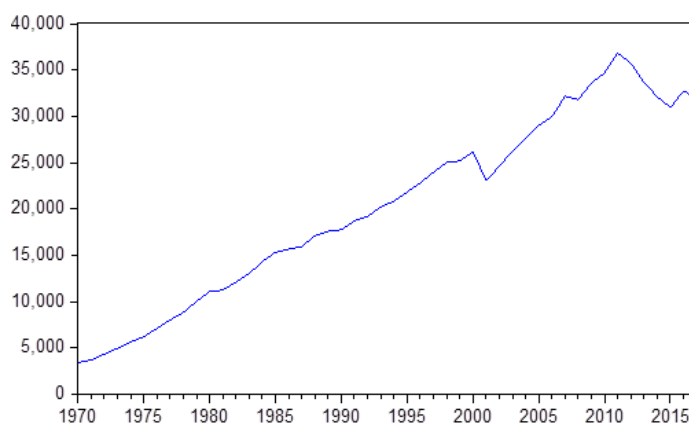
Elaboração de gráficos de controle: Calcula-se os limites superiores e inferiores dos resíduos do modelo selecionado, a fim de verificar se o mesmo encontra-se sob controle estatístico.

Por fim, para o tratamento e modelagem da série de produção de energia hidráulica no Brasil foi utilizado o *software* Eviews 9 S.V. e para a elaboração dos gráficos de controle o *software* STATISTICA 8.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Por meio da inspeção visual da série em nível (Figura 2) verificou-se que a mesma apresenta um comportamento de tendência ao longo dos períodos. Esta constatação será corroborada utilizando a FAC e FACP da série em questão.

Figura 2 – Produção de energia hidrelétrica no Brasil



Fonte: autores.

Para a comprovação da estacionariedade das séries aplicou-se os testes de raízes unitárias, como o ADF, KPSS e o PP. Na Tabela 1 estão contidos os resultados provenientes dos testes de raízes unitárias. Pelos testes ADF e PP, a série torna-se estacionária por meio da aplicação de uma diferença, ambos os testes convergiram para o mesmo resultado. Apenas o teste KPSS apontou que a série é estacionária em nível.

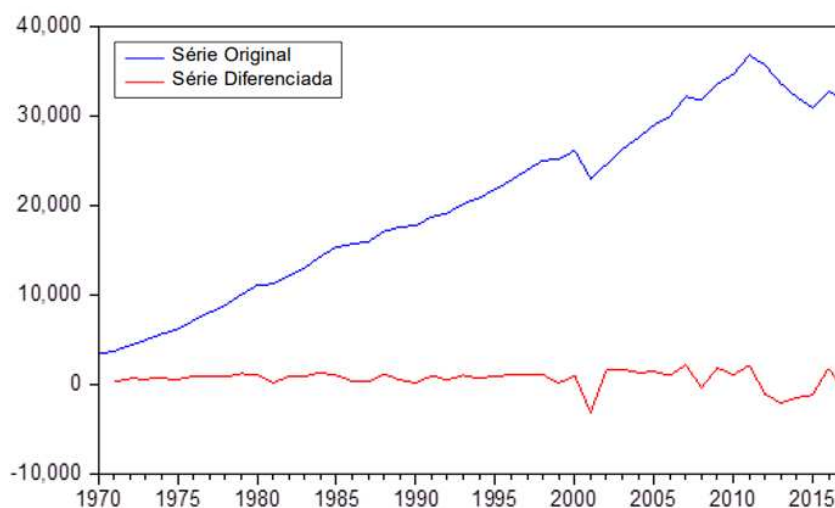
Tabela 1: Teste de raiz unitária

Testes	Série em nível	Série em 1° diferença
ADF ^a	-1,0156 (p = 0,9319) ^c	-6,0658 (p > 0,00) ^c
PP ^b	-3,5085 (p = 0,8949) ^d	-6,0938 (p > 0,00) ^d
KPSS ^c	0,0944 ^e	0,0875 ^e

Fonte: autores. ^a H₀: a série possui uma raiz unitária ($\alpha = 0,05$); ^b H₀: a série é estacionária ($\alpha = 0,05$); ^c Valor crítico para o teste ADF: -3,5085; ^d Valor crítico para o teste PP= -3,5107; ^e Valor crítico para o teste KPSS: 0,1460.

Sendo assim, adotou-se o resultado da maioria dos testes, onde a série é estacionária após a aplicação de uma diferença. Figura 3 contém a série original e a diferenciada (d=1), representadas pelas cores azul e vermelha, respectivamente. Visualmente é possível notar que a série tornou-se estacionária após a aplicação da diferença, garantindo que os parâmetros a serem estimados sejam estáveis.

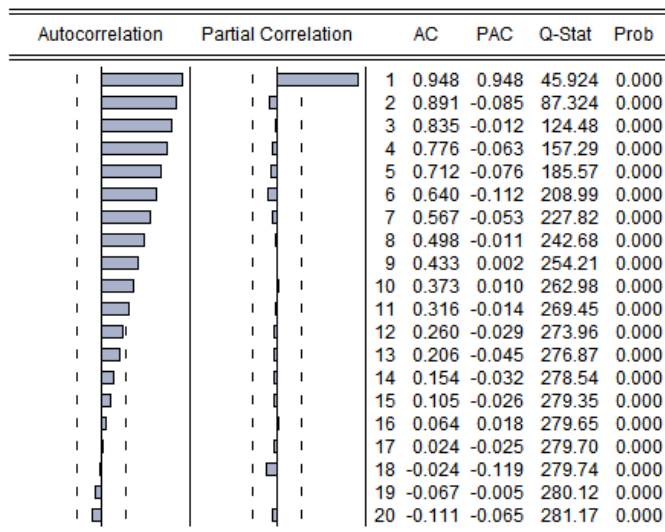
Figura 3 – Série original e diferenciada



Fonte: autores.

Em seguida, a análise da função de autocorrelação (FAC) e da autocorrelação parcial (FACP) foram utilizadas (Figura 4). O objetivo foi a identificação de possíveis modelos concorrentes, ou seja, modelos que pudessem representar de forma mais precisa o comportamento da série original.

Figura 4 – FAC e FACP



Fonte: autores.

Na Figura 4, pela FAC e FACP verifica-se a presença de componentes autorregressivos, o decaimento da função de autocorrelação ocorre de forma lenta, indicando a dependência entre as observações. Posteriormente, estimou-se os parâmetros dos modelos que mais se ajustaram ao comportamento da série original. O objetivo foi encontrar o melhor modelo de previsão. Portanto, na Tabela 2 estão presentes os modelos concorrentes encontrados, os parâmetros de cada um dos modelos previsores, o nível de significância dos parâmetros, os valores provenientes dos critérios penalizadores AIC e BIC, bem como a informação da presença de ruído branco em cada modelo.

Tabela 2: Modelos concorrentes

ARIMA(1,1,0)				
Parâmetro	<i>p-value</i>	AIC	BIC	Ruído branco
$\phi_1 = 0,3320$	0,0164	16,9869	17,0656	Sim

ARIMA(1,1,1)				
Parâmetro	<i>p-value</i>	AIC	BIC	Ruído branco
$\phi_1 = 0,9753$	$p < 0,0000$	16,9217	17,0398	Sim
$\theta_1 = -0,8744$	$p < 0,0000$			

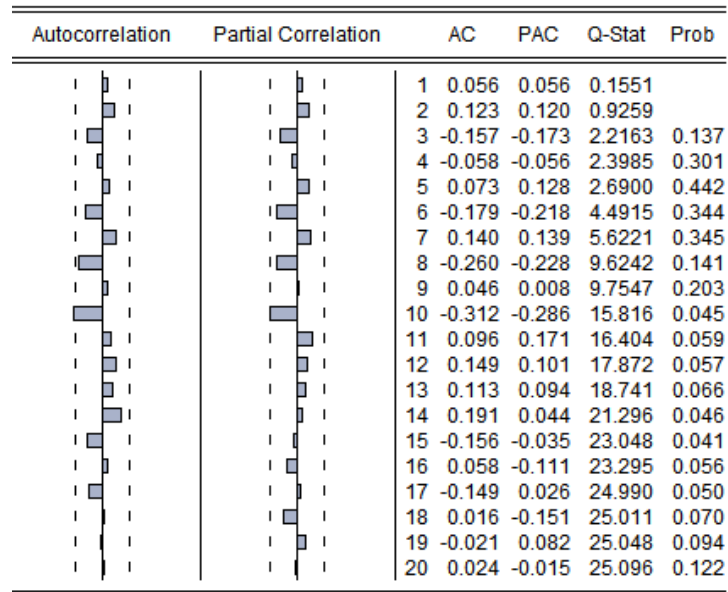
Fonte: autores.

Por meio da análise dos resíduos dos modelos gerados, assim como os valores provenientes dos critérios penalizadores do AIC e BIC, o modelo selecionado foi o ARIMA (1,1,1). Tal modelo apresentou ruído branco, menores valores para os critérios penalizadores se comparado aos demais modelos e parâmetros significativos ($p < 0,05$).

Sendo assim, o modelo que melhor representou a produção de energia hidrelétrica brasileira aponta que a série possui um comportamento autorregressivo de ordem 1, ou seja, a produção do ano passado influencia no ano atual, sendo o fator de influência positiva 0,9753. Outro achado importante foi o filtro de médias móveis com a presença de um parâmetro negativo (-0,8744).

Além disso, os resíduos provenientes do modelo ajustado não apresentam autocorrelação para a FAC e FACP (Figura 5)

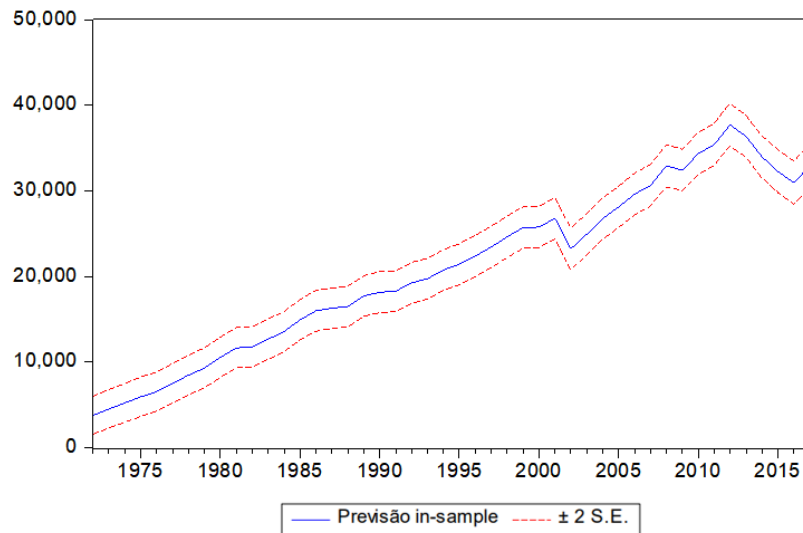
Figura 5 – FAC e FACP dos resíduos do modelo ajustado



Fonte: autores.

O modelo ajustado e selecionado atendeu a todos os pressupostos da metodologia adotada, portanto, foi possível a realização da previsão da série *in-sample* (Figura 6). O objetivo da previsão foi a verificação da acurácia do modelo ajustado.

Figura 6 – Previsão da série *in-sample*



Fonte: autores.

Para a verificação da acurácia da previsão realizou-se a comparação entre os valores da série original e os valores estimados por meio dos mecanismos de medida de acurácia: *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) e o coeficiente U-Theil (Tabela 3).

Tabela 3: Medidas de Acurácia do Modelo Ajustado

ARIMA (1,1,1)	
MAE	802,6946
MAPE	4,1363
U-Theil	0,0233

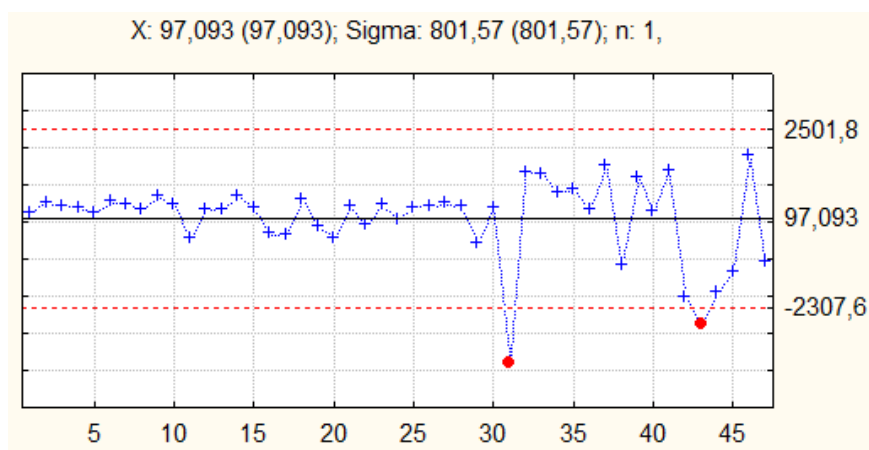
Fonte: autores.

O valor obtido pela medida de acurácia U-Theil (0,0233) foi menor que 1, apontando que o modelo ajustado apresenta melhores resultados que uma previsão ingênua. O valor do MAPE foi baixo, indicando que o modelo ARIMA (1,1,1) é um bom previsor.

Assim, com o modelo encontrado, sendo ele um ARIMA (1,1,1), realizou-se previsões que auxiliaram na determinação dos resíduos, os quais foram utilizados para se traçar os gráficos de controle de medidas individuais para os resíduos. Desta forma, foi possível determinar os períodos de baixa e alta na produção de energia hidráulica.

Os gráficos de controle possibilitaram analisar cada uma das 48 observações, as quais representam cada ano entre 1970 e 2017.

Figura 7 – Gráfico de controle de medidas individuais dos resíduos



Fonte: autores.

Na Figura 7, nota-se que os pontos estão oscilando em torno da média, mostrando assim, os períodos de alta e baixa na produção da energia hidráulica. Destaca-se apenas 2 pontos que são os anos de 2001 e 2013 que estão dispostos fora dos limites de controle, indicando que nesses pontos o processo está “fora de controle”, ou seja, nesses 2 anos a produção de energia hidráulica esteve abaixo do esperado. Os demais pontos estão dispostos dentro dos limites inferiores e superiores de controle e assim conclui-se que “não existem evidências de que o processo esteja fora de controle”.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo gerador da série da produção de energia hidráulica do Brasil foi um autorregressivo de ordem 1, com um filtro de médias móveis de ordem 1 e uma diferença na

série, ou seja, um modelo ARIMA (1,1,1). A partir do modelo ajustado, tornou-se possível a realização de previsão in-sample, bem como, a análise de resíduos em gráficos de controle. A previsão da produção de energia hidráulica no Brasil foi condizente com a realidade vivenciada pelo país, onde a produção de tal energia cresce a cada ano. Portanto, o modelo escolhido foi capaz de capturar os movimentos e características da série em questão, apontando que a mesma é influenciada pelo ano anterior, bem como, pela média da produção de energia hidráulica dos últimos dois períodos.

REFERÊNCIAS

- ABBUD, O. A.; TANCREDI, M., 2010. **Transformações recentes da matriz brasileira de geração de energia elétrica – causas e impactos principais**. Disponível em: <<http://www12.senado.gov.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td-69-transformacoes-recentes-da-matriz-brasileira-de-geracao-de-energia-eletrica-causas-e-impactos-principais>>. Acesso em: 12/07/19
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil)- ANEEL. 2º Ed. Brasília-DF: **Atlas de energia elétrica do Brasil: Energia Hidráulica**. 2005 p. 43. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica(2).pdf)>. Acesso em: 30/07/2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) - ANEEL. 3º Ed. Brasília-DF: **Atlas de energia elétrica do Brasil: Energia Hidráulica**. 2008 p.50-61 Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em: 30/07/19
- AKAIKE, H. **Information theory and an extension of the maximum likelihood principle**. 2nd International Symposium on Information Theory, Tsahkadsor, Armenia, USSR, September 2-8, BudapesT, 1973.
- BORTOLETO, E. M. **A implantação de grandes hidrelétricas: desenvolvimento, discurso e impactos**. Geografares, Vitória, no 2, jun. 2001.
- BOX, G. E. P.; JENKINS G. M. **Time Series Analysis, forecasting and control**. San Francisco: Holden Day, 1970.
- DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. **Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series with a Unit Root**. *Econometrica*, v. 49, n. 4, p. 1057-1072, jul. 1981.
- GALDINO, M. A. E.; LIMA, J.H.G.; RIBEIRO, C. M.; SERRA, E. T. **O Contexto das Energias Renováveis no Brasil**. *Revista da Direng*, 2004. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Direng.pdf>. Acesso em: 30/07/2019.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Ipea Data. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 29 jul. 2019.
- KIRCHNER, R.; SOUZA, A. M.; STUMM, E. M. F. **A Modelagem Como Ferramenta de Gestão**. *Latin American Journal of Business Management*. V. 2, N. 1, P. 223. Taubaté, 2011.
- KWIATKOWSKI, D.; PHILLIPS, P. C. B.; SCHMIDT, P.; SHIN, Y. **Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root**. *Journal of Econometrics*, v. 54, 159-178. North-Holland, 1992.
- MARASCA, L.; SANTOS, E. P.; UEDA, R. M.; DAPPER, S. N. SOUZA, A. M. **Desemprego no Brasil: Uma Análise Política, Econômica e Social**. *Revista FSA*, Teresina, v. 14, n. 3, p. 86-107, maio 2017.

- MARTIN, A. C.; HENNING, E.; WALTER, O. M. F. C.; KONRATH, A. C. **Análise de séries temporais para previsão da evolução do número de automóveis no Município de Joinville**. Revista Espacios, v. 37, n. 06, 2016.
- MORETTIN, P. A. **Econometria Financeira: um curso em séries temporais financeiras**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- PHILLIPS, P. C. B.; PERRON, P. **Testing for a Unit Root in Time Series Regression**. Biometrika, v. 75, n. 2, p. 335-346, jun. 1988.
- QUEIROZ, R.; GRASSI, P.; LAZZARE, K.; KOPPE, E.; TARTAS, B. R.; KEMERICH, P. D. C. **Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais**. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria e Revista Eletronica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET, v. 13 n. 13 Ago. 2013, p. 2774- 2784.
- RANGEL, M. S.; BORGES, P. B.; SANTOS, I. F. S. **Análise comparativa de custos e tarifas de energias renováveis no Brasil**. Revista brasileira de energias renováveis, 2016. Disponível em: <
https://www.researchgate.net/profile/Ivan_Santos9/publication/306335420_Analise_comparativa_de_custos_e_tarifas_de_energias_renovaveis_no_Brasil/links/57b8874d08ae14f440bb4aca/Analise-comparativa-de-custos-e-tarifas-de-energias-renovaveis-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 30/07/2019.
- SAID, S. E.; DICKEY, D. A. **Testing for unit roots in autoregressive-moving average models of unknown order**. Biometrika, v. 71, n. 3, p. 599-607, dez. 1984.
- SANTOS, I. F. S.; BARROS, R.M.; FILHO, G.L.T.2014. **Emissões de gases de efeito estufa em hidrelétricas: Uma revisão**. (Trabalho em andamento).
- SCHWARZ, GIDEON E. **Estimating the dimension of a model**. Annals of Statistics, 6 (2): 461–464, 1978.
- SOUZA, F. M. **Modelos De Previsão: aplicações à energia elétrica - ARIMA- ARCH-AI e ACP**. Curitiba: Appris, 2016. ISBN 9788547302481.
- TUBINO, D.F. **Planejamento E Controle Da Produção: Teoria E Prática**. 2. Ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- VIEIRA; F. VAINER; C. **Manual do Atingido: Impactos Sociais e Ambientais de Barragens**. Movimento dos Atingidos por Barragens – MAB. 20--