Brazilian Journals of Business

Determinação de expectativas dos preços do petróleo no mercado internacional através de modelos clássicos de previsão

Determination of petroleum price expectations in the international market through classic forecast models

Recebimento dos originais: 10/12/2019
Aceitação para publicação: 20/12/2019

Andre Assis de Salles
Doutor em Engenharia de Produção
Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Endereço: Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia - Bloco F / sala F-101, Ilha do Fundão - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, Brasil
E-mail: as@ufrj.br; aadesalles@gmail.com

Mariana Alves Londe
Engenheira de Produção
Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Endereço: Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia - Bloco F / sala F-101, Ilha do Fundão - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, Brasil
E-mail: mlonde@poli.ufrj.br

RESUMO
Este trabalho tem como propósito identificar a adequação de modelos de previsão clássicos para os preços do petróleo bruto dos tipos Brent e WTI, principais referências de preços do mercado internacional. Para se atingir esse objetivo foram elaborados modelos de previsão do tipo ARIMA para séries temporais de retornos diários e semanais das cotações dos preços das duas referências estudadas. Para construção desses modelos foram verificadas as hipóteses da violação dos pressupostos de normalidade e de estacionariedade através, respectivamente, dos testes Jarque-Bera e Dickey-Fuller. Esses pressupostos são importantes para assegurar estimativas eficientes dos modelos ARIMA. Os resultados obtidos indicam que, em geral, os modelos do tipo ARIMA se mostram adequados previsão dos preços do petróleo bruto. Os dados primários utilizados foram informações das cotações diárias do petróleo bruto negociado nos mercados de Nova Iorque e Londres, em um período posterior a deflagração da crise financeira internacional do subprime, de janeiro de 2009 a novembro de 2018.

Palavras-chave: Preço do Petróleo, Estacionaridade, Modelos ARIMA.

ABSTRACT
The purpose of this paper is to identify the adequacy of classical forecast models for Brent and WTI crude oil prices, the main international market price benchmarks. In order to achieve this objective, ARIMA forecast models were prepared for daily and weekly price returns time series of the two benchmarks studied. For the construction of these models, the hypothesis of violation of normality and stationarity assumptions was verified through, respectively, the Jarque-Bera and Dickey-Fuller tests. These assumptions are important to ensure efficient estimates of ARIMA models. The results indicate, in general, ARIMA models are suitable for predicting crude oil prices. The primary data used were crude oil daily quotes from the New York and London markets in a period subsequent to the outbreak of the subprime international financial crisis from January 2009 to November 2018.

Keywords: Crude Oil Price, Stationarity, ARIMA Models.

1 INTRODUÇÃO

O petróleo possui papel relevante em todos os setores da economia, do agrícola ao farmacêutico passando pelo industrial e energético. É conhecida a relação entre o consumo de petróleo e seus derivados e o crescimento da economia de um país, o que torna conhecimento do comportamento dos preços do petróleo bruto crucial tanto para produtores quanto para compradores.

Presente na cadeia de produção de inúmeros produtos, a expectativa dos preços de petróleo é fundamental para tomadores de decisões de políticas públicas, assim como para tomadores decisão nas empresas que dependem direta ou indiretamente das expectativas dos preços do petróleo. Além disso, para os agentes econômicos atuantes no mercado de energia e, especialmente, no mercado de petróleo essas expectativas indispensáveis. No mercado de petróleo em períodos passados foi comum a regulação dos preços do petróleo. Braginskii (2009) divide a história do petróleo em quatro períodos e somente no último período, o período entre 1986 e os dias atuais, não se observa regulação de preços. Com o desenvolvimento dos mercados e, em especial do mercado de derivativos, o petróleo bruto passa a ter um comportamento semelhante ao de um ativo financeiro. Negociado em bolsas de valores, o petróleo bruto é um ativo cada vez mais frequente em carteiras de investimento diversificadas no mercado internacional. Com isto, o preço do petróleo é sensível às variáveis macroeconômicas como um ativo financeiro com variações diárias e alta volatilidade. Aumentando, ainda mais, a complexidade da obtenção das expectativas dos preços dessa *commodity*.

Desse modo a busca por modelos de previsão de preços adequados é um tópico frequente na literatura de energia e de métodos quantitativos. Pode se destacar os artigos de Behmeri e Manso (2013) e de Frey *et al.* (2009) que apresentam uma revisão de diversos métodos estatísticos utilizados para a previsão dos preços do petróleo bruto. Enquanto Worthington (2012), por sua vez, apresentou um estudo sobre pesquisas em finanças relacionadas com o petróleo bruto.

Esta pesquisa teve o propósito de estudar a adequação de modelos de previsão do tipo ARIMA, modelos autoregressivos integrados de médias móveis, para a obtenção de expectativas de preços do petróleo dos tipos Brent e WTI no curto prazo.

Este trabalho está estruturado em seis seções. Além desta introdução, na próxima seção é apresentado um breve resumo da revisão bibliográfica feita para elaboração deste trabalho. Enquanto a Seção 3, que trata da abordagem metodológica, descreve os modelos ARIMA, a amostra utilizada está descrita na Seção 4. Enquanto os resultados obtidos e os comentários finais são tratados, respectivamente, na Seção 5 e na Seção 6. Por fim estão listadas as referências bibliográficas utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – UM RESUMO

A procura de modelos adequados para previsão dos preços de *commodities* e, em particular, do petróleo é um tema recorrente na literatura de séries temporais. Assim como é usual o relato da dificuldade de se prever acuradamente os preços do petróleo e de outras *commodities*, dada a financialização e a alta volatilidade dos respectivos mercados. São muitos estudos e pesquisas apresentados na literatura que procuram estabelecer modelos de previsão mais adequados para preços de *commodities*. Nesses trabalhos os modelos do tipo ARIMA e da classe ARCH são os mais utilizados. A Tabela 1 adiante apresenta um sumário com trabalhos mais recentes sobre o tema, que foram objeto de um levantamento bibliográfico para elaboração deste trabalho.

A Tabela 1 mostra que a procura por modelos mais adequados e precisos para expectativas de preços de *commodities* é uma linha de pesquisa bem difundida. Os diversos tipos de modelos utilizados deixam claro que é uma busca complexa, do amplo e diversos rol, que aumenta quando se considera os fatores relevantes para a formação desses preços. Como mencionado, os modelos do tipo ARIMA e do tipo ARCH se mostram presentes e com maior frequência na literatura como candidatos a modelos mais adequados para a obtenção de expectativas de preços de *commodities*.

Tabela 1 – Resumo da Revisão Bibliográfica

Nº	Autor(es)	Data Publicação	Commodity	Amostra - Período	Método Utilizado
1	Assis *et al.*	2010	Cacau	Dados Mensais (01/1992 - 12/2006)	- Alisamento Exponencial - ARIMA - GARCH
2	Nadarajah *et al.*	2014	Cacau Petróleo Brent Petróleo WTI Ouro Prata	Dados Diários (12/03/1993 - 13/03/2013)	- GARCH
3	Klein e Walther	2016	Petróleo Brent Petróleo WTI	Dados Diários (01/01/1995 - 31/12/2014)	- MMGARCH
4	Wang *et al.*	2017	Petróleo WTI	Dados Mensais (01/1992 - 12/2015)	- Modelos Combinados
5	Funk	2018	Petróleo Brent	Dados Mensais (06/1982 - 11/2017)	- Modelos Combinados - ARMA - VAR

6	Herrera *et al.*	2018	Petróleo WTI	Dados Diários (02/01/2007 - 02/04/2015)	- Risk Metrics - GARCH - FIGARCH - MSGARCH - EGARCH - GJR-GARCH
7	Dbouk e Jamali	2018	Petróleo WTI	Dados Diários entre (02/01/1990 - 01/01/2010)	- Modelos Lineares - ARMA - ECM - ARDL - Redes Neurais

Este trabalho se diferencia dos aqui relacionados no que se refere ao período estudado, que se utiliza de dados pós crise do *subprime* deflagrada em 2008 que atingiu a economia mundial e, principalmente, os mercados de capitais e de créditos. A metodologia adotada para elaboração deste trabalho está descrita na Seção 3 a seguir.

3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

No estudo de uma série temporal dois pressupostos se fazem necessários na estimação dos modelos: a normalidade das informações em questão ou dos termos estocásticos relacionados nos modelos a serem estimados; e a estacionariedade das séries temporais de interesse envolvidas nos modelos a serem estimados. Assim, além de um resumo estatístico com medidas de posição e de dispersão, foram testadas as hipóteses de normalidade e de estacionariedade de todas as series temporais utilizadas neste trabalho. Muitas são as sugestões de testes estatísticos de hipóteses para verificação desses pressupostos. Para os testes de normalidade foi utilizado o teste de Jarque e Bera, que pode ser visto com maior detalhe em Jarque e Bera (1980) e Jarque e Bera (1987), enquanto para os testes de estacionariedade o teste utilizado foi o de raízes unitárias de Dickey e Fuller Aumentado, teste ADF, conforme a descrição disponível em Gujarati e Porter (2011).

A seguir são descritos os modelos estimados para o desenvolvimento deste trabalho, após os testes necessários para proceder a estimação de modelos ARIMA univariados.

3.1 MODELOS ARIMA UNIVARIADOS

Com a identificação da estacionariedade da série é possível procurar o melhor modelo. Desse modo as expectativas das variações dos preços do petróleo, dos tipos Brent e WTI, foram estimadas através de modelos univariados do tipo ARIMA -- autoregressivos integrados com média móvel. Os modelos ARIMA identificam os valores da variável dependente relacionados com seus próprios valores

passados tendo como base a ideia de “deixar os dados falarem por si mesmos”, como ressaltam Gujarati e Porter (2011). Esses modelos são ditos ateóricos, pois não consideram a teoria econômica tradicional.

Na descrição de um modelo ARIMA inicialmente deve-se definir a primeira parte, ou seja, um modelo autoregressivo de *p*-ésima ordem, designado como AR(*p*), que expressa a explicação do valor atual de Y_t através de uma proporção dos *p* valores anteriores de Y_t acrescido de um choque aleatório, e pode ser descrito pela formula (1) a seguir.

$$Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \cdots + \alpha_p Y_{t-p} + u_t \quad (1)$$

Enquanto na outra parte do modelo ARIMA, ou do modelo ARMA, corresponde ao modelo de média móvel da variável Y_t pode ser explicada por outro mecanismo, onde a variável Y_t é expressa por uma combinação dos *q* termos de erros, ou choques aleatórios, anteriores acrescidos de um termo constante. Assim um modelo de médias móveis de *q*-ésima ordem, ou MA(*q*), pode ser descrito pela expressão (2) mostrada a seguir.

$$Y_t = \mu + \beta_0 u_t + \beta_1 u_{t-1} + \cdots + \beta_q u_{t-q} \quad (2)$$

Um modelo ARMA (*p*, *q*) irá possuir *p* termos autorregressivos e *q* termos relacionados às médias móveis, e pode ser descrito, em sua forma mais simples um modelo ARMA (1, 1), através da equação (3) abaixo.

$$Y_t = \theta + \alpha_1 Y_{t-1} + \beta_0 u_t + \beta_1 u_{t-1} \quad (3)$$

Deve-se observar que estes modelos são adequados para séries temporais estacionarias. Se esse pressuposto for violado é necessário que se efetue a transformação da série temporal em uma série temporal estacionária o que é possível ao se diferenciar a série temporal. Nesse caso o modelo ARMA (*p*, *q*) após a variável de interesse Y_t ser diferenciada *d* vezes torna-se um modelo ARIMA, um modelo ARIMA (*p*, *d*, *q*) com *p* termos e termos de médias móveis.

Para a obtenção das características do modelo ou dos valores de *p* e *q*, por via de regra, se utiliza as funções de autocorrelação (FAC) e de autocorrelação parcial (FACP) da série temporal de interesse, como descrito em Enders (1995), em Murteira *et al.* (1993) e por Fava (2000). Para a identificação dos modelos para descrever uma serie temporal, em regra, verifica-se as características de uma FAC e de uma FACP, que podem ser sumarizadas da seguinte forma: declinante e truncada em *k* = *p*, truncada em

k = *q* e declinante, declinante e declinante, respectivamente, um processo AR(*p*), um processo MA(*q*) e processo ARMA(*p*, *q*). No entanto, essa identificação não é trivial e a dificuldade para se identificar o comportamento de uma série temporal, ou se verificar se essa segue características conhecidas, conduz a outro procedimento para que se faça a identificação dos graus de *p* e *q*. Nesse processo, ao invés de se estabelecer com precisão esses parâmetros, são elaborados modelos correspondentes a vários pares (*p*, *q*), de preferência uma quantidade de combinações grande, e escolhe-se o modelo utilizando-se algum critério de seleção ou de performance modelos econométricos e de séries temporais. Dentre esses critérios dois dos mais empregados são os critérios sugeridos por Akaike (*AIC*) e de Schwarz (*BIC*) cujas formulas estão descritas adiante nas expressões (5) e (6), respectivamente, onde $\hat{\sigma}_{\varepsilon}^{2}$ representa a estimativa da variância dos termos estocásticos ou a média da soma dos quadrados dos erros. Alguns dos critérios de performance de modelos de séries temporais estão descritos adiante nas expressões de (8) a (12). Esse procedimento é menos subjetivo do que se baseia na FAC e FAPC. E em algumas situações, como observado por Fava (2000), pode ser considerado um procedimento complementar ao procedimento descrito inicialmente para identificação dos modelos.

$$AIC = \ln \hat{\sigma}_{\varepsilon}^{2} + \frac{2(p+q)}{n} \tag{5}$$

$$BIC = \ln \hat{\sigma}_{\varepsilon}^{2} + \frac{(p+q)\ln(n)}{n} \tag{6}$$

Deve-se acrescentar que com amostras pequenas o *AIC* tende a mostrar resultados pouco confiáveis, e como alternativa pode-se utilizar o critério de Akaike corrigido (*AICc*) descrito, de acordo com Hyndman (2014), na equação (7) adiante, onde p corresponde ao número de parâmetros do modelo analisado.

$$AICc = AIC + \frac{2(p+1)(p+2)}{n-p} \tag{7}$$

Com os modelos obtidos foi feita uma comparação a partir de 5 critérios ou métricas de performance de modelos estocásticos, listados a seguir nas expressões de (8) a (12). Os quatro primeiros, listados abaixo, se relacionam com a semelhança entre as observações da amostra *in sample* e as

estimativas obtidas pelo modelo. O quinto critério utilizado, descrito pela equação (12), se refere ao somatório do quadrado da diferença entre o calculado e o existente no modelo do erro de previsão, para o período *out of sample* estabelecido, como descrito adiante, para se verificar o ajuste das estimativas obtidas pelos modelos ou a performance dos modelos de previsão.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N}(\hat{y}_t - y_t)^2}{N}} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^{N}|\hat{y}_t - y_t|}{N} \quad (9)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{N}\sum_{t=1}^{N}\left|\frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t}\right| \quad (10)$$

$$MPE = \frac{100\%}{N}\sum_{t=1}^{N}\frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \quad (11)$$

$$Erro^2 = \sum_{t=1}^{N}(y_t - \hat{y}_t) \quad (12)$$

Os dados utilizados neste trabalho estão descritos na Seção 4 a seguir.

4 DADOS UTILIZADOS – DESCRIÇÃO DA AMOSTRA

As informações utilizadas neste trabalho foram de dois tipos de petróleo bruto: o Brent e o West Texas Intermediate (WTI). Enquanto o petróleo do tipo Brent é negociado na London Stock Exchange (LSE), sendo referência de preço mais utilizado mundialmente, o WTI, por sua vez, é negociado na New York Mercantile Exchange (NYMEX) e é quase exclusivo do mercado norte-americano. Como observado por Funk (2018) o preço do WTI está associado, quase sempre, ao comportamento da economia norte-americana.

Os dados primários utilizados neste estudo são de cotações diárias do Brent e do WTI, em dólares norte-americanos por barril, e referem-se aos preços correntes, do período entre 1/01/2009 e 19/11/2018. Sendo dessa forma relativos à economia pós crise financeira deflagrada em 2008, a crise do subprime. As informações foram obtidas no *web-site* da U.S. Energy Information Association (EIA). A escolha do período ocorreu por ser após a eclosão da crise de 2008, que alterou as relações dos agentes econômicos e com isso as expectativas dos ativos financeiros, do petróleo e demais *commodities*. A partir das cotações diárias do petróleo bruto foram obtidas séries temporais semanais, que se referem as cotações do último dia de cada semana do período estudado. Com isso foi obtida uma maior homogeneidade entre os dados do WTI e Brent, uma vez que os dados diários possuem número de observações diferentes em vista da diferença de feriados ou de dias de negociações entre as bolsas NYSE e a LSE. A amostra foi dividida, com os dados a partir da data de 2/07/2017 até 19/11/2018, 15% do número total de informações da amostra, foi formada a parte do período *out of sample*. Enquanto isso, a outra parte da amostra *in sample* foi utilizada para estimação dos modelos de previsão.

Em geral, como observado nos trabalhos de Barcellos e Salles (2011) e de Salles e Campanati (2019), as séries temporais de ativos financeiros e do mercado de energia não apresentam normalidade. Além disso, cabe salientar, que com a financialização dos mercados de commodities, e em particular o do petróleo bruto, apresentam um comportamento similar ao de um ativo financeiro.

A Tabela 2, adiante, mostra o resumo estatístico das quatros séries temporais selecionadas para este estudo, com os resultados dos testes de Jarque-Bera para a normalidade e os resultados dos testes ADF para estacionariedade. Pelos valores da estatística de teste de Jarque-Bera, todas as séries violam o pressuposto da normalidade. Pode-se observar na Tabela 2 que nenhuma das séries temporais de preços pode ser considerada estacionária. O que significa que é necessário se diferenciar essas séries ou trabalhar com a séries de variação ou de retornos dos preços. As séries temporais de retornos comumente são estacionárias, tal como a de primeiras diferenças. O cálculo do retorno para um período *t* pode ser feito através da seguinte fórmula:

$$R_t = \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right) \qquad (13)$$

Na Tabela 2 pode-se observar que para todas as séries temporais de retornos dos preços a hipótese de estacionariedade não é rejeitada, uma vez que os valores p dos testes ADF são baixos, e assim se justifica a utilização dessas séries no decorrer deste estudo.

Tabela 2 - Resumo Estatístico das Séries de Preços e de Retornos Utilizadas

Estatística	Preço Brent Diário	Preço WTI Diário	Preço Brent Semanal	Preço WTI Semanal	Retorno Brent Diário	Retorno WTI Diário	Retorno Brent Semanal	Retorno WTI Semanal
Média	81,73	75,41	81,91	75,39	0,000057	0,000015	0,000275	0,000073
Mediana	80,86	80,93	81,28	80,58	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	128,14	113,39	128,08	113,39	0,11	0,13	0,16	0,24
Mínimo	26,01	26,19	28,80	29,39	-0,11	-0,13	-0,15	-0,16
Desvio Padrão	27,81	22,83	27,81	22,81	0,02	0,02	0,04	0,05
Assimetria	-0,15	-0,31	-0,15	-0,29	0,22	0,15	-0,27	0,01
Curtose	1,53	1,69	1,53	1,69	6,07	6,71	4,35	5,09
Jarque-Bera	200,11	185,16	41,16	37,62	849,17	1226,59	38,80	80,28
Teste ADF	-0,0349	-0,4196	-0,3301	-0,3457	-32,9765	-32,9313	-14,2482	-15,9282
(Valor P)	(0,51)	(0,48)	(0,51)	(0,51)	(0,01)	(0,01)	(0,01)	(0,01)

A seguir são apresentados os resultados obtidos com a utilização desses dados empregando-se a abordagem metodológica descrita na Seção 3.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Após observar que as FAC e FAPC das séries não seguem as características indicadas na teoria, se seguiu para o procedimento alternativo descrito na teoria. Na estimação dos modelos tipo ARIMA utilizou-se o *software* R, mais especificamente com o *package forecast*, apresentado por Hyndman e Khandakar (2007). Para cada série temporal foram analisados 44 modelos diferentes para a estimativa dos retornos dos preços, com o objetivo de se obter modelos onde todos os coeficientes, ou parâmetros, apresentaram significância estatística.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS – RETORNOS DIÁRIOS

A Tabela 3, adiante, mostra as estimativas dos parâmetros dos modelos ARIMA selecionados após a estimação dos modelos com as séries temporais dos retornos diários dos preços do petróleo bruto.

Para a série temporal dos retornos diários do petróleo do tipo Brent foram selecionados dois modelos, onde todos os parâmetros estimados apresentaram significância estatística: um modelo ARMA (2, 2) e um modelo ARMA (2, 3). Pode-se observar na Tabela 3 que os valores do AIC e AICc são próximos em ambos os modelos. Assim como pode-se observar que os valores para o modelo ARMA (2, 2) são menores nos critérios RMSE, MAE e MAPE. Além disso os valores dos critérios de seleção de modelos AIC e BIC são mínimos. Enquanto o critério $Erro^2$ (erro de previsão) expresso pela equação (12), apresentada anteriormente, e utilizado para dados *out of sam*ple é ligeiramente maior ou bem

próximo. Desse modo pode-se indicar como adequado para descrever a série de retornos diários do petróleo do tipo Brent o modelo ARMA (2, 2).

Tabela 3 – Resultados das Estimações dos Modelos de Previsão dos Preços Diários

Coeficientes	Brent – Dia Modelo 1 ARMA (2,2)	Brent - Dia Modelo 2 ARMA (2,3)	WTI - Dia Modelo 3 AR (1)	WTI - Dia Modelo 4 AR (2)	WTI - Dia Modelo 5 ARMA (2,2)	WTI - Dia Modelo 6 ARMA (2,3)
ar1	0,2716	0,2721	-0,0392	-0,0401	1,004	-0,5756
(se)	(0,0069)	0,0058	0,0217	0,0217	0,5605	0,0087
ar2	-0,9966	-0,9966	-	-0,0226	-0,6246	-0,9809
(se)	(0,0041)	0,0041	-	0,0217	0,4250	0,0076
ma1	-0,2744	-0,2532	-	-	-1,0416	0,5326
(se)	(0,01070	0,0225	-	-	0,5510	0,0225
ma2	0,9862	0,9806	-	-	0,6460	0,9717
(se)	(0,0093)	0,0106	-	-	0,4361	0,0124
ma3	-	0,0227	-	-	-	-0,0426
(se)	-	0,0218	-	-	-	0,0216
sigma2	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
RMSE	0,030	0,030	0,023	0,023	0,037	0,034
MAE	0,02145	0,02946	0,01638	0,01641	0,02612	0,02480
MPE	81,006	80,755	98,30	98,27	138,00	75,24
MAPE	451,29	451,45	103,7	105,6	471,3	451,6
AIC	-10424,36	-10423,43	-9938,54	-9937,62	-9935,24	-9942,36
AICc	-10424,34	-10423,39	-9938,53	-9937,60	-9935,21	-9942,36
BIC	-10396,06	-10389,46	-9927,22	-9920,64	-9906,95	-9908,41
Erro^2	0,3495	0,3494	0,10384	0,10383	0,10435	0,10646

No que se refere a série temporal dos retornos diários do petróleo bruto do tipo WTI foram selecionados quatro modelos nos quais pode-se aceitar a hipótese de significância estatística para todos os parâmetros estimados, respectivamente, os modelos AR (1), AR (2), ARMA (2, 2) e ARMA (2, 3). Pode-se observar na Tabela 3, acima, que dentre esses quatro modelos, o AR (1) e o ARMA (2, 3) possui os melhores valores para os critérios de seleção de modelos o AIC e o BIC, respectivamente. Apesar de mostrar o melhor resultado do critério de Akaike, o modelo ARMA (2, 3) apresenta os valores mais altos para quatro das cinco métricas de performance de modelos analisadas. Por outro lado, como mostrado na Tabela 3 adiante, os modelos autorregressivos apresentam os melhores resultados dentre as cinco métricas, com um empate no critério RMSE e com o menor valor em outros dois critérios, o MAE e o MAPE para o modelo AR (1) e o MPE e o *Erro*^{2} (erro de previsão), critério *out of sample*, os valore obtidos com os modelos AR(1) e AR(2) estão bem próximos. Observando-se os valores do critério BIC, o modelo AR (1) mostra ser o modelo a ser selecionado como mais adequado. Dadas estas considerações

o modelo AR (1) foi considerado o melhor modelo para a determinação das expectativas dos retornos diários do petróleo do tipo WTI.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS – RETORNOS SEMANAIS

A Tabela 4, adiante, apresenta os resultados da estimação dos modelos ARIMA com os dados dos retornos ou variações dos preços semanais do petróleo bruto dos tipos Brent e WTI.

Para a série temporal dos retornos semanais do petróleo do tipo Brent foram selecionados dois modelos com todos os seus parâmetros estatisticamente significantes. Os dois modelos selecionados foram o AR (1) e o ARMA (3, 3). Pode-se observar na Tabela 4 que os valores dos critérios de seleção de modelos AIC e BIC do modelo ARMA (3, 3) são maiores do que o obtido para o modelo AR (1). Além dos critérios de Akaike e Schwarz, o modelo ARMA (3, 3) mostra um desempenho ínfero ao AR (1) nas cinco métricas de performance dos modelos. Desse modo, considera-se o modelo AR (1) como o mais adequado para descrever a série de retornos semanais do petróleo tipo Brent e para se obter expectativas de retornos e, por conseguinte, dos preços do tipo Brent, que como mencionado anteriormente, corresponde a principal *benchmark* de preço do petróleo bruto no mercado internacional.

Tabela 4 – Resultados das Estimações dos Modelos de Previsão dos Preços Semanais

Coeficientes	Brent - Semanal Modelo 1 AR(1)	Brent - Semanal Modelo 2 ARMA(3,3)	WTI - Semanal Modelo 1 ARMA(2,2)
ar1	0,1074	-0,1737	-1,6772
(se)	(0,0475)	(0,0107)	(0,0330)
ar2	-0,9809	-0,1632	-0,9350
(se)	(0,0076)	(0,0095)	(0,0382)
ar3	-	-0,9883	-
(se)	-	(0,0088)	-
ma1	-	0,1880	0,17382
(se)	-	(0,0127)	(0,0201)
ma2	-	0,1917	0,9866
(se)	-	(0,0166)	(0,0269)
ma3	-	0,9979	-
(se)	-	(0,0245)	-
sigma2	0,0004	0,0017	0,0022
RMSE	0,042	0,061	0,10
MAE	0,031	0,046	0,079
MPE	94,03	173,04	283,17
MAPE	118,58	411,06	778,31
AIC	-1536,49	-1530,41	-1442,50
AICc	-1536,46	-1530,15	-1442,45
BIC	-1528,32	-1501,82	-1422,16
Erro^2	0,10	0,22	0,18

No que tange aos retornos semanais do petróleo tipo WTI, somente um dos 44 modelos estimados apresentou significância estatística em todos os parâmetros estimados, mostrando a dificuldade de se obter expectativas de preços dessa *commodity*. Desse modo, este foi o modelo escolhido como mais adequado melhor para descrever e prever a série temporal em questão.

6 COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho teve como propósito estudar a adequação de modelos clássicos de previsão do tipo ARIMA para obtenção de expectativas dos preços do petróleo bruto dos tipos Brent e WTI para o curto ou curtíssimo prazo. Esses modelos se mostraram viáveis para a formação das expectativas dos preços de petróleo dos dois principais *benchmarks* do preço do petróleo bruto negociado no mercado internacional selecionados para este trabalho, o Brent e o WTI. Deve-se observar que dessa forma este estudo contribui para a necessária discussão sobre formação das expectativas do preço do petróleo bruto, variável importante para a tomada de decisões de diversos agentes econômicos que participam, direta ou indiretamente, do mercado internacional do petróleo.

A revisão da literatura, apresentada aqui através de um resumo, mostrou uma diversidade de métodos econométricos utilizados, destacando a relevância e a complexidade do tema, ou seja, da busca por modelos de maior adequação e acurácia para previsão dos preços de *commodities*, em particular, dos preços do petróleo bruto, no curto ou curtíssimo prazo. Pode-se perceber, assim, a existência de uma complexidade ainda maior no que se refere determinação de expectativas para longo prazo, muitas vezes necessárias e muitas vezes incertas. Enquanto as pesquisas procuram estabelecer expectativas futuras de preços, o futuro se mostra incerto. Uma vez que são muitas as variáveis estocásticas que influem no comportamento desses preços, aumentando a dificuldade dos estudos relacionados.

Deve-se destacar que este estudo se diferencia dos demais apresentados na literatura econométrica e de economia de energia, por se utilizar de uma amostra com dados posteriores a deflagração da crise financeira do *subprime* em 2008. No entanto os resultados aqui apresentados devem ser vistos com ressalvas pois, embora a hipótese de estacionariedade não tenha sido rejeitada, os dados utilizados violam o pressuposto da normalidade.

Como sugestão para futuros trabalhos sobre o tema deve-se sugerir uma alternativa para o problema da não normalidade dos dados relativos aos preços do petróleo bruto. Assim como deve-se procurar utilizar modelos da família ARCH, ou de volatilidade estocástica, para tratar a volatilidade dos preços do petróleo bruto ou dos *benchmarks* aqui estudados. A utilização de modelos que levam em consideração a heteroscedasticidade dos preços de *commodities* é algo frequente na literatura, e que deve ser explorada no contexto dos pós crise financeira do *subprime*. Outros tópicos que podem ser

considerados, em trabalhos futuros sobre o tema aqui tratado, são a sazonalidade dos preços e a interação com as diversas variáveis macroeconômicas que o influenciam os preços do petróleo bruto.

REFERÊNCIAS

Assis, K., Amran, A., Remali, Y. (2010), Forecasting Cocoa Bean Prices Using Univariate Time Series Models, Journal of Arts, Science & Commerce, v. 1, n. 1, 71-80.

Barcellos, R. C., Salles, A. A. (2011), Aplicação de Modelos de Volatilidade em Operações de Hedge de Variância Mínima no Mercado de Índices de Ações Brasileiro. Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – SBPO 2011, Ubatuba (São Paulo).

Behmiri, N., Manso, J. (2013), Crude Oil Price Forecasting Techniques: A Comprehensive Review of Literature, SSRN Electronic Journal, 30-48.

Braginskii, O. (2009), Crude oil prices: History, forecast, and impact on economy, Russian Journal of General Chemistry, v. 79, n. 11, 2486-2498.

Dbouk, W., Jamali, I. (2018), Predicting daily oil prices: Linear and non-linear models. Research in International Business and Finance, v. 46, 149-165.

Fava, V. L. (2000), Metodologia de Box-Jenkins para Modelos Univariados, in Vasconcellos, M. A., Manual de Econometria, Editora Atlas.

Frey, G. (2009), Econometric Models for Oil Price Forecasting: A Critical Survey, CESifo Forum, v. 1, 29-44.

Funk, C. (2018), Forecasting the Real Price of Oil - Time-Variation and Forecast Combination, Energy Economics, v. 76, 288-302.

Gujarati, D., Porter, D. (2011), Econometria Básica, 5ª ed., Porto Alegre, AMGH Editora Ltda.

Herrera, A., Hu, L., Pastor, D. (2018), Forecasting Crude Oil Price Volatility, International Journal of Forecasting, v. 34, n. 4, 622-635.

Hyndman, R., Khandakar, Y. (2007), Automatic Time Series Forecasting: the forecast package for R, Working Paper 06/07, Department of Econometrics and Business Statistics, Monash University. http://www.buseco.monash.edu.au/depts/ebs/pubs/wpapers/ Working Paper 06/07

Hyndman, R. (2014), Forecasting: Principles & Practice. University of Western, Australia.

Jarque, C., Bera, A. (1980), Efficient Tests for Normality Homoscedasticity and Serial Independence of Regression Residuals, Econometric Letters, v. 6, 255–259.

Jarque, C., Bera, A. (1987), A Test for Normality of Observations and Regression Residuals, International Statistical Review, v. 55, 163–172.

Klein, T., Walther, T. (2016), Oil Price Volatility Forecast with Mixture Memory GARCH, Energy Economics, v. 58, 46-58.

Nadarajah, S., Afuecheta, E., Chan, S. (2014), GARCH Modeling of Five Popular Commodities, Empirical Economics, v. 48, n. 4, 1691-1712.

Salles, A. A., Campanati, A. M. (2019), The Relevance of Crude Oil Prices on Natural Gas Pricing Expectations: A Dynamic Model Based Empirical Study, International Journal of Energy Economics and Policy, Econjournals, v. 9, n. 5, 322-330.

Wang, Y., Liu, L., Wu, C. (2017), Forecasting the Real Prices of Crude Oil Using Forecast Combinations over Time-Varying Parameter Models, Energy Economics, v. 66, 337-348.

Worthington, A. (2012), A State-of-the-Art Review of Finance Research in Physical and Financial Trading Markets in Crude Oil, Crude Oil Exploration in the World, 203-220.