

idp

v.2 n.3

44

DEBATES EM ECONOMIA APLICADA

WORKING PAPER

**ESTUDO EMPÍRICO SOBRE MUDANÇA NO PADRÃO DE
VOLATILIDADE DA CURVA DE JUROS PREFIXADA
DURANTE A PANDEMIA DA COVID-19**

BRUNO ANTÔNIO VARGAS

ESTUDO EMPÍRICO SOBRE MUDANÇA NO PADRÃO DE VOLATILIDADE DA CURVA DE JUROS PREFIXADA DURANTE A PANDEMIA DA COVID-19

BRUNO ANTÔNIO VARGAS¹

¹ Bruno Antônio Vargas é Mestre em Economia pelo Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa (IDP). E-mail: brunoavargas@gmail.com.

IDP

O IDP é um centro de excelência no ensino, na pesquisa e na extensão nas áreas da Administração Pública, Direito e Economia. O Instituto tem como um de seus objetivos centrais a profusão e difusão do conhecimento de assuntos estratégicos nas áreas em que atua, constituindo-se um *think tank* independente que visa contribuir para as transformações sociais, políticas e econômicas do Brasil.

DIREÇÃO E COORDENAÇÃO

Diretor Geral

Francisco Schertel

Coordenador do Mestrado em Economia

José Luiz Rossi

CONSELHO EDITORIAL

Coordenação

Thiago Caldeira

Renan Holtermann

Milton Mendonça

Supervisão e Revisão

Luiz Augusto Magalhães

Mathias Tessmann

Apoio Técnico

Igor Silva

Projeto Gráfico e Diagramação

Juliana Vasconcelos

www.idp.edu.br

Revista Técnica voltada à divulgação de resultados preliminares de estudos e pesquisas aplicados em desenvolvimento por professores, pesquisadores e estudantes de pós-graduação com o objetivo de estimular a produção e a

DEBATES EM ECONOMIA APLICADA

discussão de conhecimentos técnicos relevantes na área de Economia.

Convidamos a comunidade acadêmica e profissional a enviar comentários e críticas aos autores, visando o aprimoramento dos trabalhos para futura publicação. Por seu propósito se concentrar na recepção de comentários e críticas, a Revista Debates em Economia Aplicada não possui ISSN e não fere o ineditismo dos trabalhos divulgados.

As publicações da Revista estão disponíveis para acesso e download gratuito no formato PDF. Acesse: www.idp.edu.br

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do IDP.

Qualquer citação aos trabalhos da Série só é permitida mediante autorização expressa do(s) autor(es).

SUMÁRIO

1. Introdução	6
2. Construção da Curva de Juros Pré – ETTJ Pré	9
3. Volatilidade	11
4. Procedimentos Metodológicos	14
5. Identificação (Análise e Discussão)	16
5.1 Identificação de Efeitos ARCH - Retornos e Retornos ao Quadrado	21
5.1.1 Resultado FAC e FACP dos Retornos – Período Total	23
5.1.2 Resultado FAC e FACP dos Retornos ao Quadrado - Período Total	24
5.1.3 Teste Ljung Box – Retornos e Retornos ao Quadrado das taxas	25
5.2 Identificação de Efeitos ARCH – Resíduos e Resíduos ao Quadrado	26
5.2.1 Resultado FAC e FACP dos Resíduos	29
5.2.2 Resultado FAC e FACP dos Resíduos ao Quadrado	30
5.2.3 Teste Ljung Box – Resíduos e Resíduos ao Quadrado	31
6. Estimação do Modelo	32
7. Considerações Finais / Conclusão	37
8. Referências Bibliográficas	39

RESUMO: É comum séries temporais apresentarem fenômenos de aglomeração de volatilidade, que são períodos que intercalam altas e baixas em seus valores, sendo fundamental conhecer tais comportamentos, principalmente em épocas de incertezas como a vivida pela pandemia da COVID-19. Sendo assim, o presente trabalho investiga, de forma comparativa entre períodos, a presença de heterocedasticidade condicional auto-regressiva na série de retorno das taxas de juros pré-fixadas (ETTJ Pré) de curto, médio e longo prazo, usando na construção da curva de juros o modelo paramétrico/estatístico proposto por Nelson e Siegel (1987) e estendido por Svensson (1994). Os períodos de análise foram segregados entre Período Total (janeiro de 2010 a dezembro de 2021), Período Pré-Pandemia (janeiro de 2010 a fevereiro de 2020) e Período Pandemia da COVID-19 (março de 2020 a dezembro de 2021), usando em sua análise um estudo empírico com modelos da classe ARCH. Os resultados finais demonstrados pelos testes de significância e critérios de informações, demonstraram haver heterocedasticidade durante o período analisado e também a mudança da volatilidade durante o período da COVID-19, apresentando resultados altamente significantes pelas regressões realizadas.

PALAVRAS-CHAVE: Volatilidade; Taxa de Juros; Pandemia; Modelos ARCH.

ABSTRACT: It is common for time series to present volatility clustering phenomena, which are periods that alternate highs and lows in their values, and understanding such behavior is especially important in times of uncertainty like the one we experienced during the COVID-19 pandemic. The present work investigates the presence of autoregressive conditional heteroscedasticity in a comparative way between periods in the return series of short, medium, and long-term fixed interest rates (ETTJ Pre), using in the construction of the curve of interest the parametric/statistical model proposed by Nelson and Siegel (1987) and extended by Svensson (1994). The analysis periods were segregated between the Total Period (January 2010 to December 2021), the Pre-Pandemic Period (January 2010 to February 2020), and the COVID-19 Pandemic Period (March 2020 to December 2021), using an empirical study with models of the ARCH class in its analysis. The highly significant results demonstrated by the significance tests and information criteria showed heteroscedasticity during the analyzed period and volatility change during the COVID-19 period.

KEYWORDS: Volatility; Interest Rate; Pandemic; ARCH models.

CLASSIFICAÇÃO JEL: G17; G32

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a crescente complexidade do mundo dos negócios trouxe ainda mais desafios a serem administrados pelas empresas. Essa complexidade demanda não só novos métodos de gestão financeira, mas um conjunto de atenção especial aos riscos incorridos por essas instituições, muitos deles relacionados ao risco financeiro decorrentes da volatilidade nas taxas de juros.

Ao se tratar de risco, a volatilidade se torna sinônimo de seu significado e é uma forma de avaliação para ativos e séries financeiras mais conhecida e importante do mundo das finanças. O indicador da volatilidade permite que seja avaliado o risco de um ativo, e com base na sua análise se tome a melhor decisão possível na alocação dos investimentos. Entretanto, a volatilidade possui diversas características que devem ser avaliadas de forma detalhada, não somente de forma descritiva, mas também para a construção de modelos.

A complexidade que envolve o assunto relacionado a taxa de juros na gestão financeira e de riscos se deve principalmente em relação às incertezas na previsibilidade e na volatilidade dessas taxas pelo mercado, além da relação com inúmeras variáveis econômico-financeiro que podem impactar ou não o investimento/proteção ao longo do período, principalmente em períodos desconhecidos e de incertezas, como o demonstrado pela pandemia da COVID-19.

O surto da COVID-19 trouxe mudanças marcantes em nossas vidas, há alguns meses a vida cotidiana de hoje seria impensável para a maioria, não sendo diferente para gestores, políticos, economistas e acadêmicos que em sua grande maioria concentram suas projeções nos riscos empresariais tradicionais (Henriques e Vasconcelos, 2020).

Ao se adentrar no tema de volatilidade das taxas de juros, conhecer a Estrutura a Termo da Taxa de Juros Pré-Fixada (ETTJ PRÉ) torna-se um processo fundamental, afinal as curvas das taxas de juros pré-fixadas podem sinalizar expectativas de crescimento/estagnação econômicas, relacionadas ou não a outros indicadores econômico-financeiros.

A ETTJ foi definida por Fabozzi (2006) et al, como um conceito central da teoria financeira e econômica usado para precificar qualquer conjunto de fluxos de caixa. Ela é representada por um conjunto de pontos no espaço “taxa de juros” versus “prazo”, onde cada ponto $(t, r(t))$ corresponde a uma taxa de juros $r(t)$, associada a um prazo (ou maturidade) t , taxa essa obtida com base em algum título negociado no mercado.

Ainda em relação a ETTJ PRÉ, que será usada como a base de dados para a extração das taxas de juros diária de curto prazo (2 anos), médio prazo (5 anos) e longo prazo (10 anos), a pesquisa considerou para a construção das curvas de juros, o modelo paramétrico/estatístico proposto por Nelson e Siegel (1987) e estendido por Svensson (1994), modelo este defendido e usado por inúmeras instituições financeiras, comunidade acadêmica, além de órgãos como a ANBIMA, que informa em seu modelo o seguinte:

Esse modelo é amplamente utilizado por diversos bancos centrais por tratar-se de uma forma funcional simples que descreve toda a estrutura temporal das taxas de juros com um pequeno número de parâmetros. O formato da equação permite uma estrutura suave e flexível que acomoda os diversos formatos de ETTJ. (ANBIMA, 2010, p. 4).

Com o surgimento da pandemia da COVID-19, os sistemas macroeconômicos globais sofreram mudanças estruturais e significativas (Laing, 2020). Diversos autores trouxeram em seus estudos consequências dessa pandemia, como alterações de preços em várias classes de ativos do mercado financeiro, como no de mercado de ações internacional (Ashraf, 2020b e Goodell, 2020), no de ativos alternativos das criptomoedas (Bakas e Triantafyllou 2020), nos mercados de commodities (Liu, 2020; Mensiet, 2020) e mercados de dívida (Arellano et al, 2020; Sène et al, 2021).

No Brasil, os autores Liziér e Palma (2021) e Luz (2021), trouxeram em seus estudos os impactos da pandemia da COVID-19 sobre a volatilidade do IBOVESPA com uma análise exploratório a partir de modelos da família ARCH. Os autores afirmam que a pandemia da

COVID-19 levou o aumento na incerteza e no nível de risco nos mercados financeiro e na economia global, com persistências na volatilidade durante este período.

Várias medidas foram impostas pelos governos mundiais na tentativa de acharem soluções, sejam elas paliativas ou não, que pudessem amenizar os impactos causados pela pandemia. Foram adotadas medidas de contenção, distanciamento social, fechamento do comércio, voos quase paralisados em sua totalidade, acarretando impactos diretos nas políticas de governo, principalmente fiscal e monetária.

No fiscal, como exemplo, os gastos do governo com foco nos auxílios emergências foram largamente implementados causando sérios impactos, como ocorrido no resultado primário do governo, onde o indicador vinha mantendo um percentual estável de aproximadamente 1% negativo em relação ao PIB, e em menos de três meses, no início da pandemia, já alcançava quase seus 10% negativos.

Na política monetária não foi diferente. No Brasil as taxas de juros básica da econômica (SELIC), que vinham numa tendência de queda, foram a patamares jamais vistos, alcançando em agosto de 2020 a marca dos 2% a.a. (dados históricos do BCB). Além disso, entre outros exemplos, numa resposta rápida do Banco Central, houve também a redução da cobrança de compulsórios aos bancos, sendo aplicada já em março de 2020, início da COVID-19 no Brasil, uma política que reduzia a cobrança obrigatória de 25% para 17%, ação essa que caracteriza uma forma clara de injetar mais liquidez ao mercado financeiro brasileiro.

Neste contexto, entender a volatilidade das taxas de juros contribui significativamente para melhorar a compreensão do momento vivido durante a pandemia. Especificamente sobre a volatilidade, corrobora com estudos anteriores, citando que, durante anos, a volatilidade tem sido foco de pesquisas envolvendo dados econômicos e séries temporais econométricas, contribuindo para a compreensão de questões em finanças econômicas, especialmente no que se refere à mensuração de momentos de incertezas (Oliveira e Ázara, 2007).

Ao remeter o estudo da volatilidade para as taxas diárias de juros, o objetivo do trabalho procura modelar o comportamento da volatilidade dessas taxas durante o período da pandemia (março de 2020 a dezembro de 2021), comparando esses movimentos com todo o período anterior (janeiro de 2010 a fevereiro de 2020), buscando comprovar também se houve mudanças na volatilidade nas taxas durante a pandemia, verificando a presença de heterocedasticidade condicional com o uso de modelos da família ARCH para auxílio na modelagem.

Para tanto, na padronização da extração das taxas de juros diárias e a realização dos cálculos da volatilidade durante o período analisado, foram extraídos da ETTJ PRÉ apenas as taxas de curto, médio e longo prazo, definidos neste trabalho da seguinte forma: Curto Prazo igual a dois anos, Médio Prazo igual a cinco anos e Longo Prazo igual a dez anos.

O estudo está organizado da seguinte forma: Na seção a seguir é demonstração a construção da Curva de Juros Pré (ETTJ PRÉ), item essencial para a análise da volatilidade das taxas de juros diária. Na terceira seção inicia-se uma análise sobre a volatilidade, prosseguindo para as seções seguintes sobre os procedimentos metodológicos, onde, na quinta seção, realiza-se a identificação de efeitos heterocedásticos e a análise e discussão sobre os dados apresentados pelas taxas de juros; A sexta seção apresenta as estimações e escolha para o melhor modelo, apresentando na seção final as considerações finais e conclusões do trabalho.

2. CONSTRUÇÃO DA CURVA DE JUROS PRÉ (ETTJ PRÉ)

Neste trabalho, a elaboração da Curva de Juros Pré (ETTJ PRÉ), para taxas à vista, usou como parâmetro a metodologia disponibilizada pela ANBIMA (abril/2010), que segue o modelo paramétrico/estatístico proposto por Nelson e Siegel (1987) e estendido por Svensson (1994), onde a taxa de juros na data “ t ” para o prazo τ , em anos (base dias úteis/252), é dada pela seguinte equação:

$$r_t(\tau) = \beta_{1t} + \beta_{2t}\left(\frac{1-e^{-\lambda_{1t}\tau}}{\lambda_{1t}\tau}\right) + \beta_{3t}\left(\frac{1-e^{-\lambda_{1t}\tau}}{\lambda_{1t}\tau} - e^{-\lambda_{1t}\tau}\right) + \beta_{4t}\left(\frac{1-e^{-\lambda_{2t}\tau}}{\lambda_{2t}\tau} - e^{-\lambda_{2t}\tau}\right) \quad (1)$$

Onde os fatores da estrutura possuem a seguinte interpretação: β_{1t} = fator de nível (ou longo prazo); β_{2t} = fator de inclinação (ou curto prazo); β_{3t} e β_{4t} = fator de curvatura (ou médio prazo). Os parâmetros λ_{1t} e λ_{2t} caracterizam o decaimento, determinando onde as cargas de β_{3t} e β_{4t} atingem seu máximo. E para que façam sentido econômico, os parâmetros devem satisfazer a seguinte restrição:

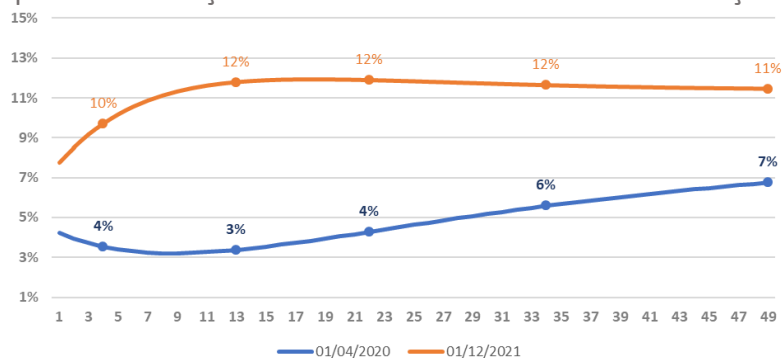
$$(\lambda_{1t}) > 0; (\lambda_{2t}) > 0; (\beta_{1t}) > 0; (\beta_{1t}) + (\beta_{2t}) > 0 \quad (2)$$

Os parâmetros para a construção da curva são disponibilizados diretamente pela ANBIMA em seu portal https://www.anbima.com.br/pt_br/informar/curvas-de-juros-fechamento.htm, e como forma de exemplificar a construção da curva, foram extraídos, diretamente do site, os dados dos betas e lambdas, em momentos distintos, demonstrando graficamente o comportamento da curva, conforme **Tabela 1** e **Gráfico 1** a seguir:

Tabela 1 – Betas e Lambdas ANBIMA

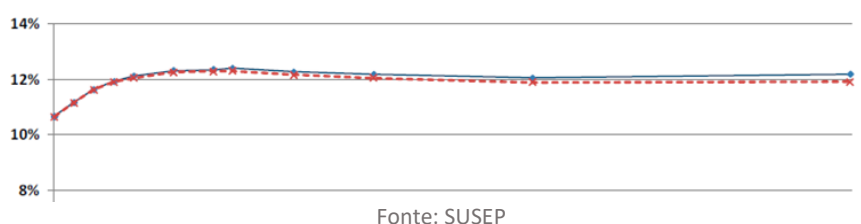
Data	Beta1	Beta2	Beta3	Beta4	Lambda1	Lambda2
01/04/2020	0,115251228	-0,072838844	-0,132758669	-0,087131356	1,228927258	0,047569107
01/12/2021	0,115919088	-0,038917013	0,101522446	-0,040636242	1,719361875	0,815403021

Gráfico 1 – Exemplo de Construção de Curva – Dados ANBIMA – Elaboração própria



Vale destacar que a ETTJ deve ser construída a partir de títulos isentos de risco de crédito e liquidez, podendo ser gerados a partir de títulos de renda fixa emitidos pelo governo (LTN, NTN-F, NTN-B, NTN-C) ou instrumentos financeiros derivativos, como os Futuros de DI1, sendo que os parâmetros ora aqui utilizados seguem os dados da ANBIMA, gerados a partir dos títulos emitidos pelo Governo Brasileiro, que conforme estudo elaborado pela SUSEP, demonstrado no **Gráfico 2** abaixo, comprovam que as diferenças apresentadas entre esses dois tipos de ativos são pequenas em relação a elaboração das curvas.

Gráfico 2 – ETTJ Pré baseada em títulos públicos e ETTJ baseado em derivativos com as cotações na data de 30/12/2010.



3. VOLATILIDADE

A volatilidade é certamente um dos mais importantes instrumentos analisados pelos economistas e financistas de mercado, sejam eles na forma de avaliação de ativos e series financeiras quanto para a medição do risco envolvido nos negócios corporativos. A avaliação

e análise da volatilidade permite uma melhor visão e decisão inclusive para a alocação dos investimentos e esboço estratégico da alta administração, onde pesquisas relacionadas a este assunto tem ajudado e contribuído para o entendimento de questões financeiras econômicas, sobretudo ao que se refere à mensuração de incertezas, trazendo informações de que, quanto maior o grau de incertezas frente às crises, ou fatores exógenos, como o vivido pela pandemia da COVID-19, maiores serão as variações nos preços e na variação dos retornos (Oliveira e Ázara, 2007).

Dessa forma, a volatilidade possui diversas características que necessitam de avaliação detalhada, não somente de forma descritiva, mas também para a construção de modelos, onde séries temporais financeiras, bem como preços de commodities, ações, opções, taxas de câmbio, inflação e taxas de juros, frequentemente apresentam o fenômeno de aglomeração por volatilidade, também conhecido como *volatility cluster* (clusters de volatilidade), ou seja, períodos intercalando altas e baixas oscilações de seus valores, onde fontes de notícias e/ou outros eventos econômicos exógenos, como crises podem acarretar um impacto no padrão da série temporal (Franses, 1998).

Outras características importantes sobre a volatilidade é que ela não é observável diretamente, que evolui de maneira contínua, de modo que saltos não são comuns, e costumam variar em intervalos fixos, significando que a volatilidade é estacionária, normalmente ao contrário das series temporais financeiras, que em sua forma de nível, são consideradas passeio aleatório, ou seja, não estacionária, sendo que, por outro lado, na forma de primeira diferença, são em geral estacionária (Gujarati e Porter, 2011).

Considerando assim a metodologia aplicada por Gujarati e Porter (2011), onde sugere que em vez de modelar os níveis da série temporal financeira, como exemplo as próprias séries das taxas de juros, modelar então a sua primeira diferença, onde tais diferenças frequentemente exibem grandes “oscilação” ou volatilidade, sugerindo que a variância da série temporal financeira muda ao longo do tempo.

Além disso, os estudos realizados indicam que para a realização de modelos estatísticos e/ou econométricos que incorpore a possibilidade da variação do termo de erro não ser constante (volatilidade) e possam capturar a evolução da variação, designa-se por modelos heterocedásticos (Furriel, 2011).

Sendo assim, bons modelos que trabalham a estrutura da heterocedasticidade condicional deveriam incorporar estas características em sua estrutura, pois contemplariam informações valiosas que não poderiam ser desperdiçadas, tornando o modelo capaz de detectar satisfatoriamente as mudanças de volatilidade ao longo do tempo (Costa, 2019).

Em 1982, sendo um dos primeiros estudos sobre modelagem da volatilidade, Robert F. Engle publicou um estudo das taxas de inflação do Reino Unido, mensurando sua volatilidade variável no tempo, conhecido como o modelo de Heterocedasticidade Condicional Autorregressiva (ARCH). O modelo é baseado na noção de um modo natural de atualizar a previsão de variação, calculando a sua média com a “perturbação” (termo de erro) ao quadrado mais recente, ou seja, é o desvio ao quadrado da taxa de retorno da sua média (Bodie, Kane e Marcus, 2010). Podemos dizer também que o modelo demonstra a variância condicional como sendo uma defasagem distribuída do quadrado dos retornos passados, tendo como ideia básica que o retorno da série é não-correlacionado serialmente, mas a volatilidade (variância condicional) depende de retornos passados por meio de uma função quadrática (Oliveira e Ázara, 2007).

Nesta linha, de forma a identificar e comprovar a presença de clusters de volatilidade e a demonstração de que em momentos de incerteza no mercado, como o da pandemia da COVID-19, trazem maiores variações nos preços e retornos, serão modelados as suas primeiras diferenças, que frequentemente demonstram grandes oscilações/volatilidades, utilizando como ferramenta estatística os modelos da família ARCH (heterocedasticidade condicional autorregressiva), onde, como o próprio nome sugere, que a heterocedasticidade ou variância desigual pode ter uma estrutura autorregressiva na qual a heterocedasticidade

observada ao longo de diferentes períodos pode ser autocorrelacionada (Gujarati e Porter, 2011).

Define-se então um modelo ARCH(p) como:

$$X_t = \sigma_t \varepsilon_t, \text{ com } \sigma_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 X_{t-1}^2 + \dots + \alpha_q X_{t-q}^2 \quad (3)$$

Onde X_t é o retorno, σ_t é uma sequência não negativa de variáveis aleatórias, ε_t (Erro) é uma sequência de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (iid) de valor médio nulo e variância unitária e os parâmetros α_i têm de satisfazer um conjunto de condições ($\alpha_0 > 0$ e $\alpha_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, q$) de forma a assegurar que a variância não condicionada é finita. Quando σ_t é constante ao longo do tempo então X_t é um ruído branco.

Na mesma linha, mas envolvendo outras variáveis, Bollerslev (1986) propôs uma extensão do modelo ARCH(q) conhecida como modelo de heterocedasticidade condicional autorregressiva generalizado (GARCH). Nele, a diferença para um modelo ARCH(p) é que, ao propor que a variância condicional de “u” no período t depende não apenas do termo de erro (ε_t) quadrático no período de tempo anterior como em ARCH(1), mas também de sua variância condicional no período de tempo anterior. Esse modelo pode ser generalizado para um modelo GARCH(p, q) no qual há “p” termos defasados do termo de erro quadrático e “q” termos das variâncias condicionais defasadas (Gujarati e Porter, 2011), descrito conforme abaixo.

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 X_{t-1}^2 + \dots + \alpha_q X_{t-q}^2 + \alpha_1 u_{t-1}^2 + \dots + \alpha_q u_{t-q}^2 \quad (4)$$

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Utilizou-se neste trabalho as taxas diárias à vista de curto, médio e longo prazo, extraídas conforme elaboração própria da Curva Pré, seguindo os parâmetros da metodologia disponibilizada pela ANBIMA (abril/2010), que segue o modelo paramétrico/estatístico proposto por Nelson e Siegel (1987) e estendido por Svensson (1994), observados durante o

período de janeiro de 2010 a dezembro de 2021, sendo a data inicial escolhida arbitrariamente e não possuindo nenhum significado especial.

Para os dados referente ao período da “pandemia”, será aqui tratado dentro do intervalo intertemporal de março/2020 a dezembro/2021, com um total de 459 observações. Para o chamado período “pré-pandemia”, abrange então o intervalo de janeiro/2010 a fevereiro/2020, com 2.551 observações. Logo, ao citar todo o período da análise temporal do estudo, engloba assim consequentemente os dois períodos juntos, perfazendo o total de 3.011 observações.

As etapas a seguir da análise empírica do trabalho apresentam uma verificação visual sobre o comportamento da série temporal das taxas de juros e suas estatísticas descritivas, a fim de verificar fatores como estacionariedade e normalidade na distribuição, não exatamente nesta ordem, levando em consideração todo período em análise, com dados de 2010 a 2021, tendo como destaque o Período da Pandemia para a identificação e estudo da volatilidade.

Em seguida, busca-se verificar a presença de heterocedasticidade condicional autoregressiva na série de retorno das taxas. Para esta verificação existem vários testes que podem ser aplicados, como o teste de Lagrange Multipliers (LM), testes de Portmanteau Q e o teste de Ljung-Box, onde serão utilizados nesta pesquisa como métodos para o aceite ou não da hipótese deste trabalho, aplicando também o método iterativo de Box-Jenkins (BJ) para a identificação/escolha de processos que melhor se adequam ao estudo, consistindo, conforme descrito por Gujarati e Porter (2011) et al, em quatro etapas: Identificação, Estimação, Verificação do diagnóstico e Previsão.

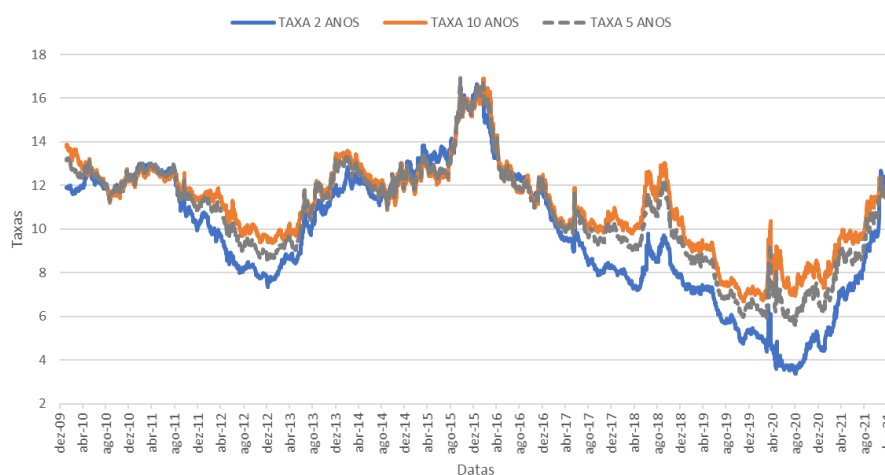
Para auxílio nos cálculos e na identificação de informações, foi usado o software econométrico RSTUDIO, com o uso de bibliotecas específicas para cálculos de regressões da família ARCH denominada “fGarch”, onde os resultados serão demonstrados juntamente aos testes principais de identificação e comprovação da hipótese do trabalho.

5. IDENTIFICAÇÃO (ANÁLISE E DISCUSSÃO)

Seguindo uma sequência de análises e demonstrações dos dados apresentados, conforme rito observado em outros trabalhos acadêmicos, como o de Pindyck e Rubinfeld (2004) et al, o presente trabalho inicia-se pela demonstração do comportamento da série temporal das taxas diárias de juros, observando assim o formato e comportamento da oscilação das taxas, onde inicialmente já se observa uma notável variação nas taxas em análise.

$$Y_t = \text{Taxas de Juros} \quad (5)$$

Gráfico 3 - Série temporal das taxas diárias dos juros de curto, médio e longo prazo - Período Total – janeiro/2010 a dezembro/2021.



De forma complementar, a Tabela 2 a seguir demonstra a estatística descritiva dos dados com o intuito de evidenciar o comportamento das taxas de juros em períodos distintos.

Tabela 2: Estatística Descritiva das taxas

	Curto Prazo - 2 anos			Médio Prazo - 5 anos			Longo Prazo - 10 anos		
	Período TOTAL	Período PRÉ- PANDEMIA	Período PANDEMIA	Período TOTAL	Período PRÉ- PANDEMIA	Período PANDEMIA	Período TOTAL	Período PRÉ- PANDEMIA	Período PANDEMIA
Observações	3011	2551	460	3011	2551	460	3011	2551	460
Média	9,83	10,43	6,47	10,64	11,10	8,10	11,05	11,41	9,06
Mediana	10,03	10,93	5,41	11,03	11,46	7,43	11,39	11,69	8,63
Mínimo	3,37	4,76	3,37	5,60	5,98	5,60	6,67	6,67	6,95
Máximo	16,81	16,81	12,67	16,93	16,93	12,42	16,89	16,89	12,37
1º Qua	7,82	8,27	4,33	9,13	9,58	6,63	9,80	10,20	7,82
3º Qua	12,21	12,38	7,91	12,36	12,50	9,03	12,39	12,49	9,87
Variância	8,74	6,70	6,82	5,37	4,41	3,13	4,07	3,59	2,07
Desvio Padrão	2,95	2,58	2,61	2,31	2,10	1,77	2,01	1,89	1,43
Assimetria	-0,22	-0,13	0,73	-0,13	-0,16	0,59	-0,01	-0,08	0,50
Curtose	2,35	2,42	2,40	2,74	3,26	2,22	3,08	3,66	2,11
Jarque-Bera	77,59	43,04	48,87	17,85	18,51	38551,00	0,78	49,29	34,65

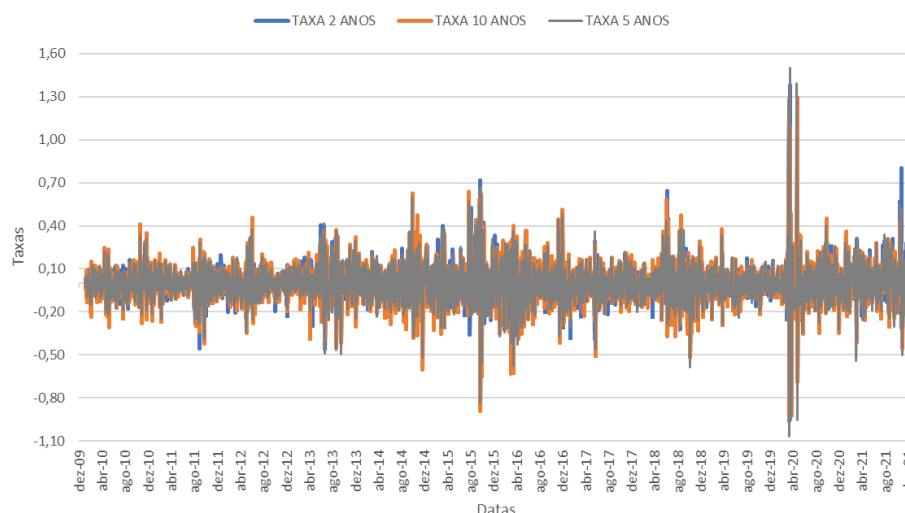
Observa-se, pelo gráfico e tabela acima, padrões de não estacionariedade, e apesar de ser o ponto inicial da análise, as características de uma série de taxa de juros não são úteis o suficiente para trabalharmos com a identificação da volatilidade, para isso, autores como Pindyck e Rubinfeld (2004) sugerem que seja realizada a retirada da primeira diferença da série, estabilizando-a e a transformando em estacionária.

Esse movimento é normalmente conhecido como retorno e por suposto, com base nesses dados, permite-se o cálculo de uma medida de volatilidade, caso necessário.

$$Y_t = \text{Taxas de Juros} \quad (4)$$

$$X_t = (Y_t - Y_{t-1}) \quad \text{-----} \quad \text{Retorno} \quad (6)$$

Gráfico 4: Retorno das taxas diárias - Período Total – janeiro/2010 a dezembro/2021.



A **Tabela 3** demonstra a Estatística Descritiva com as informações que originou o gráfico para os retornos, já identificando, numa primeira análise, a característica de existência de média zero ou próxima de zero.

Tabela 3: Estatística Descritiva dos Retornos.

	Curto Prazo - 2 anos			Médio Prazo - 5 anos			Longo Prazo - 10 anos		
	Período TOTAL	Período PRÉ- PANDEMIA	Período PANDEMIA	Período TOTAL	Período PRÉ- PANDEMIA	Período PANDEMIA	Período TOTAL	Período PRÉ- PANDEMIA	Período PANDEMIA
Observações	3011	2551	460	3011	2551	460	3011	2551	460
Média	-0,00079	-0,0035	0,0140	-0,0013	-0,0033	0,0096	-0,0015	-0,0032	0,0083
Mediana	0,0000	-0,0100	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Mínimo	-0,9600	-0,8300	-0,9600	-1,0700	-0,8300	-1,0700	-0,9400	-0,8900	-0,9400
Máximo	1,3800	0,7200	1,3800	1,5000	0,6700	1,5000	1,3000	0,6400	1,3000
1º Qua	-0,0600	-0,0600	-0,0700	-0,0700	-0,0650	-0,0900	-0,0700	-0,0700	-0,0800
3º Qua	0,0500	0,0500	0,0900	0,0600	0,0600	0,1000	0,0600	0,0600	0,0825
Variância	0,0133	0,0101	0,0307	0,0181	0,0138	0,0420	0,0188	0,0157	0,0357
Desvio Padrão	0,1154	0,1007	0,1751	0,1348	0,1178	0,2049	0,1370	0,1253	0,1889
Assimetria	1,1040	0,2985	1,5860	0,8477	0,0631	1,4098	0,4326	0,0018	0,9925
Curtose	21,2296	9,5925	19,8731	19,5492	7,1913	1,9378	13,1817	7,0782	16,0922
Jarque-Bera	42,304	4,658	5,650	34,721	1,868	5,293	13,100	1,768	3,361

Observa-se pelo gráfico dos retornos diários que os períodos analisados sofrem variações em relação a outros períodos, tanto nas taxas de curto e médio prazo quanto de longo prazo, mas que em especial, o período que envolve a pandemia da Covid-19, sofre uma variação consideravelmente maior que o período pré-pandemia, principalmente para as taxas de curto prazo, apresentando em seus dados um desvio padrão consideravelmente superior.

Dando sequência e com base nas informações dos retornos, levando em consideração a variação das taxas ao longo do tempo, e não apenas a demonstração de um valor único para determinado conjunto de dados, calcula-se uma medida de volatilidade, aplicando então a elevação ao quadrado nos retornos das taxas de juros de curto, médio e longo prazo, com a aplicação da fórmula abaixo (Gujarati e Porter, 2011).

$$Y_t = \text{Taxas de Juros} \quad (4)$$

$$X_t^2 = (Y_t - Y_{t-1})^2 \quad \text{----- Retornos ao Quadrado} \quad (7)$$

Sendo uma quantidade quadrática, seu valor será alto quando houver grandes variações nos retornos dos ativos financeiros e seu valor será comparativamente pequeno quando houver variações modestas nos retornos dos ativos financeiros, evidenciando assim, conforme gráfico a seguir, períodos que ocorreram maiores oscilações nas taxas de juros.

Gráfico 5: Retornos ao Quadrado - Período Total – janeiro/2010 a dezembro/2021

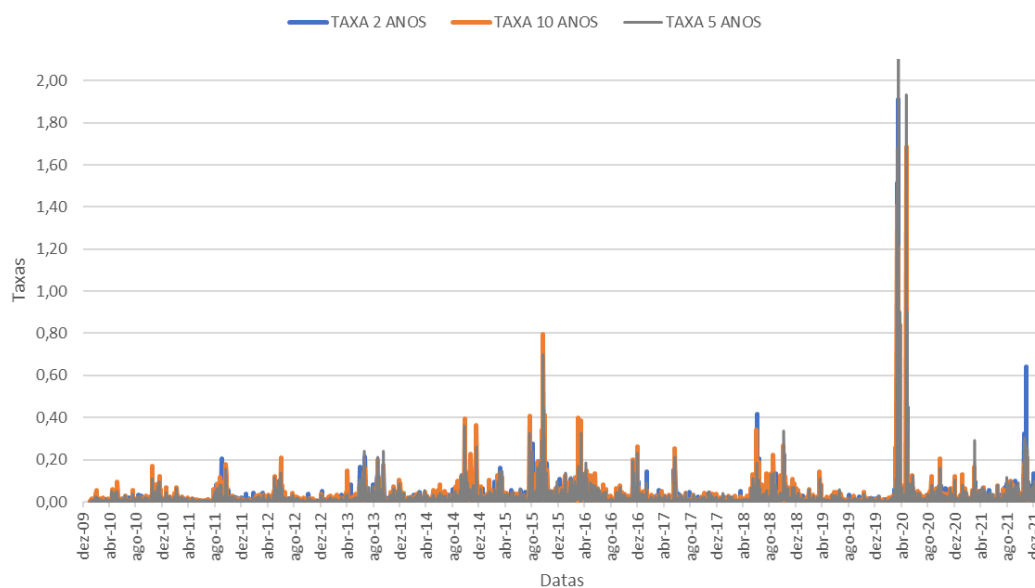


Tabela 4: Estatística Descritiva dos Retornos ao Quadrado.

	Curto Prazo - 2 anos			Médio Prazo - 5 anos			Longo Prazo - 10 anos		
	Período TOTAL	Período PRÉ- PANDEMIA	Período PANDEMIA	Período TOTAL	Período PRÉ- PANDEMIA	Período PANDEMIA	Período TOTAL	Período PRÉ- PANDEMIA	Período PANDEMIA
Observações	3011	2551	460	3011	2551	460	3011	2551	460
Média	0,0133	0,0102	0,0308	0,0181	0,0139	0,0420	0,0188	0,0157	0,0357
Mediana	0,0025	0,0025	0,0064	0,0049	0,0036	0,0091	0,0049	0,0036	0,0064
Mínimo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Máximo	1,9044	0,6889	1,9044	2,2500	0,6889	2,2500	1,6900	0,7921	1,6900
1º Qua	0,0009	0,0004	0,0016	0,0009	0,0009	0,0016	0,0009	0,0009	0,0016
3º Qua	0,0100	0,0081	0,0169	0,0144	0,0121	0,0256	0,0169	0,0144	0,0233
Variância	0,0036	0,0009	0,0182	0,0061	0,0011	0,0329	0,0043	0,0015	0,0194
Desvio Padrão	0,0598	0,0297	0,1349	0,0782	0,0345	0,1813	0,0654	0,0387	0,1393
Assimetria	19,3416	10,6141	10,0569	18,4086	7,8898	9,0327	14,2939	7,7975	8,4517
Curtose	503,5696	177,5148	120,1479	433,4642	0,0011	93,3059	282,6577	100,3285	82,9178
Jarque-Bera	31.623.824	3.285.055	270.790	23.417.419	1.029.414	162.562	9.914.428	1.032.735	127.891

Com base nos gráficos e dados fornecidos pelas tabelas das estatísticas descritivas, depreende-se que as séries apresentam características de volatilidade, aparentemente com maior força durante o período da pandemia da COVID-19, principalmente em relação as taxas de médio prazo, que apresentaram desvio padrão superior aos de curto e longo prazo, com valor de 0,1813% frente a um valor de apenas 0,0345% em relação ao período anterior a pandemia.

Comparativamente, esses movimentos ficaram bem diferentes ao se comparar com o período Pré-Covid 19, que não engloba o período da pandemia.

Porém, a constatação de observações anormais nas séries temporais financeiras gera dúvidas, pois podem ser ruídos brancos ao invés de conter a presença de efeitos ARCH, sendo necessário assim a realização de testes para a correta identificação, conforme demonstrado nos passos a seguir do estudo.

5.1 Identificação de Efeitos ARCH – Retornos e Retornos ao Quadrado

Com base nos dados extraídos das séries temporais, uma forma inicial de demonstrar e testar os efeitos ARCH, além de identificação e sinalização na escolha do melhor modelo para as projeções, é a utilização dos cálculos da Função de Autocorrelação Amostral (FAC) e a Função de Autocorrelação Amostral Parcial (FACP) da série temporal dos retornos e da série temporal dos retornos ao quadrado (Furriel, 2011).

Adicionalmente, vamos supor que $\alpha_t = r_t - \mu_t$ seja os resíduos da equação da média condicional. Para verificar a presença de heterocedasticidade condicional, eleva-se então o α_t ao quadrado (α_t^2), chamando-o assim de efeito ARCH. Diante disso, existem possíveis testes para tal identificação, o primeiro deles é o usual Teste Q de Ljung Box da série $\{\alpha_t^2\}_{t=1}^t$. A hipótese nula deste teste é que as primeiras “m” defasagens da FAC da série são zero. A forma mais fácil de verificar isto é exatamente criando os gráficos da FAC e FAC Parcial desta

série. Se qualquer defasagem a partir de “1” for estatisticamente significativa (acima da linha pontilhada), há heterocedasticidade condicional em α_t^2 .

Outro teste possível é o teste de multiplicador de Lagrange (LM) de Engle (1982). Este teste é equivalente ao usual Teste F para testar se $\alpha_i = 0$, para $i = 1, \dots, m$ na seguinte regressão linear:

$$\alpha_t^2 = \alpha_0 + \alpha_1 \alpha_{t-1}^2 + \dots + \alpha_m \alpha_{t-m}^2 + \varepsilon_t; t = m + 1, \dots, T$$

Onde ε_t denota o termo de erro, m é um número inteiro e positivo e T o tamanho da amostra, onde especificamente, tem-se as seguintes hipóteses:

$$H_0: \alpha_1 = \dots = \alpha_m = 0$$

$$H_1: \alpha_1 \neq 0 \text{ para algum } i \text{ entre } 1 \text{ e } m$$

Sendo assim, se o p-valor do teste para alguma defasagem qualquer (i) for menor que 0,05, dizemos que ao nível de significância de 5% podemos rejeitar a hipótese nula. Tal resultado confirma a existência de heterocedasticidade condicional em α_t^2 .

Em complemento, tais análises identificam a existência de autocorrelação nos dados dos retornos das séries e sua estacionariedade, identificando também se o FAC e FACP dos retornos ao quadrado das séries (volatilidade), apresentam piques destoantes e relevantes, que ao constar tal dependência, traz, portanto, suspeitas de efeitos ARCH, onde podem ser confirmadas com mais prudência através do teste de hipótese de Ljung Box.

De forma a direcionar a análise e a escolha de melhores modelos, tem-se inicialmente a aplicação do FAC e o FACP referente aos retornos e dos retornos ao quadrado das taxas de juros de curto prazo (2 anos), médio prazo (5 anos) e longo prazo (10 anos).

5.1.1 Resultados FAC e FACP dos RETORNOS – Período Total

Gráfico 6 – FAC e FACP - Retornos - Taxas de Curto Prazo (2 anos)

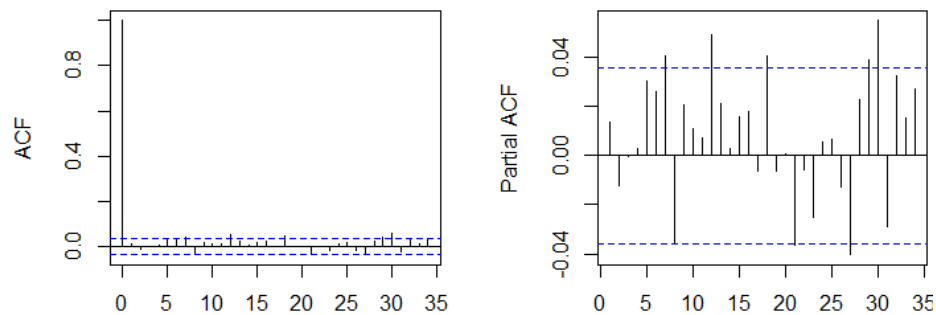


Gráfico 7 - FAC e FACP - Retornos - Taxas de Médio Prazo (5 anos)

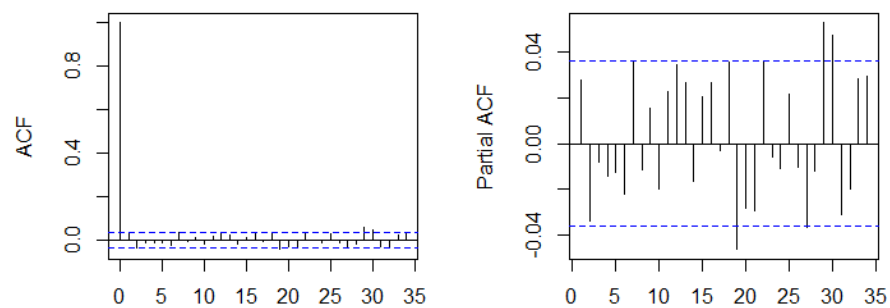
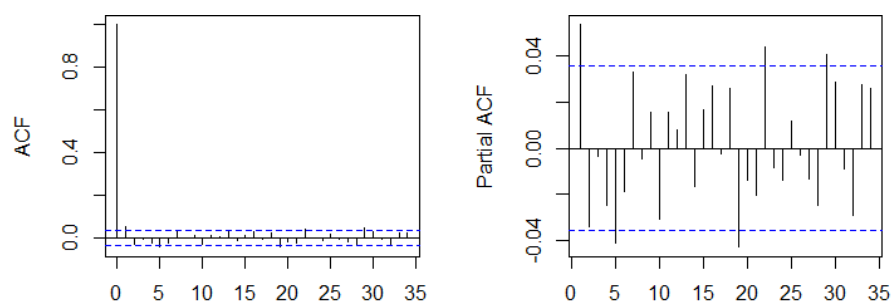


Gráfico 8 - FAC e FACP - Retornos - Taxas de Longo Prazo (10 anos)



5.1.2 Resultados FAC e FACP - RETORNOS AO QUADRADO – Período Total

Gráfico 9 – FAC e FACP – Retornos ao Quadrado - Taxas de Curto Prazo (2 anos)

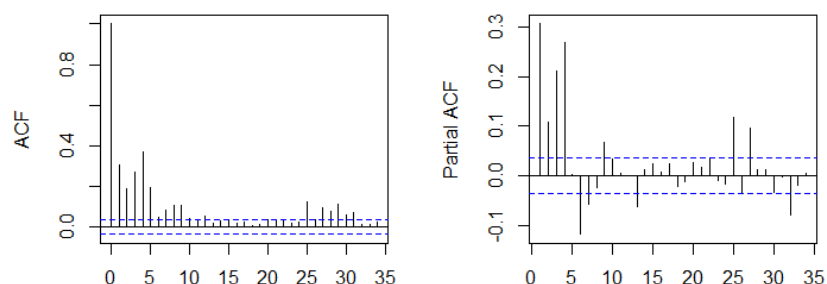


Gráfico 10 – FAC e FACP – Retornos ao Quadrado - Taxas de Médio Prazo (5 anos)

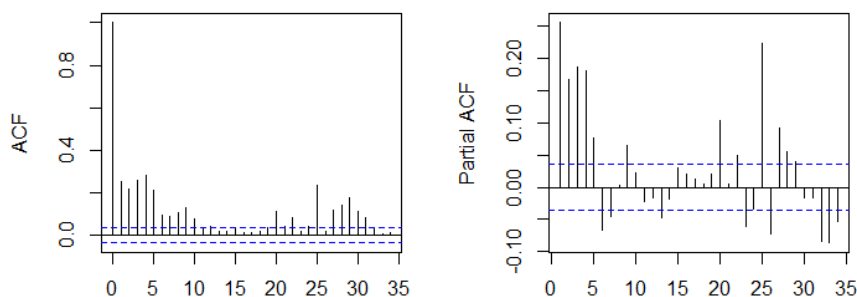
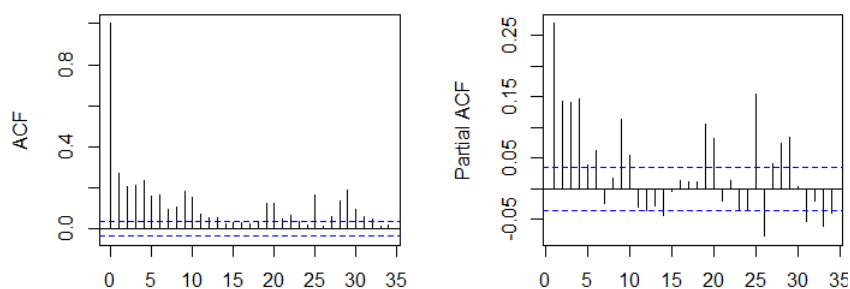


Gráfico 11 - FAC e FACP – Retornos ao Quadrado - Taxas de Longo Prazo (10 anos)



Os resultados apresentados pelos correlogramas da FAC e FACP referente as séries dos retornos ao quadrado, evidenciam a presença de efeitos heterocedásticos nas variações das séries das taxas de curto, médio e longo prazo, pois demonstram a existência de defasagens já à partir do “LAG 1”, sendo estatisticamente significativa (acima da linha pontilhada), relatando a existência de heterocedasticidade condicional em α_t^2 .

Na mesma linha, o teste de Ljung-Box, sendo usado neste estudo como método para confirmação ou rejeição da hipótese, apresenta, conforme abaixo, a confirmação dos

resultados já encontrados nos correlogramas acima. A tabela contempla as informações para as taxas de curto prazo (2 anos), médio prazo (5 anos) e longo prazo (10 anos), considerando tanto os retornos quanto os retornos ao quadrado.

5.1.3 Teste Ljung Box – Retornos e Retornos ao Quadrado das taxas

Tabela 5 – Teste Lung Box - Períodos Total – Taxa de Curto Prazo (2 anos)

Retornos						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	0,5475	0,9846	0,9863	1,0087	3,8147	16,3760
P-value	0,459400	0,6112	0,8046	0,9085	0,5764	0,08935
Retornos ao Quadrado						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	281,19	391,81	617,93	1033,3	1146,3	1251,6
P-value	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16

Tabela 6 – Teste Lung Box - Períodos Total – Taxa de Médio Prazo (5 anos)

Retornos						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	2,3317	5,5488	5,8415	6,3811	6,8502	13,7090
P-value	0,1268	0,0624	0,1196	0,1724	0,2320	0,1867
Retornos ao Quadrado						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	196,77	343,86	545,65	783,35	920,54	1.077,80
P-value	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16

Tabela 7 – Teste Lung Box - Períodos Total – Taxa de Longo Prazo (10 anos)

Retornos						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	8,6885	11,6310	11,7740	13,5150	19,2080	26,8530
P-value	0,003202	0,002981	0,0082	0,009016	0,001758	0,002747
Retornos ao Quadrado						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	218,8	346,05	483,52	652,48	730,78	1053,1
P-value	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16

Os resultados dos testes acima evidenciam, em ambas as taxas, que os retornos ao quadrado, de acordo com as defasagens analisadas (Lag's), apresentam p-valores menores que 0,05, sendo que ao nível de significância de 5%, rejeita-se a hipótese nula. Tal resultado confirma a existência de heterocedasticidade condicional em α_t^2 .

5.2 Identificação de Efeitos ARCH – Resíduos e Resíduos ao Quadrado

Vale lembrar que até o momento estão sendo analisados os dados referentes aos retornos e retornos ao quadrado da série das taxas de juros, sendo que a partir de agora, de forma complementar, inicia-se, em continuidade aos resultados extraídos acima, os estudos que incorpore a possibilidade da variação do termo de erro (resíduos), no sentido que possam capturar a evolução da variação e assim serem designados por modelos heterocedásticos (Furriel, 2011).

Cabe recordar que um processo ARCH (p) é aquele que a variância no tempo é condicional as observações passadas da série p vezes [$\approx$ AR], utilizando o quadrado das observações passada, logo, se considerarmos também as variâncias passadas [$\approx$ MA], temos então um processo GARCH.

Nesta linha, conforme sequência de análise realizada acima para os retornos da série das taxas de curto, médio e longo prazo, para a facilitação na identificação do tipo de processo

dominante, torna-se essencial a aplicação da FAC e FACP diretamente nos resíduos, avançando ainda mais na identificação de efeitos ARCH e GARCH, e direcionando neste momento a escolha do melhor modelo a ser utilizado para projeções.

Autores como Figueiredo (2019) et al, sugerem o uso do quadro abaixo de forma a auxiliar na identificação do melhor modelo, aplicando na sequência o Teste de Ljung Box para confirmação dos dados demonstrados visualmente pelos correlogramas.

Tabela 8 – Identificação de modelos.

MODELO	FAC	FACP
ARCH(p)	Decaimento exponencial / Infinito	Truncada na defasem " p "
GARCH(0, q)	Truncada na defasem " q "	Decaimento exponencial / Infinito
GARCH(p , q)	Misto de Decaimento e Truncagem / Infinito	Misto de Decaimento e Truncagem / Infinito

Antes da análise dos correlogramas da FAC e FACP, é interessante avaliar e visualizar de forma gráfica a série dos resíduos e dos resíduos ao quadrado gerados a partir do modelo estimado pela equação da média condicional, onde os resíduos ao quadrado podem também ser usados para testar a validade da equação da volatilidade. Nota-se, pelos gráficos a seguir, a mesma forma apresentada pelos retornos e retornos ao quadrado analisados anteriormente.

Gráfico 12: Resíduos - Período Total

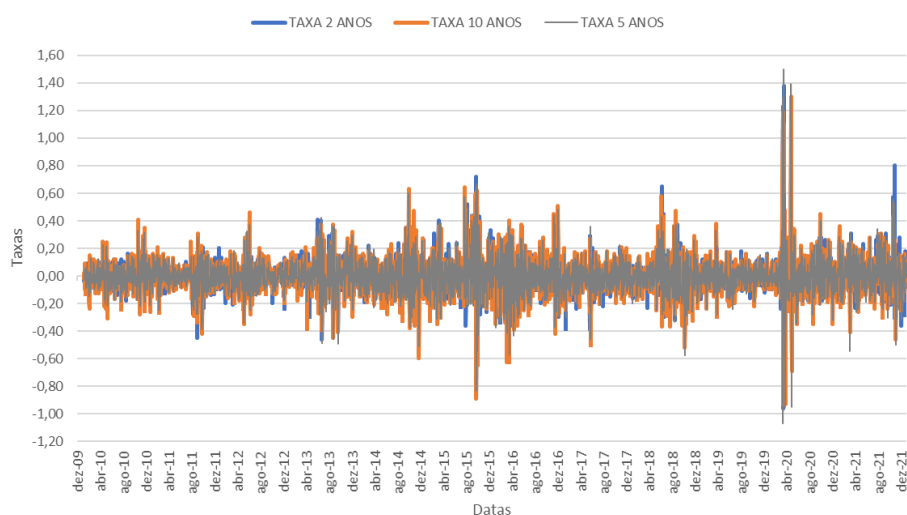
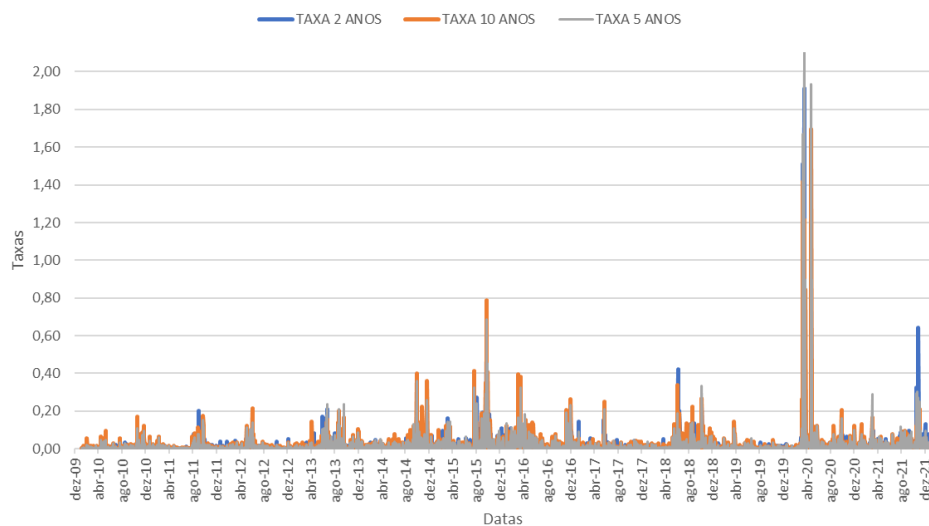


Gráfico 13: Resíduos ao Quadrado - Período Total.



Em seguida, com o intuito de captar mais informações quanto aos processos dominantes, é demonstrado os testes de autocorrelação (FAC) entorno do resíduos, sendo que, ao existir defasagem estatisticamente significativa (acima da linha pontilhada), evidencia sinais de autocorrelação; e que da mesma forma, em relação os correlogramas dos resíduos

ao quadrado, de acordo com a existência de defasagem estatisticamente significativa, evidenciará a existência de heterocedasticidade condicional (Oliveira, 2007).

5.2.1 Resultado FAC e FACP dos RESÍDUOS

Gráfico 14 – Resíduos - Taxas de Curto Prazo

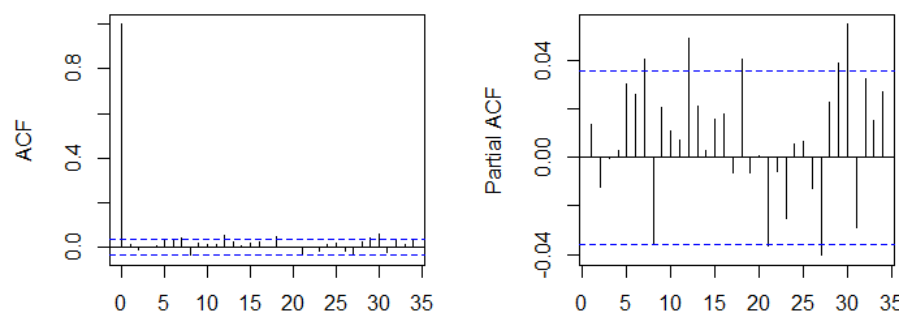


Gráfico 15 – Resíduos - Taxas de Médio Prazo

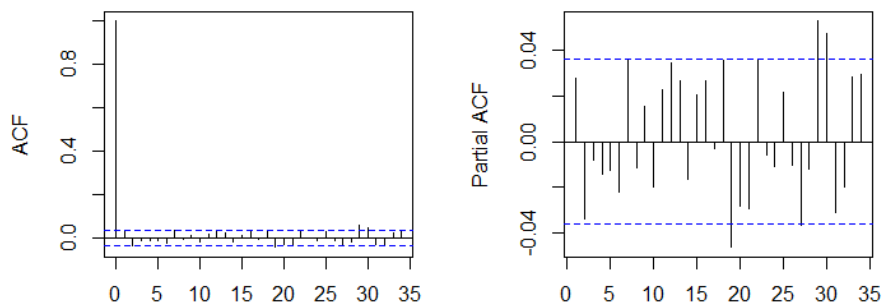
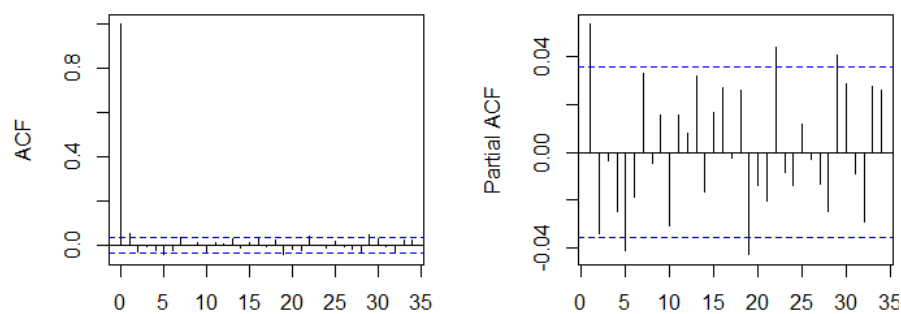


Gráfico 16 – Resíduos – Taxas de Longo Prazo



5.2.2 Resultado FAC e FACP dos RESÍDUOS AO QUADRADO

Gráfico 17 – Resíduos ao Quadrado – Taxas de Curto Prazo

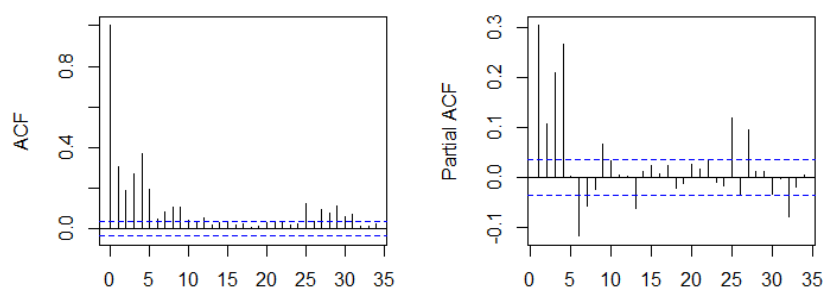


Gráfico 18 – Resíduos ao Quadrado – Taxas de Médio Prazo

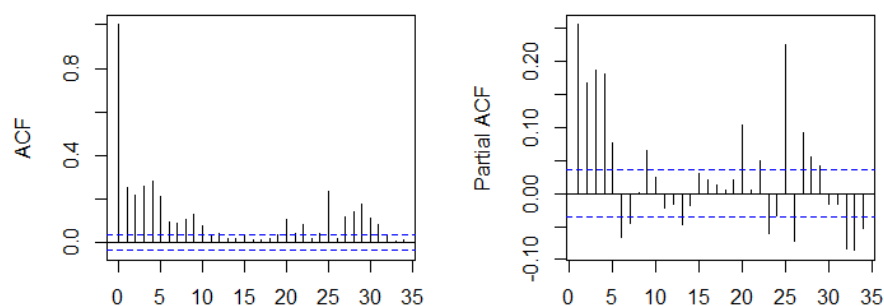
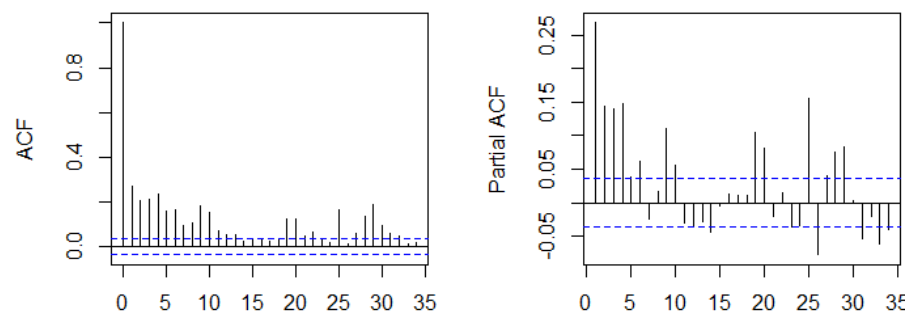


Gráfico 19 – Resíduos ao Quadrado – Taxas de Longo Prazo



Corroborando com os resultados apresentadas pelos correlogramas da FAC e FACP acima, o Teste de Ljung Box, conforme tabela abaixo, confirmam estatisticamente os resultados apresentados pelas informações acima.

5.2.3 Teste Ljung Box – Resíduos e Resíduos ao Quadrado

Tabela 9 – Teste Lung Box - Períodos Total – Taxa de Curto Prazo

Resíduos						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	0,5475	0,9846	0,9863	1,0087	3,8147	16,3760
P-value	0,459400	0,6112	0,8046	0,9085	0,5764	0,08935
Resíduos ao Quadrado						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	280.43	390.7	616.24	1031.7	1144.8	1249.4
P-value	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16

Tabela 10 – Teste Lung Box - Períodos Total – Taxa de Médio Prazo

Resíduos						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	2,3317	5,5488	5,8415	6,3811	6,8502	13,7090
P-value	0,1268	0,0623	0,1196	0,1724	0,2320	0,1867
Resíduos ao Quadrado						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	196,05	342,72	544,12	782,05	919,29	1075,7
P-value	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16

Tabela 11 – Teste Lung Box - Períodos Total – Taxa de Longo Prazo

Resíduos						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	8,6885	11,6310	11,7740	13,5150	19,2080	26,8530
P-value	0,003202	0,002981	0,0082	0,009016	0,001758	0,002747
Resíduos ao Quadrado						
	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Lag 5	Lag 10
X-squared	217,77	344,92	482,51	651,83	730,27	1052,1
P-value	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16	< 2,2e-16

6. Estimação dos Modelos

Ao identificar que os efeitos ARCH são significantes, conforme demonstrado pelas funções de autocorrelação e autocorrelação parcial e confirmadas também pelas aplicações dos testes de Ljung Box, que apresentaram para todos eles resultados com alto grau de significância, o passo a seguir busca determinar a melhor ordem de “ p e q ” para a estimação dos modelos, tirando como base as informações contidas na Tabela 8 e por meio do princípio da máxima verossimilhança - onde não nos deteremos nos detalhes técnicos, já que estão além do objetivo deste trabalho e sendo gerados pelo programa econométrico RSTUDIO.

Cabe destacar, conforme Costa (2019), que os mesmos procedimentos (máxima verossimilhança) para estimar o modelo ARCH(p) pode ser usado para estimar o modelo GARCH(p, q), lembrando que este último pode ser escrito como um modelo ARMA, sendo que para o presente trabalho a escolha da definição da especificação (ordens do modelo) foi feita por meio de critérios de informações, aplicando critérios de AIC (Critério de Informação Akaike), BIC (Critério Bayesiano de Schwarz) e HQIC (Critério de Informação de Hannan-Quinn (HQC) como resultados chaves para a escolha do melhor modelo.

Ainda em relação as especificações da escolha das ordens de [p e q] a serem empregadas nos modelos, as literaturas mais comuns sugerem, conforme HANSEN e LUNDE (2005) e BOLLERSLEV et al. (1992), a aplicação de especificações de ordem [1,1], porém,

foram realizadas diversas combinações com a intenção de verificar e escolher o melhor critério.

Sendo assim, as tabelas a seguir, apresentam os resultados encontrados conforme as abordagens das estimativas para as diversas combinações de “ p e q ”, escolhendo o modelo com menor AIC apresentado. O objetivo aqui é observar a amostra de dados das séries temporais dos retornos buscando a otimização para encontrar os vetores que melhor apresente combinações de modelos de volatilidade com estimativas conjuntas de equações da média e variância condicional para os componentes ARCH, GARCH e ARMA.

Salienta-se que os resultados apresentados abaixo não contemplam todas as estimativas realizadas para o trabalho, sendo inseridas algumas combinações apenas de forma a demonstrar e comprovar os resultados estimados, destacando também o que de fato apresentou o melhor resultado para o modelo.

Tabela 12 – Resultados dos Modelos - Períodos Total – Taxa de Curto Prazo (2 anos)

	Estimativas e Nível de Significância					
	ARCH(1)	ARCH(2)	GARCH(1,1)	GARCH(1,1) + ARMA(1,0)	GARCH(1,1) + ARMA(2,0)	GARCH(1,1) + ARMA(5,0)
mu	-0,0037 ' * '	-0,0048 ' *** '	-0,0035 ' * '	-0,0034 ' * '	-0,0033 ' * '	-0,0031 ' * '
omega	0,0073 ' *** '	0,0052 ' *** '	0,0004 ' *** '	0,0004 ' *** '	0,0003 ' *** '	0,0003 ' *** '
alpha1	0,4605 ' *** '	0,3149 ' *** '	0,1602 ' *** '	0,1586 ' *** '	0,1586 ' *** '	0,1586 ' *** '
alpha2		0,3014 ' *** '				
beta1			0,8131 ' *** '	0,8148 ' *** '	0,8150 ' *** '	0,8149 ' *** '
beta2						
ar1				0,0392 ' . '	0,03871 ' . '	0,0378 ' . '
ar2					0,0263 ' ' '	0,0253 ' ' '
ar3						0,017 ' ' '
ar4						0,0013 ' ' '
ar5						0,0446 ' * '

***, **, *, ., e ' ': Significante ao nível de 0,1%, 1,0%, 5%, 10% e 'Não significante', respectivamente.

Nível de Significância						
Jarque-Bera Test	0	0	0	0	0	0
Shapiro-Wilk Test	0	0	0	0	0	0
Ljung-Box_res Q(10)	0,0001455634	0,002516702	0,0001689296	0,01043798	0,05006503	0,3883832
Ljung-Box_res Q(15)	3,18251e-05	0,0005190529	7,959565e-05	0,005351482	0,02832	0,2426761
Ljung-Box_res Q(20)	1,255003e-05	0,0004744602	0,0001405608	0,006288245	0,03190278	0,220038
Ljung-Box_res^2 Q(10)	0	0	0,7872321	0,7544181	0,7674484	0,783155
Ljung-Box_res^2 Q(15)	0	0	0,5057586	0,4837782	0,4898305	0,4823553
Ljung-Box_res^2 Q(20)	0	0	0,5534052	0,5296431	0,531129	0,5233474
LM Arch Test	0	1,110223e-16	0,7192025	0,6859117	0,7011662	0,7087492
***, **, *, ., e ' ': Significante ao nível de 0,1%, 1,0%, 5%, 10% e 'Não significante', respectivamente.						
Critérios de Informações						
AIC	-1,715482	-1,810360	-1,895568	-1,896146	-1,896135	-1,896232
BIC	-1,709493	-1,802376	-1,887584	-1,886166	-1,884159	-1,878267
HQIC	-1,713328	-1,807488	-1,892697	-1,892557	-1,891828	-1,889771

Tabela 13 – Resultados dos Modelos - Períodos Total – Taxa de Médio Prazo (5 anos)

Estimativas e Nível de Significância						
	ARCH(1)	ARCH(2)	GARCH(1,1)	GARCH(1,1) + ARMA(1,0)	GARCH(1,1) + ARMA(2,0)	GARCH(1,1) + ARMA(5,0)
mu	-0,0015 ' '	-0,0029 ' '	-0,0043 ' * '	-0,0041 ' * '	-0,0041 ' * '	-0,0041 ' * '
omega	0,0107 ' *** '	0,0071 ' *** '	0,0002 ' *** '	0,0002 ' *** '	0,0002 ' *** '	0,0002 ' *** '
alpha1	0,4065 ' *** '	0,3398 ' *** '	0,1421 ' *** '	0,1426 ' *** '	0,1427 ' *** '	0,1424 ' *** '
alpha2		0,2994 ' *** '				
beta1			0,8493 ' *** '	0,8489 ' *** '	0,8488 ' *** '	0,8491 ' *** '
beta2						
ar1				0,0412 ' * '	0,0409 ' * '	0,04126 ' * '
ar2					0,0054 ' '	0,0053 ' '
ar3						-0,0048 ' '
ar4						-0,0056 ' '
ar5						0,0149 ' '
***, **, *, ., e ' ': Significante ao nível de 0,1%, 1,0%, 5%, 10% e 'Não significante', respectivamente.						

Nível de Significância						
Jarque-Bera Test	0	0	0	0	0	0
Shapiro-Wilk Test	0	0	0	3,831278e-16	4,046544e-16	4.232217e-16
Ljung-Box_res Q(10)	0,4341314	0,345734	0,437840	0,975154	0,9847181	0,9955257
Ljung-Box_res Q(15)	0,08591985	0,170259	0,416826	0,9011823	0,9200784	0,9520169
Ljung-Box_res Q(20)	0,02787232	0,060046	0,237948	0,6068533	0,6419385	0,6984616
Ljung-Box_res^2 Q(10)	0	6,661338e-16	0,246614	0,2180172	0,2191069	0,2206154
Ljung-Box_res^2 Q(15)	0	0	0,378210	0,3560055	0,3562593	0,3539025
Ljung-Box_res^2 Q(20)	0	0	0,568140	0,5562194	0,5569965	0,5528224
LM Arch Test	0	1,110223e-16	0,407495	0,3703386	0,3716082	0,3734237
***, **, *, ., e ' ': Significante ao nível de 0,1%, 1,0%, 5%, 10% e 'Não significante', respectivamente.						
Critérios de Informações						
AIC	-1,369458	-1,464157	-1,565862	-1,566689	-1,566059	-1,564626
BIC	-1,363470	-1,456173	-1,557878	-1,556709	-1,554082	-1,546661
HQIC	-1,367305	-1,461286	-1,562991	-1,563100	-1,561752	-1,558165

Tabela 14 – Resultados dos Modelos - Períodos Total – Taxa de Longo Prazo (10 anos)

Estimativas e Nível de Significância						
	ARCH(1)	ARCH(2)	GARCH(1,1)	GARCH(1,1) + ARMA(1,0)	GARCH(1,1) + ARMA(2,0)	GARCH(1,1) + ARMA(5,0)
mu	-0,0005 ' '	-0,0026 ' '	-0,0043 ' * '	-0,0041 ' * '	-0,0041 ' * '	-0,0043 ' * '
omega	0,0118 ' *** '	0,0085 ' *** '	0,0003 ' *** '	0,0003 ' *** '	0,0003 ' *** '	0,0003 ' *** '
alpha1	0,3932 ' *** '	0,3585 ' *** '	0,1228 ' *** '	0,1239 ' *** '	0,1235 ' *** '	0,1232 ' *** '
alpha2		0,2355 ' *** '				
beta1			0,8629 ' *** '	0,8621 ' *** '	0,8624 ' *** '	0,8629 ' *** '
beta2						
ar1				0,0624 ' ** '	0,0631 ' *** '	0,0637 ' *** '
ar2					-0,0131 ' ' '	-0,0136 ' ' '
ar3						-0,004 ' ' '
ar4						-0,0219 ' ' '
ar5						-0,0052 ' ' '
***, **, *, ., e ' ': Significante ao nível de 0,1%, 1,0%, 5%, 10% e 'Não significante', respectivamente.						

Nível de Significância						
Jarque-Bera Test	0	0	0	0	0	0
Shapiro-Wilk Test	0	0	0	0	0	0
Ljung-Box_res Q(10)	0,1133025	0,1325717	0,3606824	0,9989121	0,9957303	0,9997835
Ljung-Box_res Q(15)	0,07059553	0,1530001	0,5151429	0,9932597	0,986713	0,9960021
Ljung-Box_res Q(20)	0,1201592	0,3057653	0,6862545	0,9955981	0,9915793	0,9966397
Ljung-Box_res^2 Q(10)	0	0	0,3336852	0,3479578	0,3465807	0,346702
Ljung-Box_res^2 Q(15)	0	0	0,4339021	0,4466309	0,4451857	0,426567
Ljung-Box_res^2 Q(20)	0	0	0,5177155	0,5416562	0,5383577	0,5334227
LM Arch Test	0	0	0,4940917	0,5240425	0,5174702	0,5177038
***, **, *, ., e ' ': Significante ao nível de 0,1%, 1,0%, 5%, 10% e 'Não significante', respectivamente.						
Critérios de Informações						
AIC	-1,283156	-1,350618	-1,454349	-1,457081	-1,456575	-1,455897
BIC	-1,277168	-1,342634	-1,446365	-1,447101	-1,444599	-1,437933
HQIC	-1,281002	-1,347747	-1,451478	-1,453492	-1,452268	-1,449437

Os resultados dos modelos estimados para as taxas de curto prazo (2 anos), médio prazo (5 anos) e longo prazo (10 anos), conforme já dito acima, não se limitaram aos modelos inseridos nos quadros, sendo modelados vários outros com diferentes combinações de ordens para “ p e q ”, mas por não apresentarem estatísticas significantes mais expressiva que as demonstradas nos quadros acima, decidiu-se apresentar apenas o conjunto acima de informações para um comparativo dos resultados.

Observa-se, conforme os resultados apresentados, que os modelos mais significantes de acordo com o menor valor de AIC, foram os modelos “**GARCH(1, 1) + ARMA(5, 0)**” para as taxas de curto prazo (2 anos) e “**GARCH(1, 1) + ARMA(1, 0)**” para as taxas de médio (5 anos) e longo prazo (10 anos), com valores de AIC de **-1,896232**, **-1,566689** e **-1,457081**, respectivamente.

Complementarmente a identificação do modelo com melhor resultado para a volatilidade dos retornos das taxas de juros de curto, médio e longo prazo, buscou-se então responder uma pergunta central do trabalho – se houve mudança na volatilidade durante o período da pandemia da COVID-19. Para isso foi criada uma Regressão simples contendo uma DUMMY como Variável Explicativa, representando o período da pandemia, compreendendo

o período de março de 2020 a dezembro de 2021 e aplicando nesta Regressão a volatilidade extraída de cada um dos modelos acima como Variável Dependente.

Os resultados encontrados, conforme Tabela 15 abaixo, para as Regressões usando a volatilidade dos modelos, mostraram-se altamente significativos, com p-valores abaixo de $2,2e-16$ (***), sendo que ao nível de significância de 5%, aceita-se a hipótese de que houve volatilidade, levando a conclusão de que de fato houve mudança na volatilidade no período da pandemia da COVID-19, além da confirmação da existência de heterocedasticidade nos dados modelados.

Tabela 15 – Resultado Regressão – Volatilidade x Dummy Covid - Período Total

	Estimativas e Nível de Significância					
	CURTO PRAZO (2 ANOS)		MÉDIO PRAZO (5 ANOS)		LONGO PRAZO (10 ANOS)	
INTERCEPTO	0,095313	<2e-16 '***'	0,112497	<2e-16 '***'	0,11973	<2e-16 '***'
DUMMY_COVID	0,044612	<2e-16 '***'	0,057177	<2e-16 '***'	0,04019	<2e-16 '***'

***, **, *, ., e ' ': Significante ao nível de 0,1%, 1,0%, 5%, 10% e 'Não significante', respectivamente.

7. Considerações Finais e Conclusão

Com a realização deste trabalho foi possível estudar a construção da Curva de Juros Pré-Fixada (ETTJ PRÉ) para as taxas à vista e com a utilização da metodologia paramétrica/estatística proposta por Nelson e Siegel (1987) e estendido por Svensson (1994). Desta construção foi possível extrair as taxas de curto prazo (2 anos), médio prazo (5 anos) e longo prazo (10 anos) escolhidas para análise da volatilidade.

A análise da volatilidade, devido a seus impactos nas finanças e economias, além de suas características e forma, é um dos temas mais abordado no mundo das finanças, principalmente ao se tratar de períodos de incertezas como o vivido pela pandemia da COVID-19.

Os modelos analisados e aplicados são pertencentes à classe dos modelos heterocedásticos, sendo um dos primeiros estudos sobre o assunto publicado por Robert F.

Engle em 1982, conhecido como o modelo de Heterocedasticidade Condicional Autorregressiva (ARCH) e generalizado por Bollerslev em 1986. Para cada modelo foram apresentados resultados para as taxas de curto, médio e de longo prazo, onde foram mostradas suas características e propriedades.

No decorrer do trabalho mostrou-se ainda uma sequência para a detecção da presença de heterocedasticidade na volatilidade através da aplicação de passos sugeridos por diversos autores, além da aplicação de testes estatísticos para comprovação dos resultados, para que em seguida realizasse a modelagem para cada prazo.

Em momento seguinte, usando as mesmas taxas de curto, médio e longo prazo, foram aplicadas práticas com o objetivo de verificar e identificar a escolha do melhor modelo, encontrando aquele que apresentasse e se ajustasse a melhor previsão sobre a volatilidade nos retornos das taxas de juros pré-fixadas.

Os experimentos para os diferentes modelos criados usaram técnicas e testes apresentados ao longo da dissertação, onde usaram como escolha de melhor modelo os critérios de informação de Akaike (AIC), apresentando como melhor modelo para as taxas à vista pré-fixadas, o modelo “GARCH(1, 1) + ARMA(5, 0)” para as taxas de curto prazo e o modelo “GARCH(1, 1) + ARMA(1, 0)” para as taxas de médio prazo e longo prazo, com valores de AIC de -1,896232, -1,566689 e -1,457181, respectivamente.

Desta forma, seguindo a linha de outros trabalhos, como o de Liziér e Palma (2021), que utilizaram modelos da família ARCH com o objetivo de verificar os impactos da pandemia, mas com foco na volatilidade do índice BOVESPA, encontrando em seus resultados que houve mudanças no comportamento da volatilidade durante o período da pandemia nas cotação do IBOVESPA, o presente trabalho buscou apresentar o melhor modelo com foco nas taxas de juros pré-fixada, tanto de curto e médio quanto longo prazo, comprovando também as mudanças em sua volatilidade.

Como sugestão futura de extensão do trabalho, sugere-se uma continuidade nos estudos visando uma análise exploratória detalhada para os períodos que sinalizaram maior

volatilidade, identificando os principais impactos que vieram a causar esses acontecimentos, como medidas de intervenção do Banco Central, perda de confiança no mercado, riscos de inadimplência, inflação e iliquidez dos títulos, conforme estudado por Vissing-Jorgensen, Annette (2021), em seu estudo denominado *“The Treasury Market in Spring 2020 and the Response of the Federal Reserve”* e também pelo artigo do Federal Reserve Bank of New York Staff Reports, no. 1010 (2022) intitulado *“The Global Dash for Cash: Why Sovereign Bond Market Functioning Varied across Jurisdictions in March 2020”*. A continuidade do estudo nessa linha de pesquisa contribuiria para explicar com mais clareza esses movimentos e seus verdadeiros impactos, podendo contribuir para uma real análise dos acontecimentos.

8. REFERÊNCIAS

Anbima (2010), **‘Estrutura a termo das taxas de juros estimada e inflação implícita’**, Acessível em: https://www.anbima.com.br/data/files/18/42/65/50/4169E510222775E5A8A80AC2/est-termo_metodologia.pdf. Último acesso em agosto de 2021.

ARELLANO, Cristina, YAN BAI, and GABRIEL P. Mihalache. 2020. **Deadly Debt Crises: COVID-19 in Emerging Markets**. Cambridge: National Bureau of Economic Research.

ASSAF NETO, Alexandre. **Finanças Corporativas e valor** – 8. Ed – São Paulo: Atlas, 2021.

ASHRAF, Badar Nadeem. **Stock markets’ reaction to COVID-19: Cases or fatalities? Research in International Business and Finance** 54: 101249. 2020.

BAKAS, Dimitrios, and ATHANASIOS Triantafyllou. 2020. Commodity price volatility and the economic uncertainty of pandemics. *Economics Letters*.

BONFIM, A. N. (2007). **Derivativos de Crédito e Outros Instrumentos**. Elsevier.

BOLLERSLEV, Tim. **“Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity.”** *Journal of econometrics*. 1986.

BODIE, Zvi; KANE Alex; MARCUS, Alan J, **Investimentos** – AMGH Editora Ltda. 8ª ed., 2010

Circular nº 3.876 de 31/1/2018, de 31 de janeiro de 2018 do Banco Central do Brasil (<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/exibenormativo?tipo=Circular&numero=3876>)

COSTA, Hudson Chaves, **Modelos ARCH e GARCH.**
<https://rpubs.com/hudsonchavs/archgarch>, 2019.

DIEBOLD, F. X., & Li, C. (2006). **Forecasting the term structure of government bond yields.** *Journal of Econometrics*, 130(2), 337–364.

ENGLE, R. “**Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation.**” *Econometrica*, v. 50. n. 1, p. 987-1.007, 1982.

FABOZZI, J. F. (2006), **Bond Markets, Analysis and Strategies**, 6th edn, Prentice Hall.

FIGUEIREDO, Adriano Marcos Rodrigues. **Séries Temporais com R: Exemplos ARCH com Stocks.** Campo Grande/MS, Brasil: RStudio/Rpubs, 2019. Disponível em http://rpubs.com/amrofi/stocks_garch.

FRALETTI, P. B. (2004), ‘**Ensaio sobre taxas de juros em reais e sua aplicação na análise financeira**’, Tese (Doutorado) - FEA Universidade de São Paulo.

FRANKLIN Jr., S. L., DUARTE, T. B., NEVES, C. R., & MELO, E. F. L. (2012). **A estrutura a termo de taxas de juros no Brasil: modelos, estimação e testes.** *Economia Aplicada*, 16(2), 255-290. <https://doi.org/10.1590/S1413-80502012000200003>

FRANSES, Philip Hans. **Time series models for business and economic forecasting.** Nova York: Cambridge University Press, 1998. p. 155.

FROTA, Silvia Franciele Padilha. **Um estudo da estrutura a termo de taxas de juros de títulos públicos prefixados e o modelo de Svensson.** 2017. 35 f. Dissertação (Mestrado em Matemática em Rede Nacional) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Curitiba, 2017.

FURRIEL, Ana Margarida Queirós Sepúlveda, **Modelos Heterocedásticos – ARCH e GARCH –** Universidade de Porto, Faculdade de Economia, 2011.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social.** São Paulo: Atlas, 2006.

GUJARATI, Damodar N, PORTER, Dawn C, **Econometria Básica**, Quinta Edição, AMGH Editora Ltda, 2011.

GOODELL, John W. **COVID-19 and finance: Agendas for future research.** *Finance Research Letters* 35: 101512. 2020.

JORION, Philippe. **Value at Risk: the New Benchmark for Controlling Market Risk**. 1997.

LAINING, Timothy. **The economic impact of the Coronavirus 2019 (COVID-2019): Implications for the mining industry. The Extractive Industries and Society** 7: 580–82. 2020

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2007.

LION, Octavio Manuel Bessada. **Um Estudo sobre a Modelagem da Estrutura a Termo das Taxas de Juros e a Precificação de Opções sobre Títulos de Renda Fixa**. Tese. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002

LIU, Lu, EM-ZE Wang, and CHIEN-Chiang Lee. 2020. **Impact of the COVID-19 pandemic on the crude oil and stock markets in the US: A time-varying analysis**. Energy Research Letters.

LIZIÉR, Mario Augusto de Souza e PALMA, Andreza Aparecida. 2021. **Impacto da pandemia de Covid-19 na volatilidade do IBOVESPA: uma análise exploratória a partir de modelos da família ARCH**. Revista Eletrônica do Curso de Ciências Econômicas da UFPI – Volume 43 – Nº 2 – Julho-Dezembro, 2021. DOI: <https://DX.DOI.ORG/10.26694/1517-6258.432> .

LUZ, Arthur Nader. **Impacto da COVID-19 na volatilidade do índice Bovespa**. 2021. Osasco, 2021.

MORETTIN, Pedro Alberto e TOLOI, Clélia Maria de Castro. **Análise de séries temporais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004

NELSON, C. R. & Siegel, A. F. (1987), ‘Parsimonious modeling of yield curves’, The Journal of Business, University of Chicago Press 60(4), 473–489.

OLIVEIRA, Denis Renato, ÁZARA, Leiziane Neves, **Análise da Volatilidade do Índice BOVESPA: um estudo empírico utilizado modelos da classe ARCH** – CONTEXTUS Revista Contemporânea de Economia e Gestão. Vol.5 - Nº 1 - jan/jun/2007. (07-16).

PINDYCK, Robert S., RUBINFEL, Daniel L. **Econometria – 1ª ED**. editora: Elsevier – 2014.

RIBEIRO, P. Fernandes. **Estrutura a Termo da Taxa de Juros no Brasil e Previsibilidade de Ciclos Econômicos**. Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Valls Pereira. Dissertação (mestrado) - Escola de Economia de São Paulo - Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2010.

ROCHA, A. Craveiro da. **Aplicação da teoria da estrutura das taxas de juro em Portugal**. Orientador: Doutor Joaquim Carlos da Costa Pinho. Aveiro, 2009. Dissertação de Mestrado – Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial, Universidade de Aveiro.

ROSSI, Jose W. **A Estrutura a Termo da Taxa de Juros: Uma Síntese**. Rio de Janeiro: IPEA, 1996.

SANCHES, Juliana Bezerra. **Teoria das expectativas aplicada a estrutura a termo da taxa de juros do Brasil**. Orientador: Prof. Dra. Ana Beatriz Galvão Ferreira. São Paulo IBEMEC. 2006, 38p. Dissertação (Mestrado em Economia).

SÈNE, Babacar, MOHAMED Lamine Mbengue, and MOUHAMAD M. Allaya. 2021. **Vershooting of sovereign emerging eurobond yields in the context of COVID-19**. Finance Research Letters.

SEARLS, Seth, BARONE, Jordan, CHABOUD, Alain, COPELAND, Adam, KAVOUSSI, Cullen and KEANE, Frank. **The Global Dash for Cash: Why Sovereign Bond Market Functioning Varied across Jurisdictions in March 2020**. Federal Reserve Bank of New York Staff Reports, no. 1010. March 2022.

SVENSSON, L. E. O. (1994), 'Estimating and interpreting forward interest rates: Sweden 1992-1994', **International Monetary Fund Working Paper**, No. 114, Washington DC

To, Bao Cong Nguyen, Tam Van Thien Nguyen, Nhan Thi Hong Nguyen, and Hoai Thu Ho. **Responses of the Internacional Bond Markets to COVID-19 Containment Measures**. Journal of Risk and Financial Management. Academic Editors, 2022

VASCONCELOS, Wagner. **Crises dentro da crise: respostas, incertezas e desencontros no combate à pandemia da Covid-19 no Brasil**, <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.3499.003>, 2020.

VISSING-JORGENSEN, Annette. **The Treasury Market in Spring 2020 and the Response of the Federal Reserve**. NBER Working Paper No. 29128. August 2021



idp

SGAS Quadra 607 - Módulo 49
Via L2 Sul, Brasília-DF
CEP: 70200-670

  /sejaidp
 (61) 3535-6565
 idp.edu.br