

Estimação da Taxa Neutra: aplicação de filtros estatísticos

Luiz Antônio Soares dos Santos Leopoldo *

Fernando Antonio Lucena Aiube †

Edison Americo Huarsaya Tito ‡

25 de julho de 2025

Resumo

A taxa de juros neutra é um conceito fundamental para a formulação de políticas monetárias e estratégias de mercado financeiro, mas sua estimativa é desafiadora, pois se trata de uma variável não observável, sujeita a mudanças estruturais e incertezas. Diante desse desafio, este estudo propõe a utilização de filtros estatísticos, permitindo diferentes abordagens para a modelagem e interpretação da taxa neutra. Três métodos estatísticos amplamente utilizados em séries temporais: o Filtro de Kalman, que ajusta dinamicamente a taxa neutra a partir de um modelo estocástico; o Filtro de Hodrick-Prescott (HP), que separa tendências de longo prazo das flutuações cíclicas; e a Suavização Exponencial Holt-Winters, que captura padrões persistentes e responde rapidamente a mudanças recentes. A análise comparativa mostra que cada método oferece uma visão distinta da dinâmica da taxa neutra, permitindo que analistas e traders escolham a abordagem mais adequada conforme o horizonte de investimento e o grau de suavização desejado.

Dessa forma, argumenta-se que não há um único modelo ideal para estimar a taxa neutra, mas sim um conjunto de técnicas que podem ser combinadas estrategicamente para obter uma visão mais robusta. O estudo contribui para a literatura ao fornecer um arcabouço prático para a estimação da taxa neutra, ressaltando sua aplicabilidade em decisões de mercado e precificação de ativos.

Palavras-chave: Taxa de Juros; Taxa Neutra de Juros; Filtros estatísticos; Filtro de Kalman; Filtro de Hodrick-Prescott; Suavização Exponencial Holt-Winters.

Código JEL: E43, E52, C32, G11, G17.

*Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Econômicas da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (PPGCE-UERJ)

†Professor Associado da Faculdade de Ciências Econômicas - UERJ

‡Professor Adjunto do Instituto de Matemática e Estatística - UERJ

1 Introdução

A taxa de juros neutra desempenha um papel crucial tanto na formulação da política monetária quanto na tomada de decisões no mercado financeiro. Em termos macroeconómicos, ela é definida como a taxa real de juros que equilibra a economia, mantendo a inflação dentro da meta sem gerar pressões inflacionárias ou deflacionárias, análise contida em Holston et al (2017)[6]. No entanto, para os agentes do mercado financeiro, a taxa neutra serve como um referencial dinâmico, ajudando na avaliação do nível apropriado das taxas de juros e suas implicações sobre ativos financeiros, expectativas de inflação e ciclos econômicos. Operadores de mercado, traders e gestores de fundos utilizam a taxa neutra para calibrar estratégias de investimento, estimar prêmios de risco e ajustar posições em resposta às mudanças nas condições monetárias e macroeconómicas.

Apesar de sua importância, a taxa neutra é uma variável não observável, o que impõe desafios significativos à sua estimação. Para lidar com essa incerteza, diferentes abordagens estatísticas e econométricas vêm sendo empregadas, permitindo que analistas de mercado extraiam estimativas robustas a partir de dados históricos. Métodos como o Filtro de Kalman, o Filtro de Hodrick-Prescott (HP) e a Suavização Exponencial Holt-Winters oferecem formas distintas de modelagem da taxa neutra, cada qual com vantagens e limitações. Enquanto o Filtro de Kalman permite capturar dinâmicas latentes e ajustar-se a mudanças estruturais, o Filtro HP é amplamente utilizado para separar componentes de tendência e ciclo em séries temporais macroeconómicas. Já a Suavização Exponencial Holt-Winters fornece um método responsivo para acompanhar variações ao longo do tempo sem exigir conhecimento detalhado da estrutura da série.

Diante desses desafios, este artigo propõe a adoção de diferentes métodos estatísticos, permitindo que analistas utilizem abordagens complementares para estimar a taxa neutra. Essa abordagem evita a busca por um modelo único e definitivo, reconhecendo que diferentes técnicas oferecem perspectivas distintas sobre a dinâmica da taxa neutra. O objetivo é avaliar a aplicabilidade de três filtros estatísticos amplamente utilizados em séries temporais: o Filtro de Kalman, o Filtro de Hodrick-Prescott (HP) e a Suavização Exponencial Holt-Winters, ressaltando como cada um pode ser empregado em diferentes contextos analíticos no mercado financeiro.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão da literatura sobre a taxa neutra e os métodos de estimação. A Seção 3 descreve a formulação matemática dos filtros estatísticos utilizados. A Seção 4 detalha os dados empregados na análise. Na Seção 5, são apresentados os resultados empíricos e a comparação entre os diferentes filtros. Por fim, a Seção 6 discute as implicações dos achados e sugere direções para futuras pesquisas.

2 Revisão da Literatura

A taxa de juros neutra é aquela que equilibra a economia, ou seja, não acelera nem desacelera a atividade econômica. Ela serve como referência fundamental para a política monetária, sendo definida como a taxa consistente, no médio prazo, com a inflação na

meta e o crescimento do produto igual ao seu crescimento potencial (Blinder, 1999)[2]. Na literatura macroeconômica, os termos taxa de juros real de equilíbrio, taxa de juros de equilíbrio, taxa de juros real neutra, taxa de juros neutra e taxa neutra são frequentemente utilizados como sinônimos, embora possam ter nuances metodológicas distintas. O conceito de taxa de juros neutra tem origem em Wicksell (1898;1936)[12], que identificou a "taxa natural de juros" como aquela que equilibra poupança e investimento sem pressão inflacionária.

A taxa de juros neutra é um conceito teórico, a dificuldade do seu uso se deve ao fato de ser uma variável não observável e ao longo do tempo, evolui em linha com outras variáveis, tal como o crescimento do produto, consumo, poupança, investimento, fundamentos do sistema financeiro e o prêmio de risco. Estimá-la com precisão é difícil, mas ela serve como um ponto de referência: se a expectativa de inflação, estiver acima da meta de inflação, deve se elevar a taxa de juros nominal, no caso brasileiro, a taxa Selic, superior à taxa neutra, afim de reduzir a inflação no futuro. Dessa forma, a taxa neutra funciona como um guia para as decisões do Banco Central na calibragem da política monetária, como pode ser visto em Clarida et al(1999)[3].

Embora a taxa neutra seja amplamente utilizada na formulação da política monetária, sua relevância vai além do âmbito dos bancos centrais. Para analistas financeiros, traders e gestores de fundos, compreender a taxa de juros neutra é essencial para a tomada de decisões estratégicas, no entanto, métodos tradicionais de estimação da taxa neutra, como modelos DSGE (Dynamic Stochastic General Equilibrium) ou VARs estruturais (Vector Autoregression), muitas vezes são inacessíveis para profissionais do mercado financeiro, pois exigem calibração frequente, longos períodos de tempo e suposições subjetivas sobre parâmetros econômicos.

Diante dessas dificuldades, o uso de filtros estatísticos, como o filtro de Kalman, usado no trabalho de Laubach e Williams(2003)[8], o filtro de Hodrick-Prescott (HP) e a suavização exponencial Holt-Winters, emerge como uma abordagem mais prática para estimar a taxa neutra em tempo real. Esses métodos permitem capturar tendências latentes e filtrar ruídos da série temporal, tornando-se ferramentas úteis para agentes do mercado financeiro que necessitam de estimativas rápidas e adaptáveis às condições de mercado.

Tendo em vista a explicação de Nielsen (2019)[9], o Filtro de Kalman é um método estatístico amplamente utilizado para estimar variáveis não observáveis em processos dinâmicos, combinando previsões baseadas em modelos com observações ruidosas. Esse filtro foi aplicado inicialmente em missões do projeto Apollo na exploração lunar, onde os engenheiros da NASA perceberam que os recursos computacionais a bordo eram limitados para técnicas mais intensivas em memória. Sua principal vantagem reside na capacidade de atualização recursiva das estimativas sem a necessidade de armazenar grandes quantidades de dados passados, tornando-se um método eficiente para modelagem de séries temporais.

O Filtro de Hodrick-Prescott (HP), por sua vez, foi originalmente proposto por Whittaker (1923)[11] e ganhou notoriedade após os trabalhos de Hodrick e Prescott (1997)[5]. Este filtro é um caso especial de um Spline de suavização (Smoothing Spline) e é amplamente

empregado em macroeconomia para separar tendências de longo prazo das flutuações de curto prazo em séries temporais econômicas. Ao minimizar uma função de penalização baseada na segunda diferença da série, o Filtro HP permite extrair um componente suavizado da série temporal, ajudando na identificação de ciclos econômicos e na análise de políticas monetárias.

Por fim, a Suavização Exponencial Holt-Winters teve suas estruturas fundamentais propostas por C. C. Holt (1957)[7] e seu aluno Peter Winters (1960)[4][10]. Essa técnica se diferencia da média móvel simples ao atribuir pesos exponencialmente decrescentes às observações passadas, permitindo uma maior adaptação a padrões de tendência e sazonalidade. Esse método é amplamente utilizado para previsão de séries temporais devido à sua capacidade de responder rapidamente a mudanças estruturais nos dados.

No entanto, a escolha do método adequado para a estimação da taxa neutra depende das características específicas dos dados e dos objetivos da análise. Enquanto o Filtro de Kalman permite capturar mudanças dinâmicas na estrutura da taxa neutra, o Filtro HP é amplamente utilizado para extrair tendências de longo prazo, e a Suavização Exponencial fornece uma abordagem mais simples para modelar padrões persistentes. Assim, uma abordagem combinada pode oferecer uma visão mais robusta da taxa neutra, equilibrando rigor estatístico e aplicabilidade prática no contexto do mercado financeiro.

No mercado financeiro, o Filtro de Kalman é útil pois permite que traders e analistas monitorem a evolução da taxa neutra em tempo real, ajustando posições de investimento conforme mudanças estruturais ocorrem na economia. Já o filtro HP pode vir ser utilizado como uma referência rápida para identificar tendências de longo prazo nos juros, facilitando comparações com as condições atuais da política monetária. E a Suavização Exponencial é utilizada para extrair uma tendência subjacente da taxa real ex-ante, permitindo uma interpretação dinâmica do comportamento da taxa neutra ao longo do tempo.

Para traders e analistas financeiros, a abordagem mais interessante pode ser combinar esses métodos permitindo uma visão mais robusta da dinâmica da taxa neutra. Em um ambiente de mercado volátil, um trader pode utilizar o Filtro de Kalman para monitoramento em tempo real, o filtro HP para um referencial de longo prazo e a Suavização Exponencial para ajustes táticos de curto prazo.

Tabela 1: Comparação e Aplicabilidade dos Métodos no Mercado Financeiro

Método	Vantagens	Limitações
Filtro de Kalman	Adaptativo, permite modelagem de variáveis latentes	Exige parametrização e conhecimento estatístico avançado
Filtro de Hodrick-Prescott	Simples e amplamente utilizado	Problema de borda e sensível ao parâmetro λ
Suavização Exponencial Holt-Winters	Responde rapidamente a mudanças estruturais	Depende da calibração dos parâmetros α, β

Portanto, a aplicação dessas metodologias estatísticas não apenas permite uma melhor compreensão da taxa de juros neutra, mas também viabiliza decisões estratégicas.

2.1 Relevância da Estimação da Taxa Neutra para o Mercado Financeiro

A estimativa da taxa de juros neutra não é apenas uma referência teórica para formuladores de política monetária, mas também uma ferramenta essencial para traders, gestores de fundos e analistas do mercado financeiro. O conhecimento da taxa neutra permite avaliar se a política monetária está em território restritivo ou expansionista, influenciando decisões sobre alocação de ativos, estratégias de hedge e precificação de derivativos.

Gestores de Fundos podem utilizar a taxa neutra para calibrar suas estratégias de alocação de portfólio e avaliar riscos de juros. Traders ajustam posições de renda fixa com base em desvios entre a taxa neutra estimada e a taxa real observada. Economistas, analistas de Macro monitoram a taxa neutra para antecipar mudanças nas diretrizes do Banco Central e reprecificar ativos.

Dessa forma, a escolha da metodologia estatística para estimar a taxa neutra pode impactar diretamente as estratégias do mercado financeiro. Métodos como o Filtro de Kalman são mais responsivos a mudanças na estrutura da economia, enquanto o Filtro de Hodrick-Prescott é útil para análises de longo prazo, e a Suavização Exponencial Holt-Winters pode ser adequada para ajustes táticos.

3 Formulação Matemática dos Filtros Estatísticos

3.1 Filtro de Kalman

O Filtro de Kalman pode ser representado por um modelo de espaço de estado, onde:

$$x_t = x_{t-1} + v_t, \quad v_t \sim N(0, Q) \tag{1}$$

$$y_t = x_t + w_t, \quad w_t \sim N(0, R) \quad (2)$$

onde x_t representa a taxa neutra latente e y_t é a taxa real ex-ante observável. O termo Q são variâncias do ruído e regula a variabilidade da tendência, enquanto R reflete a incerteza das observações.

3.2 Filtro de Hodrick-Prescott (HP)

O Filtro HP separa a série original y_t em uma componente de tendência g_t e um componente cíclico, resolvendo o seguinte problema de minimização:

$$\min_{g_t} \sum_{t=1}^T (y_t - g_t)^2 + \lambda \sum_{t=2}^{T-1} [(g_{t+1} - g_t) - (g_t - g_{t-1})]^2 \quad (3)$$

onde λ é o parâmetro de suavização. Para séries mensais, um valor comum é $\lambda = 14.400$.

3.3 Suavização Exponencial Holt-Winters

O modelo Holt-Winters é baseado nas seguintes equações:

$$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \quad (4)$$

$$b_t = \beta(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (5)$$

$$y_t = l_t + b_t + \epsilon_t \quad (6)$$

onde l_t representa o nível suavizado da série, b_t é a tendência estimada, e α , β são parâmetros de suavização.

4 Análise de Dados

Os dados mensais que compõe este artigo são séries temporais que compreendem o período de janeiro de 2014 até dezembro de 2024. Os dados utilizados no estudo foram obtidos do Banco Central do Brasil [1].

As principais variáveis utilizadas na análise incluem:

1. Taxa SELIC Mensal: Representa a taxa básica de juros da economia brasileira, definida pelo Comitê de Política Monetária (COPOM) do Banco Central do Brasil. É um dos principais instrumentos de política monetária e serve de referência para a precificação de ativos e operações de crédito.
2. Inflação Esperada (5 e 30 dias úteis): Mediana das expectativas de inflação medida a partir das projeções do mercado financeiro, com diferentes horizontes de previsão. Essas expectativas são fundamentais para estimar a taxa de juros real ex-ante.

3. Taxa Real Ex-Ante (5 e 30 dias úteis): Calculada como a diferença entre a taxa SELIC e a inflação esperada, reflete a taxa de juros ajustada pelas expectativas de mercado, sendo um indicativo relevante para decisões de investimento.

O gráfico abaixo representa a evolução da Taxa SELIC mensal ao longo do período analisado. Alguns pontos de destaque: a taxa permaneceu constante em 0,65 p.p. por um longo período. Entre 2014 e 2015, observa-se um ajuste gradual para 0,66 p.p. A partir de 2024, houve um novo aumento, estabilizando-se em 0,67 p.p..



Figura 1: Evolução da Taxa SELIC Mensal

A Taxa SELIC é um referencial importante para o custo do dinheiro e serve de base para operações no mercado financeiro. Alterações na SELIC impactam diretamente a curva de juros, influenciando a precificação de ativos, decisões de investimento e expectativas inflacionárias.

As estatísticas descritivas (média, mediana, desvio padrão, valores máximos e mínimos, quartis e percentis) estão apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 2: Estatísticas Descritivas das Variáveis

Variável	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	P5	P95
Taxa Real Ex-Ante (5d)	0.192	0.230	0.368	-0.730	1.300	-0.040	0.380	-0.444	0.750
Taxa Real Ex-Ante (30d)	0.004	0.000	0.027	-0.100	0.100	-0.010	0.020	-0.039	0.050
SELIC Mensal	0.660	0.660	0.0046	0.650	0.670	0.660	0.660	0.650	0.670
Inflação Esperada (5d)	0.468	0.430	0.367	-0.640	1.380	0.280	0.700	-0.090	1.100
Inflação Esperada (30d)	0.464	0.430	0.355	-0.650	1.400	0.275	0.685	-0.089	1.080

Fonte: Elaboração própria com base nos dados utilizados no estudo.

A taxa real ex-ante (5 dias úteis) apresenta uma média próxima de 0,19 p.p. ao mês, com um desvio padrão de aproximadamente 0,36 pontos percentuais, sugerindo variações expressivas ao longo do tempo. Seu primeiro quartil (Q1) é de -0,04 p.p., indicando que

em 1/4 das observações, a taxa esteve abaixo desse nível, enquanto o terceiro quartil (Q3) é de 0,38 p.p., refletindo uma concentração das observações dentro desse intervalo.

A taxa SELIC mensal exibe uma baixa dispersão, com um desvio padrão de 0,0046 pontos percentuais, indicando estabilidade na política monetária ao longo do período analisado. Em contrapartida, a inflação esperada (5 dias úteis) apresenta uma variação significativa, evidenciada por seu desvio padrão de 0,36 pontos percentuais, demonstrando oscilações nas expectativas inflacionárias do mercado.

Tabela 3: Estatísticas Descritivas das Variáveis Analisadas

Variável	Assimetria	Curtose
Taxa Real Ex-Ante (5d)	-0.077	3.440
Taxa Real Ex-Ante (30d)	0.138	5.610
SELIC Mensal	-0.114	4.699
Inflação Esperada (5d)	0.070	3.445
Inflação Esperada (30d)	0.031	3.495

Sobre a assimetria, um valor positivo indica uma cauda mais longa à direita (assimetria à direita), enquanto um valor negativo sugere uma cauda mais longa à esquerda (assimetria à esquerda). No caso da Taxa Real Ex-Ante (5d), a assimetria é ligeiramente negativa (-0.077), o que sugere uma distribuição um pouco inclinada para a esquerda. Por outro lado, a Taxa Real Ex-Ante (30d) apresenta uma assimetria positiva (0.138), indicando que a cauda direita da distribuição é mais pronunciada.

Já para a curtose, os resultados mostram que a Taxa Real Ex-Ante (30d) possui curtose de 5.61, enquanto a Taxa Real Ex-Ante (5d) apresenta um valor menor (3.44), mas ainda acima de 3, sugerindo que ambas as variáveis possuem caudas relativamente pesadas e podem ser influenciadas por eventos extremos.

A Taxa SELIC Mensal, apresenta assimetria ligeiramente negativa (-0.114) e curtose de 4.699. Já as variáveis de Inflação Esperada (5d e 30d) mostram um comportamento mais simétrico, com assimetrias próximas de zero (0.070 e 0.031, respectivamente) e curtoses em torno de 3.4, indicando que seus valores seguem uma distribuição relativamente concentrada, porém com caudas levemente pesadas.

Esses resultados são importantes porque distribuições com caudas mais pesadas podem indicar maior propensão a choques inesperados, o que é relevante para a modelagem da taxa neutra e para a formulação de estratégias de hedge e tomada de decisão no mercado financeiro. A presença de assimetria e alta curtose sugere que modelos estatísticos robustos devem ser empregados para capturar corretamente as dinâmicas das variáveis analisadas, justificando a aplicação dos filtros estatísticos utilizados neste estudo.

A Taxa Real Ex-Ante de 5 dias úteis exibe uma série temporal altamente volátil, com períodos de forte oscilação e picos expressivos. Podemos observar que, ao longo dos anos, há momentos de elevação e quedas acentuadas, o que pode estar relacionado a choques econômicos, decisões de política monetária ou mudanças na percepção dos agentes de mer-

cado em relação às expectativas inflacionárias. A volatilidade parece se intensificar em determinados períodos, indicando possíveis episódios de instabilidade macroeconômica.

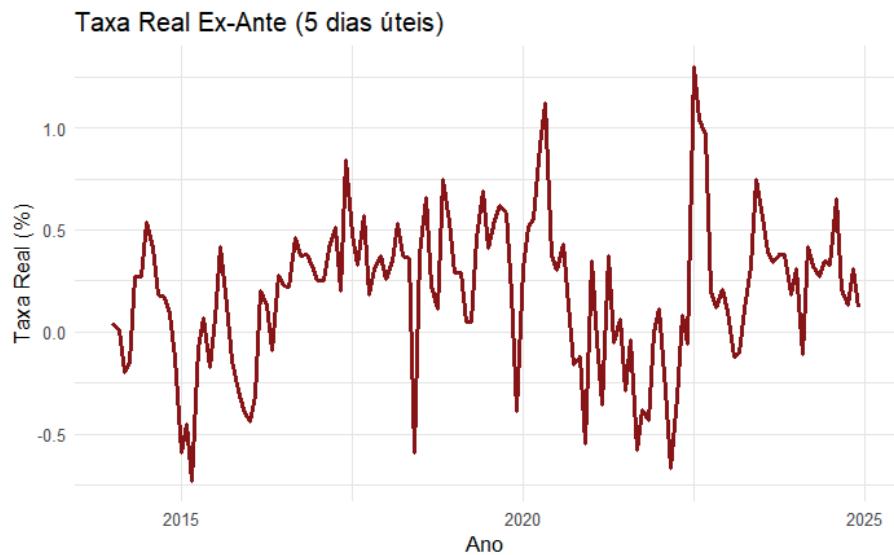


Figura 2: Evolução da Taxa Real Ex-Ante (5 dias úteis)

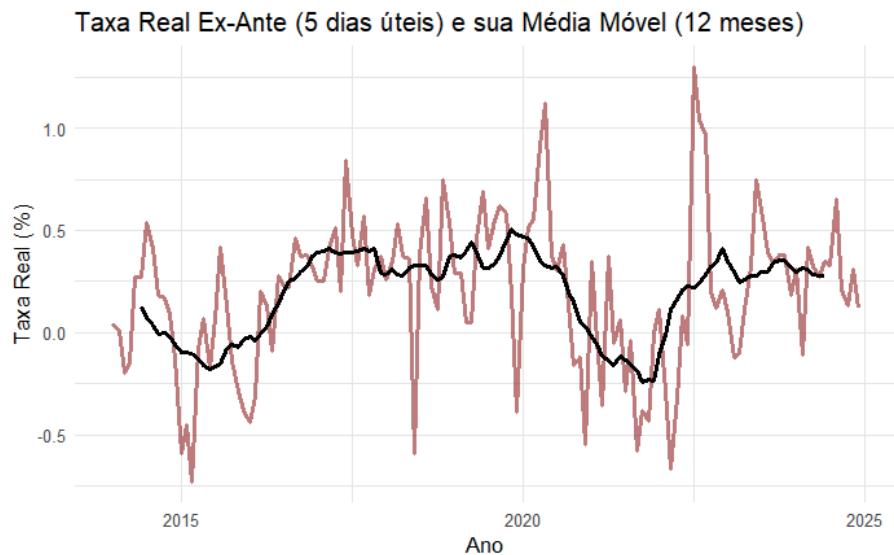


Figura 3: Evolução da Taxa Real Ex-Ante (5 dias úteis) e sua Média Móvel (12 meses)

A figura acima, exibe a evolução da Taxa Real Ex-Ante (5 dias úteis) ao longo do tempo, acompanhada de uma média móvel de 12 meses (linha preta) que suaviza as flutuações de curto prazo.

Observa-se que a taxa real ex-ante apresenta uma elevada volatilidade, com oscilações

expressivas ao longo dos anos.

A média móvel permite identificar tendências subjacentes na série, evidenciando períodos de alta e baixa persistentes. Destacam-se os seguintes padrões: entre 2015 e 2019, a taxa real ex-ante apresentou momentos de estabilização e crescimento moderado. A partir de 2020, houve uma intensificação da volatilidade, refletindo possivelmente os efeitos da pandemia e das respostas da política monetária. Em períodos mais recentes, a taxa parece convergir para níveis próximos da neutralidade, mas ainda apresenta oscilações.

Esse tipo de análise é essencial para traders e analistas de mercado, pois a média móvel auxilia na identificação de tendências estruturais e pode servir como um indicativo do comportamento da taxa neutra ao longo do tempo.

Taxa Real Ex-Ante vs. Inflação Esperada (5 dias úteis)

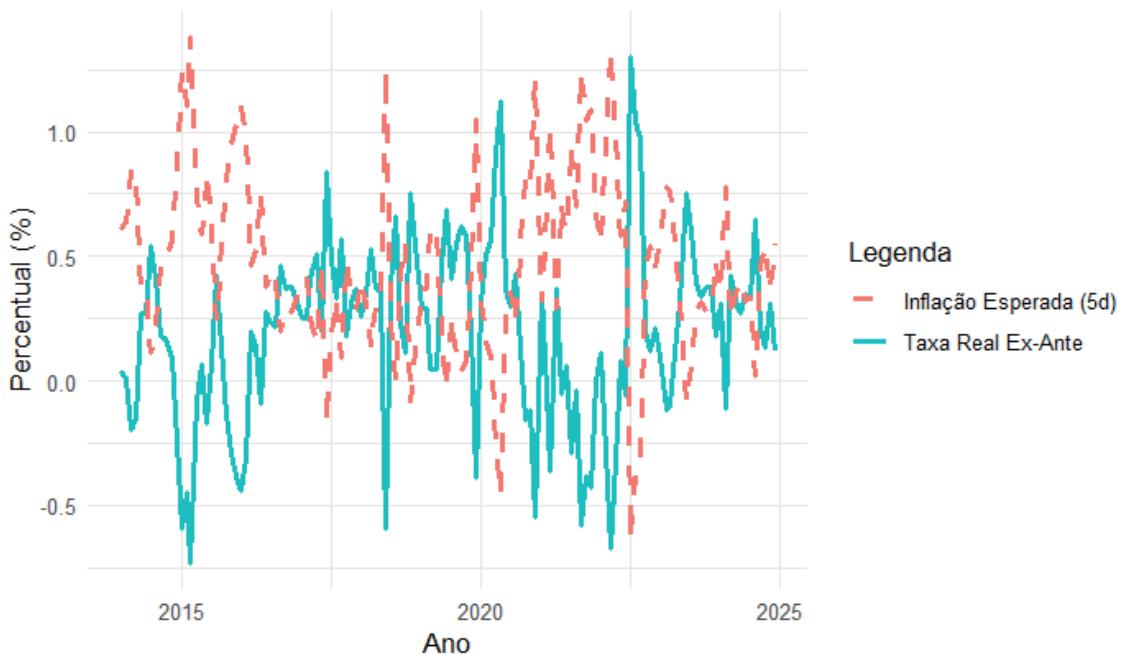


Figura 4: Comparação entre a Taxa Real Ex-Ante (5 dias úteis) e a Inflação Esperada (5 dias úteis)

O gráfico acima ilustra a relação entre a Taxa Real Ex-Ante (5 dias úteis) (linha azul) e a Inflação Esperada para 5 dias úteis (linha vermelha tracejada). Esse comparativo é fundamental para avaliar como as expectativas de inflação afetam a percepção da taxa real ao longo do tempo.

Em diversos períodos, nota-se que a inflação esperada oscila com certa independência da taxa real ex-ante, indicando momentos de desalinhamento entre expectativas inflacionárias e política monetária. Durante 2020-2022, há um aumento na volatilidade de ambas as séries, refletindo incertezas macroeconômicas e prováveis choques econômicos. A taxa real ex-ante tende a reagir às variações da inflação esperada, reforçando sua relação com as

expectativas de mercado.

O teste de Dickey-Fuller aplicado à taxa real ex-ante revelou que a série é estacionária reforçando a adequação das metodologias de filtragem utilizadas na análise. Isso significa que os filtros (Filtro de Kalman, Filtro HP e Suavização Exponencial) podem ser aplicadas sem a necessidade de diferenciação prévia da série.

Tabela 4: Teste de Dickey-Fuller para Estacionariedade da Taxa Real Ex-Ante (5d)

Estatística	Valor
Estatística Dickey-Fuller	-3.8395
Ordem do Lag	5
p-valor	0.01927
Hipótese alternativa	Série estacionária

Essas estatísticas iniciais e os testes estatísticos fornecem um panorama da estrutura dos dados e subsidiam a aplicação dos filtros estatísticos para estimação da taxa neutra. Nos próximos passos, analisaremos a dinâmica temporal das variáveis e a comparação entre os diferentes métodos de estimação da taxa de juros neutra.

5 Metodologia

A seguir, detalhamos a implementação de cada um desses métodos e os resultados obtidos com sua aplicação à Taxa Real Ex-Ante de 5 dias úteis.

5.1 Justificativa para o Horizonte de 5 Dias

A escolha da taxa real ex-ante com horizonte de 5 dias úteis fundamenta-se na necessidade de capturar as expectativas de curto prazo do mercado financeiro. Enquanto a taxa de 30 dias reflete projeções mais amplas, a taxa de 5 dias está mais alinhada com o comportamento dos traders e gestores de ativos, que frequentemente ajustam suas posições em função de choques macroeconômicos e anúncios de política monetária.

Além disso, em períodos de maior volatilidade, como durante crises financeiras, decisões de investimento precisam ser tomadas com base em projeções que consideram mudanças rápidas nos fundamentos econômicos. Assim, a taxa real ex-ante de 5 dias se mostra mais responsiva e aplicável para uma análise dinâmica da taxa neutra no contexto de mercado.

5.2 Filtro de Kalman: Modelagem Estocástica da Taxa Neutra

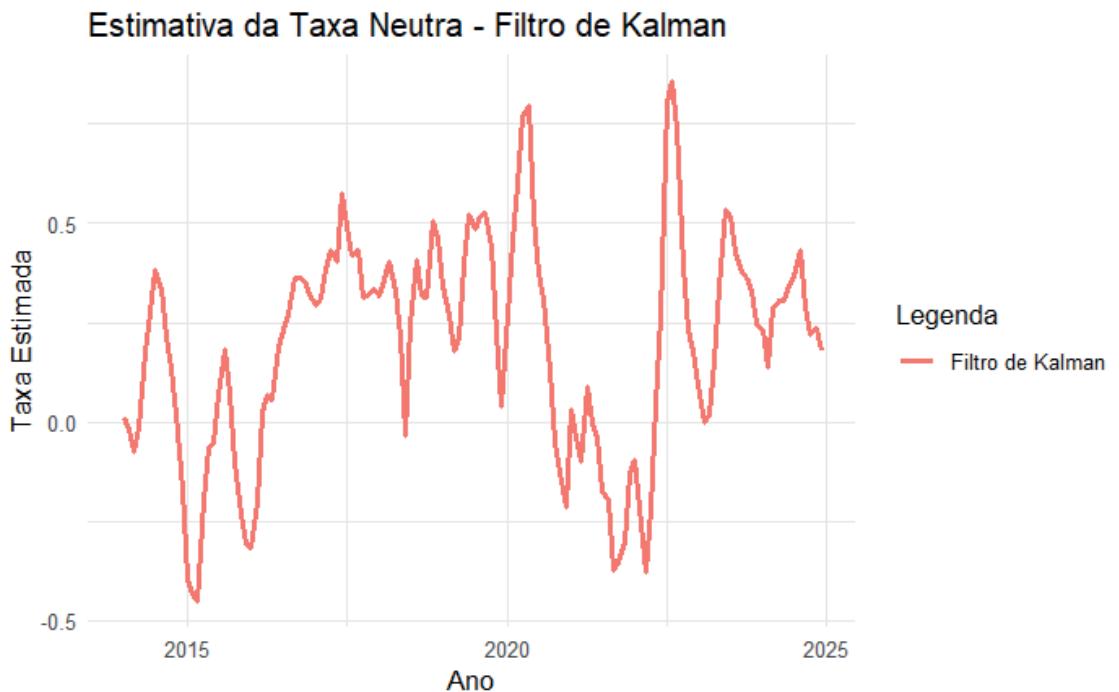


Figura 5: Estimativa da Taxa Neutra - Filtro de Kalman

A figura acima apresenta a estimativa da taxa neutra utilizando o Filtro de Kalman. Esse método é amplamente reconhecido por sua capacidade de adaptação a mudanças estruturais e por permitir uma modelagem dinâmica da taxa de juros neutra ao longo do tempo.

Os resultados mostraram que o Filtro de Kalman apresentou a maior suavização entre os métodos, reduzindo oscilações bruscas da Taxa Real Ex-Ante e capturando tendências mais persistentes. Além disso, o coeficiente de autocorrelação da série filtrada foi alto ($\rho \approx 0.88$), indicando uma evolução relativamente estável da taxa estimada ao longo do tempo.

- **Dinâmica da Taxa Neutra:** O gráfico demonstra uma estimativa que se ajusta rapidamente a variações na economia, refletindo tanto períodos de estabilidade quanto momentos de maior volatilidade.
- **Reação a Choques Econômicos:** Observa-se uma resposta imediata do Filtro de Kalman a eventos como as crises de 2015-2016 e 2020-2022, onde há picos e quedas abruptas. Isso indica que esse método é eficiente para capturar mudanças estruturais e choques na economia.
- **Suavização e Ruído:** Diferentemente de outros métodos, o Filtro de Kalman não impõe uma suavização excessiva à série, permitindo que as flutuações sejam mantidas. Isso pode ser vantajoso para traders e analistas que buscam capturar mudanças rápidas na taxa neutra para tomar decisões ágeis no mercado financeiro.

- **Aplicabilidade:** No contexto do mercado financeiro, a estimativa da taxa neutra via Filtro de Kalman pode ser utilizada para antecipar movimentos da política monetária e ajustar estratégias de investimento conforme as mudanças de ciclo econômico.

Dessa forma, o Filtro de Kalman se destaca como um método flexível e dinâmico, sendo uma ferramenta útil para modelar a taxa neutra em ambientes de incerteza e volatilidade.

5.3 Filtro de Hodrick-Prescott: Extração da Tendência Suavizada

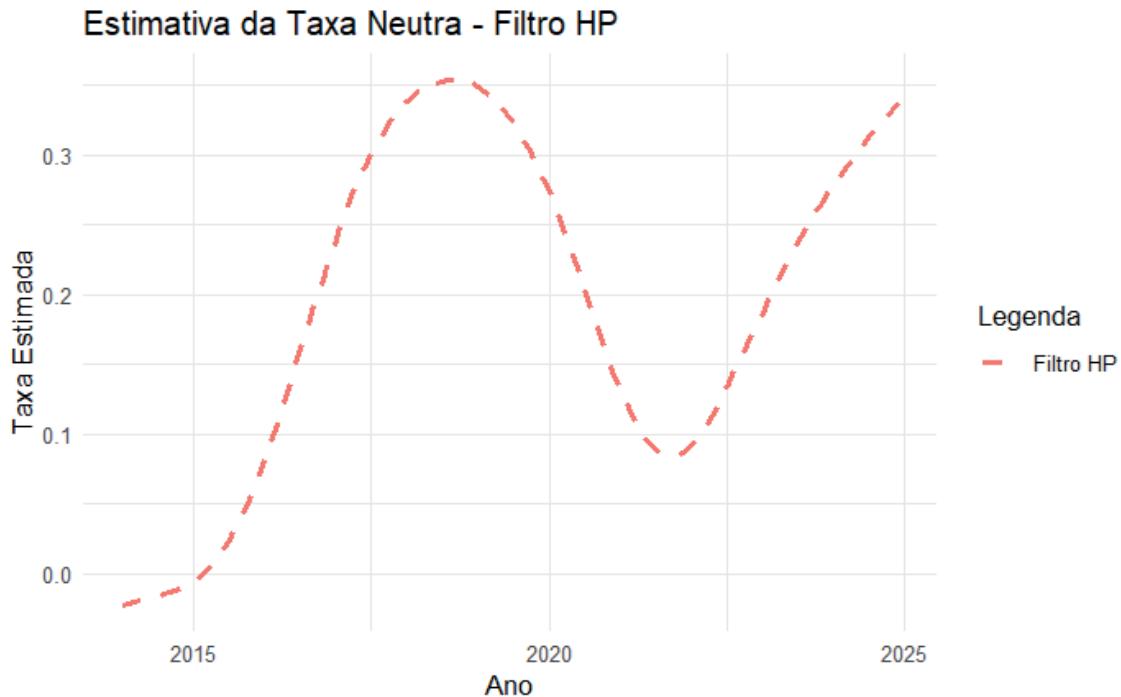


Figura 6: Estimativa da Taxa Neutra - Filtro HP

A figura acima exibe a estimativa da taxa neutra utilizando o Filtro de Hodrick-Prescott (HP). Esse método é amplamente empregado para decompor séries temporais em seus componentes de tendência e ciclo.

A aplicação do filtro HP apresentou uma taxa neutra menos volátil do que a série original, mas mais sensível a oscilações do que o Filtro de Kalman. A autocorrelação da série filtrada foi a mais alta ($\rho \approx 0.98$), indicando um ajuste extremamente suave. Esse resultado sugere que o HP preserva melhor as tendências de longo prazo, mas pode subestimar choques de mercado.

- **Suavização da Série:** O Filtro HP produz uma estimativa muito mais suave da taxa neutra em comparação com o Filtro de Kalman. Isso significa que ele é eficiente para captar tendências de longo prazo, minimizando oscilações de curto prazo.

- **Sensibilidade ao Parâmetro λ :** A suavidade da estimativa é altamente influenciada pelo valor de λ . Para séries mensais, utilizamos $\lambda = 14.400$, que equilibra a resposta cíclica e a suavização da tendência.
- **Tendência de Longo Prazo:** O gráfico sugere que a taxa neutra apresentou um crescimento sustentado até meados de 2018, seguido por uma redução até 2022, com posterior retomada da alta. Essa dinâmica pode refletir mudanças estruturais na economia, como alterações na política monetária e na percepção do prêmio de risco.
- **Problema de Borda:** Um dos principais desafios do Filtro HP é a sua sensibilidade às extremidades da amostra. Como observado no gráfico, os valores mais recentes podem sofrer distorções devido à ausência de observações futuras para cálculo da tendência.
- **Aplicabilidade:** No contexto do mercado financeiro, essa estimativa pode ser útil para identificar a trajetória da taxa neutra ao longo do tempo, servindo como referência para estratégias de investimento e precificação de ativos.

Embora o Filtro HP ofereça uma interpretação clara da tendência da taxa neutra, sua principal limitação é a falta de resposta a choques econômicos de curto prazo. Dessa forma, ele pode ser complementado por métodos mais dinâmicos, como o Filtro de Kalman.

5.4 Suavização Exponencial Holt-Winters: Captura de Movimentos Recentes

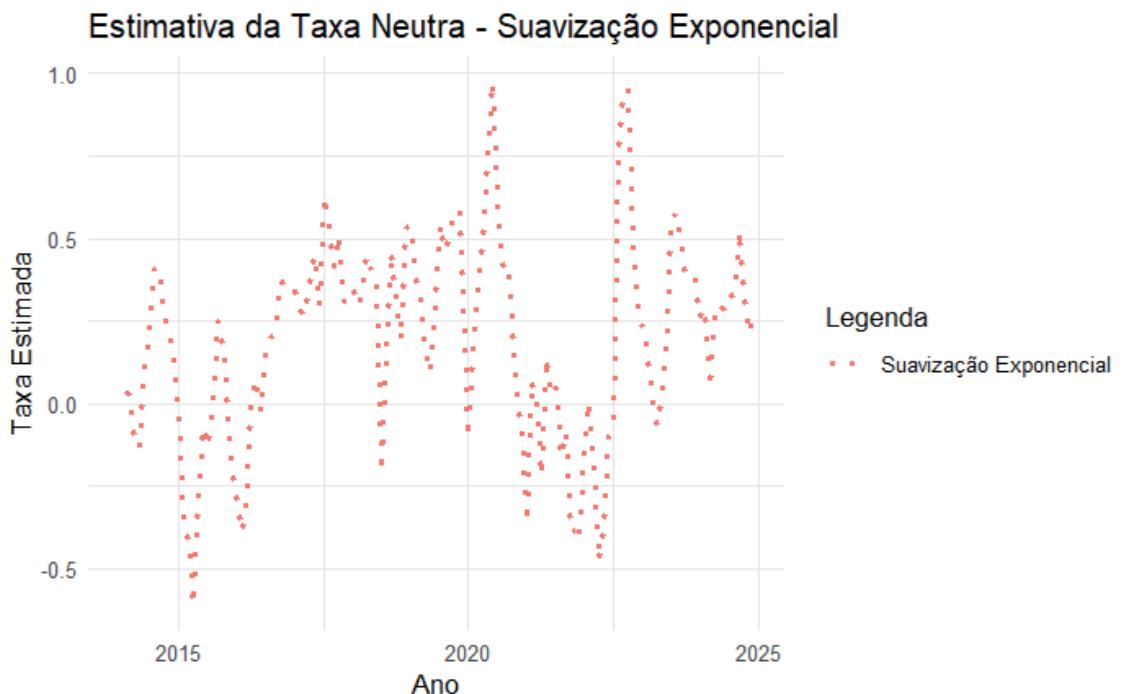


Figura 7: Estimativa da Taxa Neutra - Suavização Exponencial

A figura acima apresenta a estimativa da taxa neutra utilizando a Suavização Exponencial Holt-Winters. Este método é amplamente aplicado para capturar padrões de tendência e sazonalidade em séries temporais.

A autocorrelação da série suavizada foi a menor ($\rho \approx 0.79$), reforçando a ideia de que esse método capta movimentos mais voláteis. Isso pode ser útil para traders que buscam ajustes rápidos nas expectativas de mercado, mas pode resultar em um comportamento mais instável da estimativa da taxa neutra.

- **Alta Sensibilidade a Mudanças:** A suavização exponencial confere pesos mais elevados às observações mais recentes, permitindo que a taxa neutra reaja rapidamente a novas informações do mercado.
- **Ruído e Oscilações:** Diferentemente dos outros métodos, a suavização exponencial apresenta uma maior volatilidade na estimativa, o que pode indicar uma resposta rápida a choques econômicos de curto prazo, mas também pode introduzir ruído excessivo.
- **Impacto da Escolha dos Parâmetros α e β :** Os parâmetros de suavização α e β determinam a influência das observações passadas e a suavidade da tendência. Ajustes inadequados podem resultar em um comportamento altamente errático da estimativa.
- **Aplicabilidade no Mercado Financeiro:** No contexto de trading e gestão de ativos, essa abordagem pode ser útil para identificar **mudanças abruptas** na taxa neutra e avaliar a dinâmica de curto prazo das taxas de juros.

Embora a Suavização Exponencial ofereça a vantagem de captar mudanças estruturais rapidamente, sua instabilidade e sensibilidade aos parâmetros podem comprometer sua confiabilidade para análises de longo prazo. Portanto, pode ser mais adequada quando combinada com métodos mais robustos, como o Filtro de Kalman.

5.5 Comparação dos Métodos

Os três filtros apresentaram características distintas, e não há um único método ideal, mas sim diferentes formas de interpretar a taxa neutra:

- O Filtro de Kalman gerou uma estimativa estável e robusta, sendo útil para interpretações macroeconômicas e formulação de política monetária.
- O Filtro HP apresentou a estimativa mais suave e de longo prazo, útil para análises estruturais da taxa neutra.
- A Suavização Exponencial Holt-Winters capturou movimentos rápidos da taxa real ex-ante, sendo um método adequado para análises mais dinâmicas.

A tabela abaixo mostra os resultados dos testes: Shapiro-Wilk e o Teste t pareado e Wilcoxon

Tabela 5: Testes Estatísticos de Normalidade e Diferença Entre Métodos

Teste	Estatística	p-valor
Shapiro-Wilk (Kalman)	0.9759	0.0191**
Shapiro-Wilk (HP Filter)	0.9235	1.45e-6
Teste t Pareado (Kalman vs HP)	-3.64e-16	1.0000
Teste de Wilcoxon (Kalman vs HP)	4359.0	0.9466

5.6 Interpretação dos Testes Estatísticos

Os testes estatísticos foram aplicados para avaliar as propriedades das séries e garantir a adequação dos métodos empregados. O teste de Shapiro-Wilk revelou que as distribuições das taxas neutras estimadas não seguem uma distribuição normal, o que indica que métodos tradicionais baseados na normalidade podem não ser os mais apropriados para modelar a série.

O teste t pareado não encontrou diferenças estatisticamente significativas entre as estimativas do Filtro de Kalman e do Filtro HP, sugerindo que, em termos médios, ambos fornecem resultados próximos. No entanto, a análise da variabilidade das séries mostra que o Filtro HP gera uma estimativa mais suave, enquanto o Filtro de Kalman captura melhor oscilações de curto prazo.

Já o teste de Wilcoxon, ao avaliar a distribuição das diferenças entre os métodos, corroborou os achados do teste t, indicando que não há um método significativamente superior. Isso reforça a necessidade de combinar os filtros estatísticos dentro de uma abordagem de "caixa de ferramentas" para uma estimativa mais robusta da taxa neutra.

Embora o p-valor do teste de normalidade (Shapiro-Wilk) sobre a série filtrada por Kalman seja numericamente semelhante ao p-valor do teste de Dickey-Fuller aplicado à série original, os testes são distintos e essa semelhança se deve a uma coincidência estatística, não sendo indicativo de relação direta. O que ocorreu foi uma coincidência numérica estatística, em que o p-valor do teste de normalidade sobre a série filtrada por Kalman acabou se aproximando bastante do p-valor do teste ADF aplicado à série original. E isso pode acontecer — principalmente quando as séries são correlacionadas ou derivadas entre si, como é o caso aqui (a série filtrada é obtida a partir da original).

Volatilidade Móvel da Taxa Real Ex-Ante (12 meses)



Figura 8: Volatilidade Móvel da Taxa Real Ex-Ante (12 meses)

A Figura 8 apresenta a volatilidade móvel da Taxa Real Ex-Ante calculada com uma janela de 12 meses, capturando a variação do desvio-padrão ao longo do tempo. Alguns pontos de destaque:

- **2014-2016:** A volatilidade se mantém relativamente estável, mas com algumas oscilações que podem estar associadas a mudanças no ambiente macroeconômico ou expectativas de política monetária.
- **2018-2020:** Observa-se uma queda na volatilidade, indicando um período de maior previsibilidade da taxa real ex-ante.
- **2020-2022:** Há picos acentuados de volatilidade, sugerindo momentos de forte incerteza no mercado, possivelmente relacionados à pandemia da COVID-19 e suas implicações na política monetária.
- **2023-2024:** A volatilidade volta a cair, mas ainda mantém certa flutuação, o que pode refletir ajustes no mercado financeiro conforme novas expectativas inflacionárias se consolidam.

O comportamento da volatilidade ao longo do tempo pode fornecer insights valiosos para traders e analistas financeiros, auxiliando na calibração de modelos de risco e na definição de estratégias de investimento.

Comparação da Taxa Real Ex-Ante com as Estimativas da Taxa Neutra

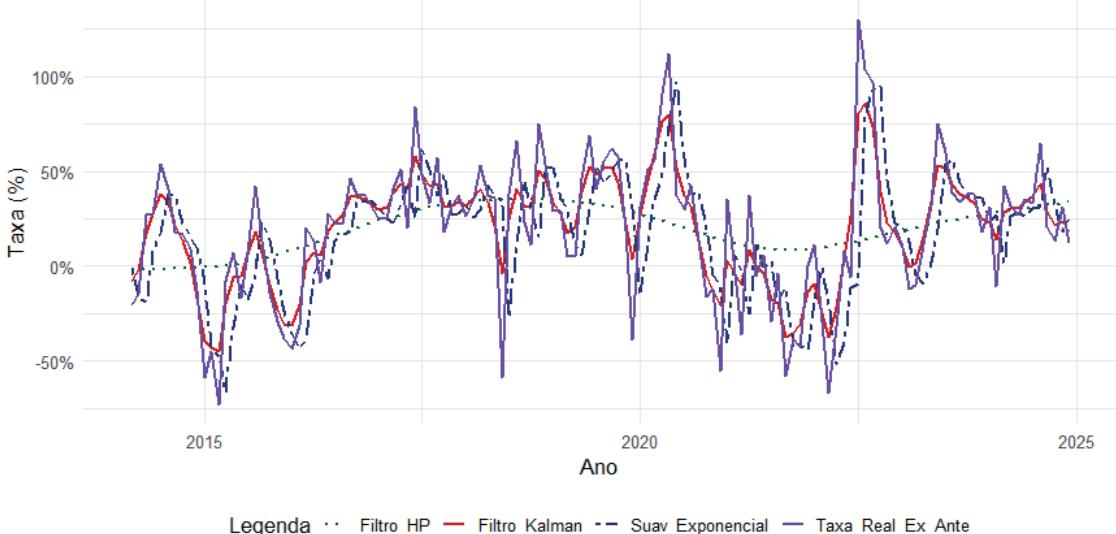


Figura 9: Comparação das Estimativas da Taxa Neutra

A Figura 9 apresenta as diferentes estimativas da taxa neutra, obtidas a partir dos três métodos de filtragem estatística: Filtro de Kalman, Filtro de Hodrick-Prescott (HP) e Suavização Exponencial Holt-Winters. Essa análise permite avaliar as características individuais de cada método e sua aplicabilidade na identificação da dinâmica subjacente da taxa neutra.

- **Comportamento Geral:** As três estimativas seguem padrões semelhantes ao longo do tempo, indicando que os métodos são consistentes na identificação das tendências de longo prazo da taxa neutra. No entanto, algumas diferenças sutis aparecem, sobretudo nos períodos de maior volatilidade.
- **Respostas às Mudanças:**
 - O Filtro de Kalman (linha vermelha) apresenta uma resposta mais dinâmica e ajustável às variações da série, refletindo mudanças estruturais da economia com menor defasagem.
 - O Filtro HP (linha verde pontilhada) gera uma suavização mais acentuada da série, destacando a tendência de longo prazo e eliminando parte da variabilidade de curto prazo.
 - A Suavização Exponencial (linha azul pontilhada) equilibra as duas abordagens, apresentando uma resposta que captura tanto flutuações de curto prazo quanto a tendência de longo prazo.
- **Divergências Entre os Métodos:** Em momentos de alta volatilidade, como nos anos de 2015-2016 e 2020-2022, as diferenças entre as abordagens tornam-se mais evidentes:
 - O Filtro de Kalman ajusta-se rapidamente às variações extremas.

- O Filtro HP apresenta um padrão mais estável, demorando a refletir mudanças abruptas.
- A Suavização Exponencial responde de maneira intermediária, captando parte das oscilações, mas sem absorver ruídos excessivos.

Tabela 6: Estatísticas das Estimativas da Taxa Neutra

Método	Média	Desvio-Padrão	Autocorrelação (lag 1)
Filtro de Kalman	0.1917	0.2770	0.885
Filtro HP	0.1917	0.1213	0.980
Suavização Exp.	0.1911	0.3082	0.793

A Tabela 6 apresenta as estatísticas descritivas das estimativas da taxa neutra para os três métodos utilizados: Filtro de Kalman, Filtro de Hodrick-Prescott (HP) e Suavização Exponencial.

Média: Observa-se que as médias das três estimativas são muito próximas, situando-se em aproximadamente 0,19. Isso sugere que, independentemente da metodologia empregada, a taxa neutra estimada converge para valores semelhantes ao longo do tempo.

Desvio-Padrão: As diferenças mais significativas aparecem na dispersão das estimativas. O Filtro HP apresenta o menor desvio-padrão (0,1213), indicando uma estimativa mais estável e menos volátil ao longo do tempo. Já a Suavização Exponencial tem o maior desvio-padrão (0,3082), refletindo uma maior sensibilidade a mudanças recentes na série. O Filtro de Kalman, com um desvio-padrão intermediário (0,2770), ajusta-se bem às variações sem apresentar extrema volatilidade.

Autocorrelação de Primeira Ordem: A análise da autocorrelação de primeira ordem mostra que o Filtro HP tem a maior persistência na série (0,980), sugerindo uma estimativa muito suavizada e com inércia elevada. Isso pode tornar o método mais adequado para análises de longo prazo, mas menos responsivo a mudanças rápidas na economia. O Filtro de Kalman apresenta uma autocorrelação ligeiramente menor (0,885), indicando um ajuste dinâmico mais equilibrado. Por outro lado, a Suavização Exponencial tem a menor autocorrelação (0,793), evidenciando que a série gerada por esse método responde rapidamente às oscilações, o que pode introduzir mais ruído na estimativa.

Resumo: Diante dessas estatísticas, nota-se que cada metodologia oferece um balanço diferente entre suavização e resposta a choques econômicos. O Filtro HP proporciona uma estimativa muito estável, mas pode não captar mudanças estruturais em tempo hábil. O Filtro de Kalman equilibra bem suavização e reatividade, enquanto a Suavização Exponencial é mais responsiva, porém mais volátil.

5.7 Interpretação do Erro Quadrático Médio (MSE)

A Tabela 7 apresenta os valores do Erro Quadrático Médio (MSE) para cada uma das metodologias utilizadas na estimativa da taxa neutra. O MSE é uma métrica que mede a média dos erros quadráticos entre a taxa real ex-ante observada e as estimativas fornecidas por cada filtro. Valores menores indicam melhor desempenho preditivo, ou seja, menor discrepância entre o valor observado e o valor suavizado.

Tabela 7: Erro Quadrático Médio (MSE) das Estimativas da Taxa Neutra

Método de Estimação	MSE
Filtro de Kalman	0,02295
Filtro HP	0,11099
Suavização Exponencial (Holt-Winters)	0,10808

Observa-se que o Filtro de Kalman apresentou o menor MSE (0,02295), indicando maior capacidade de capturar a tendência subjacente da taxa real ex-ante em relação aos outros métodos. Os filtros de Hodrick-Prescott (HP) e a Suavização Exponencial de Holt-Winters tiveram MSEs significativamente maiores (em torno de 0,11 e 0,108, respectivamente), o que sugere menor aderência às oscilações da série original ou possível superajuste.

Esse resultado reforça a robustez do filtro de Kalman em ambientes com maior volatilidade ou ruído estocástico, como o caso da taxa real ex-ante brasileira no período analisado (2014–2024).

5.8 Limitações dos Métodos Aplicados

Embora a abordagem adotada neste artigo forneça flexibilidade na estimativa da taxa neutra, cada método apresenta limitações inerentes. O Filtro de Kalman depende fortemente da especificação dos parâmetros e da modelagem da equação de estado, o que pode introduzir viés caso as premissas do modelo não sejam adequadas. O Filtro de Hodrick-Prescott, por sua vez, sofre com o problema de borda, tornando a estimativa dos períodos mais recentes menos confiável e sensível à escolha do parâmetro λ . Já a Suavização Exponencial Holt-Winters apresenta um comportamento mais reativo às variações do mercado, o que pode resultar em maior volatilidade da estimativa e menor robustez em cenários de longo prazo.

Diante dessas limitações, a escolha do método mais apropriado depende do horizonte de análise e do objetivo do analista. Em aplicações práticas, recomenda-se a utilização combinada dessas metodologias, explorando as complementaridades entre suavização e sensibilidade às oscilações do mercado.

6 Conclusão

Este estudo propôs a estimativa da taxa neutra utilizando diferentes abordagens estatísticas, enfatizando a ideia de que não há um único método ideal. Ao invés de buscar um

modelo definitivo, esta pesquisa analisou a complementaridade entre três metodologias: o Filtro de Kalman, o Filtro de Hodrick-Prescott (HP) e a Suavização Exponencial Holt-Winters, ressaltando como cada uma dessas abordagens pode ser aplicada para diferentes propósitos no mercado financeiro.

Os resultados empíricos mostraram que os três métodos convergem para valores médios similares da taxa neutra, mas diferem em termos de volatilidade e persistência. O Filtro de Kalman destacou-se pela sua capacidade de adaptação dinâmica, tornando-se uma ferramenta útil para capturar mudanças estruturais ao longo do tempo. O Filtro HP, por sua vez, apresentou a estimativa mais suave, sendo adequado para análises de longo prazo e tendências macroeconômicas. Já a Suavização Exponencial Holt-Winters mostrou-se mais responsiva às variações recentes da série, o que pode ser vantajoso para traders que necessitam de ajustes rápidos em suas estratégias.

A principal contribuição deste artigo é demonstrar que a combinação dessas metodologias pode fornecer uma visão mais robusta da taxa neutra, unindo estabilidade, flexibilidade e sensibilidade às mudanças do mercado. Para analistas financeiros e formuladores de política monetária, essa abordagem permite calibrar estimativas conforme diferentes cenários e objetivos. Em termos práticos, um operador de mercado pode utilizar o Filtro de Kalman para capturar mudanças estruturais em tempo real, o Filtro HP como referência de longo prazo e a Suavização Exponencial para ajustes táticos.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a integração dessas técnicas com modelos de aprendizado de máquina, visando aumentar a adaptabilidade e precisão das estimativas. Além disso, a aplicação dessas metodologias em mercados emergentes pode fornecer insights adicionais sobre a dinâmica da taxa neutra em diferentes contextos econômicos.

Referências

- [1] BANCO CENTRAL DO BRASIL. SGS - Sistema Gerenciador de Séries Temporais, 2024. Acessado em: 21 jan. 2025.
- [2] BLINDER, A. S. *Bancos Centrais: teoria e prática*. Ed. 34, 1999.
- [3] CLARIDA, R., GALI, J., AND GERTLER, M. The science of monetary policy: a new keynesian perspective. *Journal of economic literature* 37, 4 (1999), 1661–1707.
- [4] GOODWIN, P., ET AL. The holt-winters approach to exponential smoothing: 50 years old and going strong. *Foresight* 19, 19 (2010), 30–33.
- [5] HODRICK, R. J., AND PRESCOTT, E. C. Postwar us business cycles: an empirical investigation. *Journal of Money, credit, and Banking* (1997), 1–16.
- [6] HOLSTON, K., LAUBACH, T., AND WILLIAMS, J. C. Measuring the natural rate of interest: International trends and determinants. *Journal of International Economics* 108 (2017), S59–S75.
- [7] HOLT, C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted averages, vol. 52. *Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, Pa, USA* (1957).
- [8] LAUBACH, T., AND WILLIAMS, J. C. Measuring the natural rate of interest. *Review of Economics and Statistics* 85, 4 (2003), 1063–1070.
- [9] NIELSEN, A. *Practical time series analysis: Prediction with statistics and machine learning*. O'Reilly Media, 2019.
- [10] PAIGE, R. L., AND TRINDADE, A. A. The hodrick-prescott filter: A special case of penalized spline smoothing.
- [11] WHITTAKER, E. T. On a new method of graduation. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society* 41 (1922), 63–75.
- [12] WICKSELL, K. *Interest and prices*. Ludwig von Mises Institute, 1936.