

Volatilidade em Rede: Conectando Petróleo, Petrobrás e VALE em Tempos de Crise

Networked Volatility: Linking Oil, Petrobrás and VALE in Times of Crisis

Volatilidad en Red: Conectando Petróleo, Petrobrás y VALE en Tiempos de Crisis

Autoria

Edimilson Costa Lucas

-  Universidade Presbiteriana Mackenzie
-  edimilson.lucas@mackenzie.br
-  <https://orcid.org/0000-0003-0533-6067>

Carlos Alberto Di Agustini

-  Strong Business School
-  agustini@fgvmail.br
-  <https://orcid.org/0000-0002-3075-5370>

Maria Augusta Pessoa Mauger Carbone

-  Universidade Presbiteriana Mackenzie
-  maugercarbone@gmail.com
-  <https://orcid.org/0009-0001-5770-6405>

Alan Guilhermino da Silva

-  Universidade Presbiteriana Mackenzie
-  alan.gsilva@sp.senac.br
-  <https://orcid.org/0009-0005-1496-8885>

RESUMO

Objetivo: Este estudo analisa a influência do preço internacional do petróleo sobre as ações da Petrobrás (PETR4) e da VALE (VALE3), considerando também o impacto do índice S&P 500, no período entre janeiro de 2021 e janeiro de 2023, marcado por eventos exógenos como a pandemia da COVID-19 e o conflito Rússia-Ucrânia. **Metodologia/abordagem:** A pesquisa utiliza dados diários obtidos via pacote yfR do Yahoo Finance e aplica a modelagem Vetor Autorregressivo (VAR), com testes ADF, KPSS, BIC, AIC e HQ para verificação da estacionariedade e seleção de defasagem. Adicionalmente, foram realizados testes de normalidade, autocorrelação e heterocedasticidade, bem como a técnica de Decomposição Generalizada da Variância do Erro de Previsão (GFEVD), conforme Diebold e Yilmaz (2012), para mensuração dos spillovers, além do teste de causalidade de Granger (1969). **Originalidade/relevância:** A originalidade está na aplicação do GFEVD a uma amostra recente e altamente volátil, com foco em empresas brasileiras estratégicas no mercado global de commodities. **Principais resultados:** O petróleo (CL1) influenciou 4,81% da variância de PETR4 e 7,72% da variância de VALE3 em um horizonte de 10 dias. O índice de spillover apresentou quedas durante os picos da COVID-19 e no início da guerra. **Contribuições teóricas/metodológicas:** O estudo evidencia a robustez do modelo VAR-GFEVD na análise de conectividade entre ativos. **Contribuições para a gestão:** Os resultados auxiliam investidores e gestores públicos a tomarem decisões em cenários de alta instabilidade externa.

Palavras-chave: spillover. vetor autorregressivo. GFEVD. preço do petróleo.

ABSTRACT

Goal: This study analyzes the influence of international oil prices on Petrobrás (PETR4) and VALE (VALE3) stocks, also considering the impact of the S&P 500 index from January 2021 to January 2023, a period marked by exogenous events such as the COVID-19 pandemic and the Russia-Ukraine conflict. **Methodology/approach:** The research uses daily data extracted via the yfR package from Yahoo Finance and applies a Vector Autoregressive (VAR) model, using ADF, KPSS, BIC, AIC, and HQ tests to check stationarity and determine lag selection. Additional tests of normality, autocorrelation, and heteroskedasticity were performed, along with the Generalized Forecast Error Variance Decomposition (GFEVD) method proposed by Diebold and Yilmaz (2012) to measure spillovers, and Granger causality testing (1969). **Originality/relevance:** The study's originality lies in applying GFEVD to a recent and globally volatile sample, focusing on key Brazilian companies in the international commodities market. **Main results:** Oil (CL1) influenced 4.81% of PETR4 and 7.72% of VALE3 variance over a 10-day horizon. The spillover index dropped during COVID-19 peaks and the start of the war, indicating temporary disruptions. **Theoretical/methodological contributions:** The findings support the VAR-GFEVD model as a robust tool for analyzing asset interconnectivity. **Managerial contributions:** Results offer guidance for investors and policymakers in understanding how Brazilian stocks respond to external shocks, enhancing strategic decisions in volatile environments.

Keywords: spillover. vector autoregression. GFEVD. oil price.

RESUMEN

Objetivo: Este estudio analiza la influencia del precio internacional del petróleo sobre las acciones de Petrobrás (PETR4) y VALE (VALE3), considerando también el impacto del índice S&P 500 entre enero de 2021 y enero de 2023, período marcado por eventos exógenos como la pandemia del COVID-19 y el conflicto entre Rusia y Ucrania. **Metodología/enfoque:** La investigación utiliza datos diarios obtenidos mediante el paquete yfR del sitio Yahoo Finance, aplicando el modelo de Vectores Autorregresivos (VAR) junto con las pruebas ADF, KPSS, BIC, AIC y HQ para verificar la estacionariedad y determinar el número óptimo de rezagos. También se realizaron pruebas de normalidad, autocorrelación y heterocedasticidad, además de aplicar la técnica de Descomposición Generalizada de la Varianza del Error de Predicción (GFEVD), según Diebold y Yilmaz (2012), y la prueba de causalidad de Granger (1969). **Originalidad/relevancia:** La originalidad radica en aplicar el modelo GFEVD a una muestra reciente y volátil, centrada en empresas brasileñas estratégicas en el mercado global de commodities. **Resultados principales:** El petróleo (CL1) explicó el 4,81% de la varianza de PETR4 y el 7,72% de VALE3 en un horizonte de 10 días. El índice de spillover disminuyó en los picos del COVID-19 y al inicio de la guerra. **Contribuciones teóricas/metodológicas:** El estudio refuerza la utilidad del modelo VAR-GFEVD para analizar la conectividad entre activos. **Contribuciones para la gestión:** Los hallazgos ayudan a inversores y gestores públicos a tomar decisiones ante choques externos en contextos inestables.

Palabras clave: spillover. vectores autorregresivos. GFEVD. precio del petróleo.

■ INTRODUÇÃO

O apreçamento de ativos financeiros por meio da arbitragem tem sido explorado de diversas maneiras no meio acadêmico, especialmente em situações caracterizadas por grande volatilidade e incerteza. Conforme salientado por Lopes, Viegas, Conte Filho e Carvalho (2021), muitas empresas listadas em bolsas de valores mantêm laços profundos com o mercado global, principalmente aquelas envolvidas no comércio internacional. Essas companhias não apenas são impactadas por eventos externos, como também desempenham um papel na determinação de preços e na eficiência dos mercados nos segmentos em que atuam (Shen, 2025).

Nesse cenário específico do mercado financeiro contemporâneo, um elemento crucial é o papel desempenhado pelos investidores. Ribeiro (2022) destaca como o humor individual dos agentes pode exercer influência expressiva sobre os rendimentos de diversos instrumentos financeiros, criando brechas nas quais assimetrias informacionais se manifestam, juntamente com a emergência de oportunidades potenciais para operações de arbitragem lucrativas. A viabilidade da arbitragem entre ativos financeiros domésticos e seus equivalentes em mercados estrangeiros, exemplificada pela interconexão entre ações brasileiras e suas ADRs, evidenciando relações de apreçamento complexas, tanto simétricas quanto assimétricas, no contexto internacional (Wu, Li & Feng, 2024; Wang, 2019).

Do ponto de vista teórico, este estudo fundamenta-se na Teoria da Arbitragem de Preços (APT), que sugere que os retornos dos ativos são afetados por diversos fatores macroeconômicos, entre os quais se destaca o valor das commodities (Mussa et al., 2011). Para uma análise metodológica mais aprofundada, adota-se a Teoria da Transmissão da Volatilidade entre Mercados, proposta por Diebold e Yilmaz (2012). Essa teoria permite avaliar a conectividade entre ativos e o grau de influência dos choques externos sobre eles, por meio da decomposição generalizada da variância do erro de previsão (GFEVD). Tal metodologia tem sido amplamente utilizada em pesquisas recentes para compreender as interdependências entre mercados durante crises globais (Le & Luong, 2022; Mensi, Vo & Kang, 2023).

Além disso, fatores macroeconômicos e microeconômicos têm sido utilizados para compreender como o preço internacional do petróleo afeta economias exportadoras, como demonstrado por Castro et al. (2018). Também é possível analisar como as commodities influenciam indicadores econômicos amplos, conforme discutido por Bernanke, Gertler e Watson (1997).

Nos últimos anos, o preço do petróleo consolidou-se como um dos principais vetores de flutuação nos mercados financeiros ao redor do mundo. No contexto europeu, Theodoro (2021) investigou o impacto da commodity em empresas de energia renovável; no Brasil, Souza e Veríssimo (2013) abordaram os reflexos das mudanças no preço do petróleo sobre a taxa de câmbio e a balança comercial. Esse cenário é particularmente relevante para companhias brasileiras com alta exposição ao mercado internacional, como Petrobrás e VALE. Santos et al. (2015) evidencia que alterações nos

preços globais do petróleo têm potencial para impactar substancialmente os ativos dessas empresas, sustentando a hipótese de causalidade.

Com forte presença no mercado de commodities e impacto relevante sobre o Ibovespa, Petrobrás e VALE são casos emblemáticos para examinar a sensibilidade dos ativos brasileiros a choques externos. De acordo com Costa (2012), a Petrobrás exerce papel estratégico no cenário internacional. Já Huang, Masulis e Stoll (1996) analisaram a relação entre o mercado de ações e o de petróleo sob a hipótese de eficiência informacional, sugerindo que, em mercados eficientes, haveria correlação contemporânea entre essas variáveis. No entanto, estudos, como o de Silva (2011), revelam conexões mais complexas e com defasagens temporais, indicando oportunidades de arbitragem e mecanismos de transferência de risco.

Embora a Petrobrás apresente vínculo econômico direto com o mercado internacional de petróleo, a inclusão da VALE no sistema analisado decorre de uma relação distinta. A VALE atua predominantemente no mercado de minério de ferro, mas possui elevada exposição ao ciclo internacional de commodities, ao câmbio, à demanda externa e às condições globais de liquidez e aversão ao risco. Desse modo, a relação entre CL1 e VALE3 não é tratada neste estudo como uma relação operacional direta, mas como uma possível interdependência financeira entre ativos brasileiros estratégicos e sensíveis a choques externos. A análise busca, portanto, verificar se choques no petróleo se propagam indiretamente para VALE3 por meio da dinâmica sistêmica do mercado financeiro e da realocação de portfólios em períodos de crise.

Além de seu peso significativo no índice Ibovespa, Petrobrás e VALE exercem papel estratégico na política energética e no desempenho macroeconômico brasileiro. A Petrobrás está no centro da matriz energética nacional, enquanto a VALE representa uma das maiores exportadoras do país. Analisar os efeitos do preço do petróleo sobre essas empresas contribui para decisões de investimento e formulação de políticas públicas, especialmente em contextos de instabilidade global (Liu, Shao & Zhang, 2020; Filho et al., 2021; Attarzadeh & Balcilar, 2022; Escribano et al., 2023).

Diante desse panorama, o objetivo deste estudo é aprofundar as investigações iniciadas por Santos et al. (2015), atualizando a base empírica até janeiro de 2023, um período marcado por eventos relevantes como a pandemia de COVID-19 e o início do conflito entre Rússia e Ucrânia. Utilizando modelagem VAR e a metodologia de Diebold e Yilmaz (2012), o estudo busca avaliar o impacto do preço do petróleo (CL1), do índice S&P 500 e das ações da VALE3 sobre a variância dos retornos da PETR4, com o intuito de identificar padrões de interconexão e potenciais quebras estruturais na dinâmica de transmissão de volatilidade entre os ativos (Da Silva et al., 2024).

A lacuna explorada neste estudo decorre da necessidade de compreender como choques associados ao mercado internacional de petróleo se conectam a ativos brasileiros estratégicos em um período recente de instabilidade global. Embora a literatura tenha analisado a relação entre petróleo, mercados acionários e commodities em diferentes contextos, ainda há espaço para investigar a conectividade entre CL1, PETR4, VALE3 e S&P 500 no mercado brasileiro entre 2021 e 2023, com ênfase na decomposição da variância e na direção dos transbordamentos de volatilidade. Essa abordagem permite avançar em relação a análises baseadas apenas em

correlação ou causalidade, pois identifica a contribuição relativa de cada variável para a variância do erro de previsão das demais.

Espera-se que os resultados obtidos nesta investigação ofereçam contribuições valiosas tanto para a comunidade acadêmica quanto para os ambientes financeiro e empresarial. Para investidores, as descobertas podem orientar decisões estratégicas relacionadas à precificação e à gestão de riscos em contextos de elevada incerteza. No âmbito da formulação de políticas públicas, os conhecimentos gerados sobre a resposta das ações brasileiras a choques externos podem subsidiar estratégias relacionadas à governança da infraestrutura energética nacional. Por fim, o uso de dados atualizados e de métodos econométricos avançados contribui para o aprimoramento da compreensão dos processos de transmissão de volatilidade no contexto brasileiro (Salisu & Gupta, 2020; Ekanayake, 2024; Reis & Santana, 2024).

■ REFERENCIAL TEÓRICO

Mercado internacional de petróleo e transmissão de choques

O mercado internacional de petróleo constitui um dos principais canais de transmissão de choques entre a economia real e os mercados financeiros. A literatura recente tem reforçado que a relação entre petróleo e mercados acionários não é estática nem homogênea. Escribano, Koczar, Jareño e Esparcia (2023), ao analisarem a conectividade entre preços do petróleo e mercados acionários de janeiro de 2000 a fevereiro de 2023, mostram que períodos de crises e conflitos tendem a alterar a correlação e a transmissão de choques entre petróleo e índices acionários. Esse resultado é relevante para este estudo, pois o período de 2021 a 2023 combina efeitos remanescentes da pandemia de COVID-19, mudanças nas expectativas globais de crescimento e o início do conflito entre Rússia e Ucrânia, criando um ambiente propício para investigar a conectividade entre petróleo e ativos brasileiros estratégicos.

Por ser uma commodity energética global, sensível a eventos geopolíticos, alterações na oferta, mudanças na demanda internacional e expectativas de crescimento econômico, suas oscilações podem afetar empresas diretamente ligadas ao setor petrolífero e também ativos financeiros expostos a fatores macroeconômicos globais.

O preço internacional do petróleo desempenha um papel de suma importância no mercado acionário, exercendo impacto não apenas sobre as empresas diretamente envolvidas na indústria petrolífera, mas também em diversos setores da economia global (Bamana, 2019). Consequentemente, a aplicação de vetores autorregressivos para a análise de índices econômicos tem sido amplamente utilizada para avaliação de séries, como proposto por Sims (1980). Nesse sentido, Santos (2015) buscou avaliar o impacto do preço do petróleo internacional sobre o índice Ibovespa, no período de 2008 a 2012. Em razão da representatividade de empresas petrolíferas no Ibovespa, por meio de um VAR(p), identificou choques significativos do preço do petróleo sobre o índice.

De modo geral, o petróleo consolidou-se como uma das principais fontes de energia para as indústrias internacionais. Rego e Marques (2006)

revelam que sua importância iniciou na década de 1950, com a atuação de empresas como a Petrobrás, a Vale do Rio Doce e a Companhia Siderúrgica Nacional. Desde então, o petróleo tem desempenhado um papel crucial na economia internacional. A variável tem sido utilizada em diversos estudos que investigam sua relação com a volatilidade de ativos financeiros, como verificado por Osah (2023), que analisa a influência do preço do petróleo sobre 12 economias com características distintas. As oscilações nos preços do petróleo têm o potencial de afetar as ações de empresas do setor petrolífero (exploração, produção e refino), bem como influenciar os custos de produção, os padrões de consumo e a demanda global por produtos e serviços.

Estudos também demonstram relações entre diferentes mercados acionários. Garbade e Silber (1983) investigam a relação causal assimétrica entre o mercado futuro de commodities e o mercado à vista, analisando o efeito da arbitragem nas mudanças de preços. De modo semelhante, Sadorsky (2000) analisa a integração entre preços futuros de energia para testar a condição de arbitragem no petróleo bruto, aplicando um vetor autorregressivo para demonstrar a cointegração entre variáveis relacionadas.

No campo dos mercados futuros, Bekiros e Diks (2008) investigam relações causais entre preços spot diários e futuros com vencimentos de um a quatro meses do preço internacional do petróleo. Utilizando um modelo de vetor de correção de erros (VEC), identificaram que o preço futuro influencia o preço à vista, indicando oportunidades de arbitragem. Hammoudeh e Choi (2006), também por meio de um VEC, analisaram os efeitos do petróleo Brent e de índices macroeconômicos sobre o índice de ações do Conselho de Cooperação do Golfo (CCG), encontrando que choques positivos no petróleo beneficiam a maioria dos mercados.

Ao considerar características assimétricas e de cointegração, Cheikh et al. (2022) revisitaram os achados de Hammoudeh e Choi (2006) após a crise da COVID-19, confirmando choques evidentes em alguns mercados. Caporale et al. (2022) analisaram os efeitos dos preços do petróleo sobre os retornos acionários dos países do BRICS-T, identificando efeitos positivos no setor de commodities (exceto na Índia) e efeitos negativos no setor financeiro brasileiro.

A importância do preço do petróleo para análises de volatilidade é reforçada por Le e Luong (2022), que, por meio de um modelo TVP-VAR, analisam os transbordamentos dinâmicos entre choques de preço do petróleo, retornos acionários e sentimento dos investidores nos EUA e Vietnã. Os autores identificaram que o petróleo foi transmissor líquido de choques para os retornos acionários americanos entre 2010 e 2020.

Na mesma linha, Huang, Chen, Xu e Xia (2023) evidenciam que os spillovers de volatilidade entre commodities energéticas e mercados financeiros apresentam comportamento dinâmico e sensível a períodos de crise. Ao utilizarem uma abordagem TVP-VAR de conectividade em frequência durante a COVID-19, os autores identificam que a transmissão de volatilidade entre energia e mercados financeiros foi marcada por variações temporais relevantes, com intensificação durante o período pandêmico. Esse achado reforça a pertinência de analisar a transmissão de choques em janelas recentes de instabilidade, como a adotada neste estudo.

Empresas brasileiras listadas, commodities e exposição ao mercado internacional

No contexto brasileiro, Petrobrás e VALE representam empresas estratégicas, com elevada liquidez no mercado acionário e forte exposição a fatores externos. A Petrobrás possui relação econômica direta com o mercado internacional de petróleo, enquanto a VALE, embora vinculada principalmente ao minério de ferro, está inserida no ciclo global de commodities, na dinâmica cambial e nos fluxos internacionais de investimento. Assim, a análise conjunta dessas empresas permite examinar a interdependência financeira entre ativos brasileiros relevantes em períodos de instabilidade externa.

A inclusão conjunta de PETR4 e VALE3 também se justifica pela perspectiva de conectividade entre ativos expostos a fatores globais, ainda que por canais distintos. Attarzadeh e Balcilar (2022) mostram que os transbordamentos entre petróleo, mercado acionário, energia limpa e tecnologia podem variar conforme o estado do mercado, sendo mais intensos em períodos de choques extremos. Assim, a análise de VALE3 no mesmo sistema de PETR4 e CL1 não pressupõe relação operacional direta com o petróleo, mas sim possível exposição indireta a choques sistêmicos, condições globais de liquidez, aversão ao risco e movimentos de realocação de portfólios em mercados de commodities e ações.

Com o objetivo de verificar a influência de variáveis econômicas sobre as ações ordinárias da Petrobrás, Lopes et al. (2021) analisam dados da ação de 2009 a 2020, aplicando o modelo de Mínimos Quadrados Ordinários para identificar correlações positivas ou negativas. Os autores encontraram influência do petróleo Brent, do próprio Ibovespa e do nível de produção da empresa. Anteriormente, Leite et al. (2016) aplicam o mesmo modelo para o período de 2005 a 2015, com o intuito de analisar o efeito do preço internacional do petróleo sobre as ações da Petrobrás, chegando a conclusões semelhantes.

Arouri et al. (2011) constataam que a volatilidade do petróleo influencia ações de sete setores industriais na Europa e nos Estados Unidos, com relação unidirecional na Europa e bidirecional nos EUA.

No que tange ao tempo de influência entre variáveis, Brooks et al. (2001) utilizaram dados de alta frequência para verificar a relação *lead-lag* entre o índice FTSE 100 e seus contratos futuros, encontrando evidências de antecipação do mercado futuro sobre o mercado à vista.

No Brasil, Silveira (2016) analisou dados de 2006 a 2014 e identificou a influência significativa do preço do petróleo Brent sobre o retorno de ações. Especificamente sobre PETR4, Silva (2011) encontrou relação contemporânea entre o preço do petróleo e as ações da Petrobrás, e efeito *lead-lag* com dados de alta frequência.

Para reforçar a possibilidade de arbitragem, Santos et al. (2015) utilizaram dados de alta frequência para investigar a influência intradiária dos contratos futuros de petróleo, do índice S&P 500 e da ação preferencial da Petrobrás. Os resultados apontaram causalidade do petróleo e do índice sobre a PETR4, com defasagem de 15 minutos.

Regina et al. (2012) analisaram os impactos cruzados entre PETR4, VALE5 e os preços do petróleo West Texas e do minério de ferro, verificando correlação entre essas variáveis. Em linha semelhante, Wolff, Santos e Souza

(2011) encontraram transmissão direta dos índices de commodities para a ação da Vale, mas não para a da Petrobrás no longo prazo.

Transmissão de volatilidade, arbitragem e comportamento dos investidores

Além da identificação de relações entre preços e retornos, estudos recentes têm avançado na mensuração da conectividade entre ativos financeiros por meio de modelos de decomposição da variância. Essa abordagem permite avaliar não apenas se há associação entre variáveis, mas também a direção e a intensidade dos transbordamentos de volatilidade, aspecto central para compreender o comportamento dos ativos em períodos de crise.

A Decomposição da Variância do Erro de Previsão Generalizada (GFEVD), proposta por Diebold e Yilmaz (2012), é uma metodologia central para mensuração de *spillovers*. Aplicada ao mercado norte-americano, permitiu identificar transmissão de volatilidade entre os mercados de ações, títulos, câmbio e commodities.

Estudos recentes também têm avançado na análise de conectividade dinâmica entre petróleo e mercados acionários de economias emergentes. Qin, Cong, Ma e Rong (2024) mostram que a conectividade entre petróleo e mercados acionários emergentes é heterogênea, dinâmica e sensível às condições de mercado, sendo mais elevada em cenários extremos do que em períodos de normalidade. Essa evidência reforça a importância de investigar o caso brasileiro em uma amostra recente, uma vez que PETR4 e VALE3 são ativos líquidos, relevantes para o mercado acionário nacional e expostos a diferentes canais de transmissão de choques internacionais.

Nazareno (2023) aplicam a metodologia GFEVD para analisar a contribuição do preço do petróleo sobre a inflação, demonstrando sua importância como transmissor de volatilidade. Gurrola-Ríos et al. (2021) analisaram os *spillovers* entre o S&P 500 e mercados latino-americanos antes e depois da pandemia, confirmando a transmissão positiva do S&P 500.

Diebold, Liu e Yilmaz (2017) aplicaram a GFEVD ao mercado de commodities e identificaram o setor de energia como o principal transmissor de volatilidade. Balcilar, Gabauer e Umar (2021) observaram forte conexão entre 11 commodities agrícolas e o preço futuro do petróleo.

Xiaoe e Huang (2018) analisaram a conectividade dinâmica dos preços do petróleo e identificaram o Brent e o WTI como transmissores líquidos de volatilidade. Zhang e Wang (2014) constataram forte dependência do mercado chinês em relação ao mercado global de petróleo. Hung (2022) mostrou que o S&P 500 transmite volatilidade ao petróleo e ao ouro, e que o petróleo, por sua vez, transmite ao ouro.

No continente africano, Mensi, Vinh e Kang (2023) avaliaram *spillovers* em diferentes regimes de mercado e confirmaram o petróleo como transmissor líquido. Roudari et al. (2023) observaram que choques positivos na produção de petróleo afetam positivamente as bolsas da Noruega e do Japão. Trinh e My (2023) identificaram impactos do preço do petróleo na produção industrial, inflação e preços domésticos do Vietnã.

A literatura recente indica que a transmissão de choques entre petróleo e mercados acionários não ocorre de forma homogênea entre países, setores e períodos de crise. Essa heterogeneidade torna relevante analisar o caso brasileiro, especialmente porque PETR4 possui vínculo direto com o

setor petrolífero, enquanto VALE3 representa uma empresa exportadora associada ao ciclo global de commodities, mas sem relação operacional direta com o petróleo. Assim, a contribuição deste estudo está em examinar se a conectividade observada decorre de exposição setorial direta, como no caso de PETR4, ou de mecanismos indiretos de transmissão financeira, como aversão ao risco, liquidez internacional, câmbio e realocação de portfólios, no caso de VALE3.

Com base na Teoria da Arbitragem de Preços e na literatura de transmissão de volatilidade, espera-se que choques no preço internacional do petróleo contribuam para explicar parte da variância dos retornos de PETR4, em razão de sua relação setorial direta com a commodity. Para VALE3, espera-se uma relação menos direta e potencialmente mais limitada, associada à interdependência financeira entre ativos brasileiros ligados ao ciclo internacional de commodities. Também se espera que o S&P 500 atue como variável relevante de controle internacional, por refletir condições globais de mercado e movimentos de aversão ou apetite ao risco.

Outro ponto, a literatura destaca que eventos extremos podem alterar a direção e a intensidade da conectividade entre petróleo e mercados acionários. Cui, Maghyreh e Liao (2024), ao analisarem a conectividade de risco entre petróleo e mercados acionários durante a pandemia de COVID-19 e o conflito Rússia-Ucrânia, mostram que os spillovers são sensíveis a grandes eventos de crise e a fatores geopolíticos. Essa evidência sustenta a escolha do recorte temporal deste estudo e reforça a necessidade de avaliar se os choques internacionais do petróleo se propagaram, ainda que parcialmente, para ativos brasileiros estratégicos durante o período de 2021 a 2023.

Diante da ampla literatura que relaciona o preço do petróleo à dinâmica dos mercados acionários, especialmente em tempos de crise e instabilidade geopolítica, ainda são escassos os estudos que analisam esse fenômeno no contexto brasileiro recente, com técnicas modernas de decomposição de volatilidade. Este estudo busca suprir essa lacuna, ao integrar modelos VAR-GFEVD à análise das ações da Petrobrás e da VALE entre 2021 e 2023, período marcado por choques simultâneos e rupturas de mercado.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Dados

Com o objetivo de analisar as relações entre o preço internacional do petróleo, o preço das ações da Petrobrás (PETR4), das ações da VALE (VALE3) e o índice S&P 500, foram utilizadas as variáveis descritas abaixo, considerando um recorte temporal de 1º de janeiro de 2021 a 1º de janeiro de 2023. Esse período foi escolhido por suceder o início da pandemia da COVID-19, buscando evitar a captura de efeitos extremos ou distorções exógenas mais acentuadas no modelo estimado. Os dados foram coletados com frequência diária.

As informações foram obtidas por meio do pacote yfR (versão 1.1.0), que realiza a interface com a base pública do Yahoo Finance, conforme descrito por Perlin (2021).

A inclusão de VALE3 no modelo não pressupõe que o petróleo seja determinante operacional direto de sua atividade principal. A justificativa

para sua presença no sistema decorre de sua relevância no mercado acionário brasileiro, de sua elevada liquidez, de sua exposição internacional e de sua inserção no conjunto de empresas brasileiras associadas ao ciclo global de commodities. Assim, o modelo busca mensurar a conectividade entre ativos estratégicos negociados na B3, avaliando a possibilidade de transmissão indireta de choques do petróleo para VALE3 em um contexto de instabilidade global.

As variáveis e suas especificações são apresentadas a seguir:

Variáveis:

- **CL1:** Contratos futuros do preço do petróleo internacional com vencimento de um mês.
- **PETR4:** Ação preferencial da empresa Petrobrás.
- **VALE3:** Ação ordinária da empresa VALE.
- **S&P 500:** - Índice de referência da bolsa de Nova York.
- **Dólar (BRL/USD):** Cotação diária da moeda norte-americana em relação ao real, utilizada para padronização dos dados.
- **Apuração:** Dados da última cotação diária de 01/01/2021 a 01/01/2023.
- **Tickers pacote:** “BRL=X” (Dólar), “CL=F” (CL1), “PETR4.SA” (PETR4), “VALE3.SA” (VALE3), “^GSPC” (S&P 500).

Procedimento Econométrico VAR(p)

Esta seção apresenta o procedimento econométrico utilizado para estimar as relações dinâmicas entre as variáveis do estudo. O modelo VAR(p), proposto por Sims (1980), permite analisar sistemas multivariados nos quais cada variável é explicada por suas próprias defasagens e pelas defasagens das demais variáveis do sistema. De modo geral, trata-se de um modelo linear com “n” variáveis definidas de “n” equações, no qual as variáveis são funções não apenas de suas próprias defasagens, mas também das demais variáveis. Nesse sentido, a generalização do VAR(p) é dada pela equação 1:

$$Y_t = \mu + \pi_1 Y_{t-1} + \dots + \pi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Nesse caso, Y_t é um vetor de tamanho “n x 1” com variáveis estacionárias, ou seja, integradas de ordem zero - I(0) e que a covariância seja constante por todo período. Assim, cada série temporal regredida integra os coeficientes autoregressivos e os valores defasados das demais séries. Ademais, os erros devem seguir uma distribuição normal multivariada com média zero e variância Ω , isto é $\varepsilon_t \sim NM(0, \Omega)$. Além disso, o valor esperado $E(\varepsilon_t)$ e $E(\varepsilon_t, \varepsilon_j)$ para todo $t \neq j$ é igual a zero, o que indica ausência de autocorrelação, $E(\varepsilon_t, \varepsilon_j) = 0, \forall t \neq j$ como também $\sum \varepsilon_t < \infty$.

Testes e VECM

Quando as séries em nível não são estacionárias, torna-se necessário transformar as variáveis, usualmente por meio da primeira diferença, para evitar estimações espúrias e atender às condições requeridas para a estimação do VAR. Em caso da hipótese da existência de relação de longo prazo entre as

variáveis, são feitos testes de cointegração entre as séries. Ao identificar a relação, será necessária a aplicação do VECM (Modelo de Vetor de Correção de Erros, o qual mensura o efeito de curto e longo prazo com combinações lineares (Bueno, 2020).

Nesse contexto, avalia-se a causalidade de Granger, que verifica se valores defasados de uma variável contribuem para melhorar a previsão de outra variável do sistema. Assim, uma variável é dita causadora de Granger de outra quando suas defasagens reduzem o erro de previsão da variável dependente.

Assim como Santos et al. (2015), para a integração das séries, isto é, se não são estacionárias na covariância, são aplicados testes para identificar a presença de raiz unitária nas séries, como o teste *Dickey-Fuller* Aumentado (ADF), além da elucidação através de gráficos. A definição da quantidade de defasagens, também chamada de *lags*, seguirá os critérios de informação BIC (Schwarz), AIC (Akaike) e HQ (Hannan-Quinn), no qual valores menores são preferíveis. Nessa linha, a quantidade de defasagens é definida pela maioria dos testes, em caso de resultados distintos será optado aquele indicado pelo BIC (Schwarz) conforme indicado por Lutkepohl e Kratzig (2004).

Conforme Johansen e Juselius (1990), após a definição da quantidade de defasagens, será realizado o teste de cointegração de Johansen, no qual se baseia nas estatísticas dos testes do traço e da raiz máxima. Através desse procedimento, se obtém três possíveis resultados do $\text{Rank}(\pi)$:

1. **$\text{Rank}(\pi) = 0$.** Indica a estimação de um modelo VAR, pois não existem vetores de cointegração
2. **$\text{Rank}(\pi) = n$.** Nesse caso, o número de vetores de cointegração é igual ao número de variáveis contidas no vetor Y'_t , indicando VAR para o nível das variáveis
3. **$0 < \text{Rank}(\pi) < n$.** Nesse caso, $Y'_t \sim I(1)$ e indica que existem vetores de cointegração entre as variáveis, devendo estimar o modelo VEC.

Para a estimação da função impulso resposta é necessária a decomposição de Cholesky, indicando caminhos dos choques aleatórios sobre a trajetória das variáveis. Neste caso, a equação assume:

$$\Delta y_t = c + \pi y_{t-1} + \phi_1 y_{t-1} + \phi_1 \Delta y_{t-1} + \dots + \phi_p \Delta y_{p-1} + \varepsilon_t \quad (2)$$

No caso, πy_{t-1} é interpretado como o termo de correção de erro. Além disso, para o teste da autocorrelação nos resíduos, são realizados o teste Breusch-Godfrey e o teste Jarque Bera para normalidade dos resíduos, como também o teste ARCH-LM para validação da homoscedasticidade dos resíduos. Por fim, também é analisado se as raízes se encontram fora do círculo unitário para corroborar a hipótese de estabilidade do modelo.

Dinâmica de Conectividade da Rede

Diebold e Yilmaz (2012) consolidaram uma abordagem para mensurar transbordamentos de volatilidade entre mercados financeiros a partir da decomposição da variância do erro de previsão associada a modelos VAR.

Essa metodologia permite avaliar a intensidade, a direção e a conectividade dos choques entre as variáveis do sistema.

Nesse caso, para a decomposição da variância do erro de previsão, a equação 1 é reescrita como $Y_t = \mu + \sum_{i=1}^p \pi_i Y_{t-i} + \varepsilon_t$, e, caso o modelo apresente covariância estacionária, a média móvel do VAR existe, portanto é possível calcular a decomposição da variância do erro de previsão h-passos à frente conforme a equação 3:

$$Y_t = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \varepsilon_{t-i} \quad (3)$$

Assim, $A_i = \pi_1 A_{i-1} + \pi_2 A_{i-2} + \dots + \pi_n A_{i-n}$, sendo A_0 a matriz identidade. Diferentemente da decomposição baseada na ortogonalização de Cholesky, a GFEVD (conforme equação (4)) permite mensurar a contribuição dos choques sem impor uma ordenação específica das variáveis no sistema. Essa característica é relevante para estudos de conectividade, pois reduz a sensibilidade dos resultados à ordem em que as variáveis são inseridas no VAR.

$$\theta_{ij}^g(H) = \frac{\sigma_{ij} \sum_{h=0}^{H-1} (e_i' A_h \sum e_j)^2}{\sum_{h=0}^{H-1} (e_i' A_h \sum A_h' e_i)} \quad (4)$$

Onde σ_{ij} é o desvio padrão do erro para a j -ésima equação, e e_i é o vetor de seleção, como o i -ésimo elemento, e zero caso contrário. Como os choques no *framework* não são ortogonais, é preciso normalizar a equação na forma apresentada em (5).

$$\tilde{\theta}_{ij}^g(H) = \frac{\theta_{ij}^g(H)}{\sum_{j=1}^N \theta_{ij}^g(H)} \quad (5)$$

Assim, com base em Diebold e Yilmaz (2012), define-se os valores de $\tilde{\theta}_{ij}^g(H)$ $i \neq j$ como o valor da conectividade direcional em pares, podendo ser utilizada também para o cálculo da conectividade total. Nessa linha, por meio desses valores tem-se índices de *spillover*, que podem determinar os receptores e transmissores de volatilidades.

Para fins de interpretação da matriz de conectividade, um valor igual a 25 em uma célula fora da diagonal principal indica que choques originados em uma variável explicam 25% da variância do erro de previsão de outra variável, em um horizonte de h passos à frente. Dessa forma, a matriz permite identificar tanto os ativos transmissores quanto os receptores de volatilidade no sistema. Com a tabela posta, pode-se desenvolver os índices de conectividade total, direcional e direcional líquida.

O índice de conectividade total é dado pela equação 6:

$$S^g(H) = \frac{\sum_{i,j=1, i \neq j}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)} \times 100 = \frac{\sum_{i,j=1, i \neq j}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)}{N} \times 100 \quad (6)$$

Além disso, a conexão direcional de todos os outros estados j para o estado i é dada por:

$$S_{i.}^g(H) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)} \times 100 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)}{N} \times 100 \quad (7)$$

A conexão direcional para todos os outros estados j para o estado i é dada por:

$$S_{.i}^g(H) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N \tilde{\theta}_{ji}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)} \times 100 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N \tilde{\theta}_{ji}^g(H)}{N} \times 100 \quad (8)$$

Já a conexão direcional líquida do estado para todos os outros estados é dada por:

$$S_i^g(H) = S_{i.}^g(H) - S_{.i}^g(H) \quad (9)$$

Por fim, a conexão rede aos pares, de estado i para o estado j pode ser descrita:

$$S_{ij}^g(H) = \left(\frac{\tilde{\theta}_{ji}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)}, - \frac{\tilde{\theta}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)} \right) \times 100 = \left(\frac{\tilde{\theta}_{ji}^g(H) - \tilde{\theta}_{ij}^g(H)}{N} \right) \times 100 \quad (10)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção apresenta os resultados empíricos do estudo e discute suas implicações econométricas e econômicas. Inicialmente, realizou-se a análise descritiva das séries utilizadas. Conforme apresentado na Tabela 1, as séries foram tratadas e convertidas para dólares, com o objetivo de reduzir a influência das oscilações cambiais sobre os preços analisados. No período da amostra, o preço internacional do petróleo com vencimento de um mês, representado por CL1, apresentou média de 81,19 dólares. A VALE3 apresentou média de 16,71 dólares, a PETR4 apresentou média de 5,48 dólares e o índice S&P 500 apresentou média de 4.186 pontos. Os demais valores de mínimo, máximo, mediana, primeiro quartil e terceiro quartil são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1

Estatísticas descritivas da série

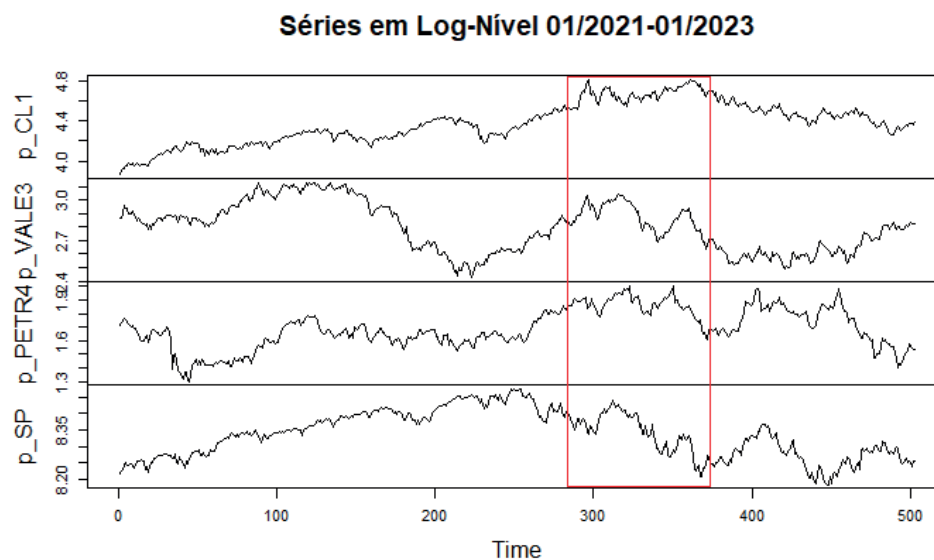
	p_CL1	p_VALE3	p_PETR4	p_SP
Min	47.62	11.27	3.675	3577
1st Qu.	68.40	13.92	4.967	3919
Median	78.96	16.66	5.338	4181
Mean	81.19	16.71	5.479	4186
3rd Qu.	91.86	18.88	6.120	4437
Max.	123.70	22.88	7.418	4797

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 1 apresenta as séries em log-nível ao longo do período analisado. Observam-se oscilações acentuadas nas séries, especialmente no preço do petróleo e em PETR4, sugerindo movimentos parcialmente sincronizados entre esses ativos. Esse comportamento inicial indica a possibilidade de associação entre as variáveis, a ser posteriormente avaliada por meio dos testes econométricos e da análise de conectividade. No período marcado em vermelho, torna-se nítido que a hipervalorização do preço do petróleo, em razão do conflito Rússia x Ucrânia impulsionou as demais ações.

Figura 1

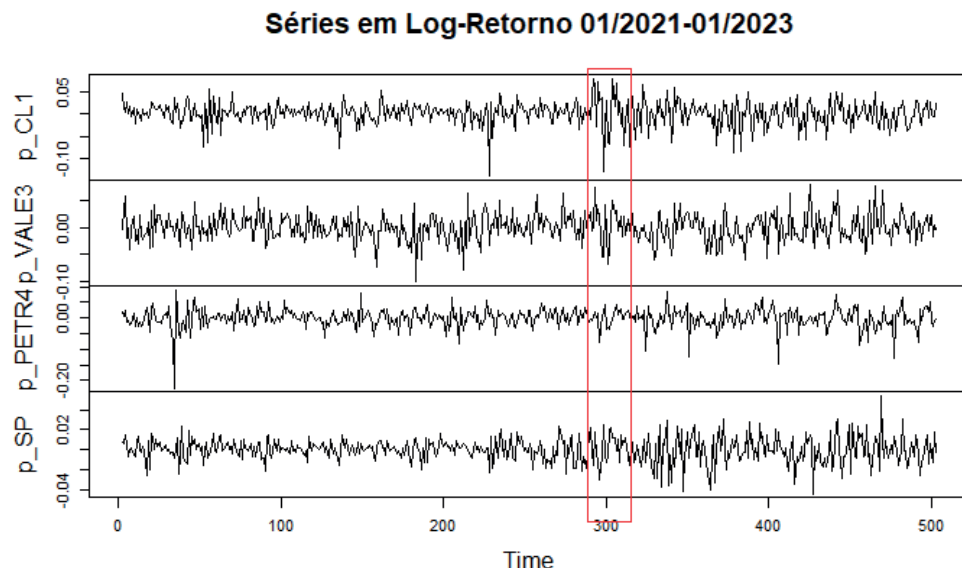
Séries em Log-Nível no período analisado

**Fonte:** Elaborado pelos autores

Em relação aos log-retornos das séries temporais, observa-se o mesmo comportamento, conforme a figura 2.

Figura 2

Log-retornos das séries temporais

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Em seguida, estimou-se a matriz de correlação de Pearson dos log-retornos, com o objetivo de avaliar associações lineares preliminares entre as variáveis analisadas. Os resultados indicam correlações positivas entre CL1 e os demais ativos do sistema, sugerindo associação inicial entre o preço internacional do petróleo e os retornos de PETR4 e VALE3. Essa evidência, entretanto, deve ser interpretada apenas como indicativo preliminar, uma vez que a conectividade dinâmica entre os ativos é analisada posteriormente por meio da GFEVD.

Tabela 2

Matriz de correlação dos log-retornos

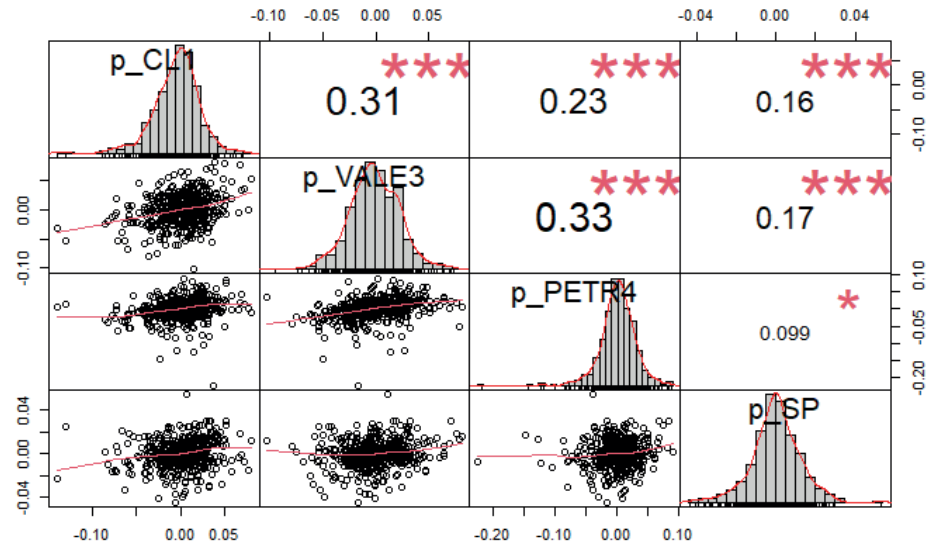
	p_CL1	p_VALE3	p_PETR4	p_SP
p_CL1	1.00			
p_VALE3	0.3135	1.00		
p_PETR4	0.2323	0.3312	1.00	
p_SP	0.1599	0.1661	0.099	1.00

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se também que as correlações são estatisticamente significativas ao nível de 1% (Figura 3), o que reforça a existência de associações lineares entre as variáveis. Ainda assim, como a correlação não permite identificar direção nem intensidade dinâmica dos choques, torna-se necessária a análise dos transbordamentos de volatilidade por meio da decomposição da variância..

Figura 3

Correlação dos log-retornos



Fonte: Elaborado pelos autores.

Posteriormente, utilizou-se o teste Dickey-Fuller Aumentado (ADF) para verificar a presença de raiz unitária nas séries. De forma complementar, aplicou-se o teste KPSS, cuja hipótese nula considera a estacionariedade da série. A utilização conjunta dos dois testes permite avaliar a estacionariedade de maneira mais robusta, uma vez que suas hipóteses nulas são distintas.. Em geral, os resultados para as séries em log-nível indicam a presença de raiz unitária a um nível de significância de 1%. Após tomar a primeira diferença das séries, verifica-se que elas são estacionárias a um nível de significância de 1%, conforme mostra a tabela 3, assim como visto por Silva (2011) e Santos et al. (2015).

Tabela 3

Resultados do teste Dickey-Fuller Aumentado

Série	trend			drift		none
	tau3	phi2	phi3	tau2	phi1	tau1
Valor Crítico (1%)	-3.96	6.09	8.27	-3.43	6.43	-2.58
Log-nível CL1	-1.81	1.84	2.49	-2.20	2.69	0.79
Log-retorno CL1	-11.00	40.36	60.54	-10.86	58.95	-16.71
Log-nível VALE3	-1.77	1.07	1.61	-1.64	1.36	-0.19
Log-retorno VALE3	-8.02	21.44	32.15	-8.02	32.18	-8.03
Log-nível PETR4	-2.50	2.17	3.24	-2.40	2.89	-0.36
Log-retorno PETR4	-15.81	83.34	125.01	-15.81	125.04	-15.83
Log-nível S&P	-2.29	2.14	3.20	-1.89	1.78	-0.03
Log-retorno S&P	-16.41	89.73	134.6	-16.36	133.84	-16.38

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a aplicação do teste Dickey-Fuller Aumentado, utilizou-se o teste KPSS como procedimento complementar de verificação da estacionariedade das séries. Ao considerar o nível de significância de 5%, observa-se que as séries em log-nível apresentam p-valores iguais a 0,01, o que leva à rejeição da hipótese nula de estacionariedade em tendência. Por outro lado, as séries em log-retorno apresentam p-valores iguais a 0,10, não rejeitando a hipótese nula do teste KPSS, conforme tabela 4. Esses resultados indicam que as séries em log-retorno são estacionárias, corroborando a decisão de utilizar as variáveis em primeira diferença logarítmica na estimação do modelo VAR.

Tabela 4

Resultados do teste KPSS

Série	KPSS Trend	p-valor
Log-nível CL1	1.18	0.01
Log-retorno CL1	0.04	0.10
Log-nível VALE3	0.34	0.01
Log-retorno VALE3	0.08	0.10
Log-nível PETR4	0.59	0.01
Log-retorno PETR4	0.06	0.10
Log-nível S&P	0.59	0.01
Log-retorno S&P	0.04	0.10

Fonte: Elaborado pelos autores.

A fim de encontrar a quantidade de defasagens “p” para serem utilizadas no modelo, foram considerados os critérios de informação Schwarz (BIC), Akaike (AIC) e Hannan-Quinn (HQ), com “p” variando de 1 a 15. No caso dos

resultados distintos, optou-se por aquele indicado pelo BIC, ou seja, igual a 1 conforme a tabela 5.

Tabela 5

Seleção do número de defasagens

p	AIC.n.	HQ.n.	SC.n.
1	-30.29	-29.47	-28.19
2	-30.27	-29.39	-28.03
3	-30.23	-29.29	-27.85
4	-30.21	-29.22	-27.7
5	-30.2	-29.16	-27.55
6	-30.18	-29.09	-27.39
7	-30.16	-29.01	-27.23
8	-30.12	-28.92	-27.06
9	-30.1	-28.85	-26.9
10	-30.1	-28.79	-26.76
11	-30.1	-28.73	-26.62
12	-30.06	-28.64	-26.45
13	-30.04	-28.57	-26.29
14	-30.01	-28.49	-26.13
15	-30.01	-28.43	-25.98

Fonte: Elaborado pelos autores.

Posteriormente, foi aplicado o teste de cointegração de Johansen (1990), cujo objetivo visa identificar ao menos um vetor de cointegração. Entretanto, os resultados do teste do traço e da raiz máxima não indicam a existência de ao menos um vetor de cointegração a 1% de significância, conforme a tabela 6. Diferente da proposta de Santos et al. (2015), no qual trabalharam com dados de alta frequência, e sendo mais suscetível à cointegrações.

Tabela 6

Testes de cointegração

Rank	Valor Crítico (1%)	Traço	Valor Crítico (1%)	Máx Autovalor
$r \leq 3$	12.97	1.12	12.97	1.12
$r \leq 2$	24.60	4.87	20.20	3.75
$r \leq 1$	41.07	14.29	26.81	9.43
$r = 0$	60.16	34.82	33.24	20.53

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a estimação do VAR(1), foram realizados testes de diagnóstico dos resíduos. O teste de Jarque-Bera indicou rejeição da hipótese nula de normal-

idade dos resíduos. Embora essa evidência deva ser considerada na interpretação dos resultados, a literatura aponta que, em amostras suficientemente grandes, violações de normalidade tendem a ser menos problemáticas para a consistência das estimativas do VAR. Em seguida, aplicou-se o teste Portmanteau para verificar a presença de autocorrelação residual, cuja hipótese nula de ausência de autocorrelação não foi rejeitada. Também foi aplicado o teste ARCH-LM, no qual não se rejeitou a hipótese nula de ausência de efeitos ARCH nos resíduos. Os resultados estão expostos na tabela 7.

Tabela 7

Testes do modelo

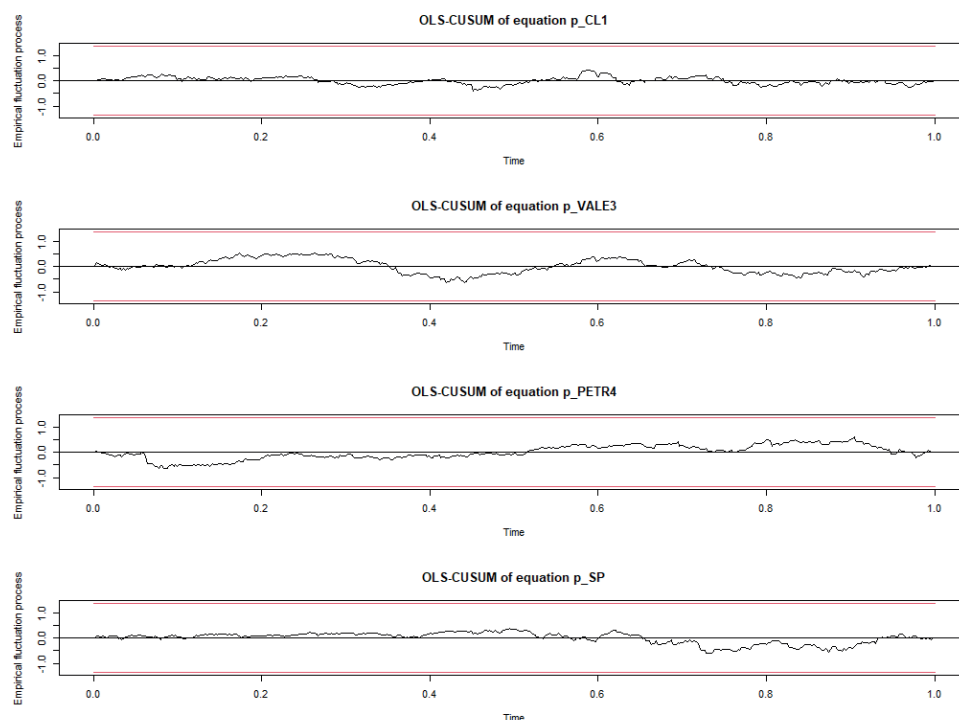
Teste	Chi ²	df	p-valor
Jarque-Bera (Normalidade)	3847.70	8	0.0000
Portmanteau (Autocorrelação)	238.81	240	0.5096
ARCH (Heterocedasticidade)	514.65	500	0.3157

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pela figura 4, nota-se que todas as variáveis passam no teste de estabilidade dos resíduos dos retornos, não ultrapassando nenhum limite. Assim, é possível prosseguir com a estimação dos *spillovers* propostos por Diebold e Yilmaz.

Figura 4

OLS-CUSUM, estabilidade dos resíduos



Fonte: Elaborado pelos autores.

A fim de avaliar o impacto de uma variável no erro da previsão de outra, foi desenvolvida a decomposição da variância (FEVD). Conforme apresentado na Tabela 8, em horizonte de quatro dias, os choques em CL1, VALE3 e S&P 500 explicam, respectivamente, 5,62%, 7,28% e 0,00% da variância do erro de previsão de PETR4. Esses resultados indicam que, nesse horizonte, a maior parte da variância prevista de PETR4 permanece associada aos próprios choques da ação, embora CL1 e VALE3 apresentem contribuição não desprezível para sua dinâmica.

Tabela 8

Resultados Decomposição da Variância - PETR4

Decomposição da variância do erro da previsão - Choque em PETR4				
Período	p_PETR4	p_CL1	p_VALE3	p_SP
1	0.8749	0.0569	0.0681	0.0000
2	0.8707	0.0562	0.0727	0.0002
3	0.8705	0.0562	0.0728	0.0003
4	0.8705	0.0562	0.0728	0.0003

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Tabela 9 apresenta a decomposição da variância do erro de previsão de VALE3. Comparativamente à PETR4, observa-se maior contribuição relativa de CL1 para a variância prevista de VALE3 no horizonte analisado. Esse resultado deve ser interpretado como evidência de conectividade financeira indireta entre o petróleo e VALE3, e não como relação operacional direta entre petróleo e minério de ferro.

Tabela 9

Resultados Decomposição da Variância - VALE3

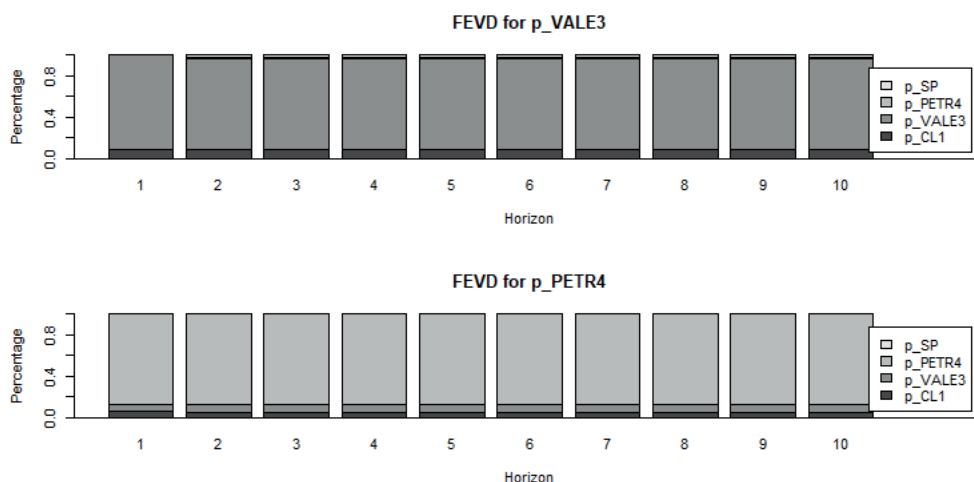
Decomposição da variância do erro da previsão - Choque em VALE3				
Período	p_PETR4	p_CL1	p_VALE3	p_SP
1	0.0000	0.0908	0.9091	0.0000
2	0.0055	0.0952	0.8772	0.0220
3	0.0056	0.0952	0.8771	0.0220
4	0.0056	0.0952	0.8771	0.0220

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 5 apresenta a decomposição da variância em horizonte de 10 dias. Observa-se que, após os primeiros períodos, as contribuições relativas das variáveis tendem à estabilização, indicando que os principais efeitos de transmissão se concentram nos primeiros dias do horizonte de previsão.

Figura 5

Decomposição da variância para 10 dias



Fonte: Elaborado pelos autores.

As medidas de conectividade foram estimadas para um horizonte de 10 passos à frente, conforme a abordagem de Diebold e Yilmaz (2012). Ao verificar os resultados do preço do petróleo internacional, é possível inferir que CL1 é responsável por 4,81% da variância do erro de previsão 10-passos à frente ao prever a PETR4, e sob a ótica da VALE3 representa 7,72% do seu erro de previsão, de acordo com a dinâmica de *spillover* exposto na tabela 10. Além disso, o índice S&P explica 0,76% da variância do erro de previsão de PETR4, enquanto explica 5,09% de VALE3.

Tabela 10

Dinâmica de *spillover* - Diebold Yilmaz (2012)

	Horizonte de 10 dias				
	p_CL1	p_VALE3	p_PETR4	p_SP	C. from others
p_CL1	83.03	8.09	5.15	3.72	16.96
p_VALE3	7.72	78.38	8.80	5.09	21.62
p_PETR4	4.81	9.18	85.25	0.76	14.75
p_SP	4.09	3.39	0.75	91.77	8.23
C. to others (spillover)	16.62	20.66	14.70	9.58	15.39
C. to others including own	99.65	99.05	99.94	101.35	400.000

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados da Tabela 10 indicam que os *spillovers* estimados são economicamente relevantes, embora de magnitude limitada. Em horizonte de 10 dias, o CL1 responde por 4,81% da variância do erro de previsão de PETR4 e por 7,72% da variância do erro de previsão de VALE3. Esses percentuais sugerem que o petróleo exerce influência sobre os ativos analisados, mas não constitui o principal determinante da dinâmica de seus retornos no período. A

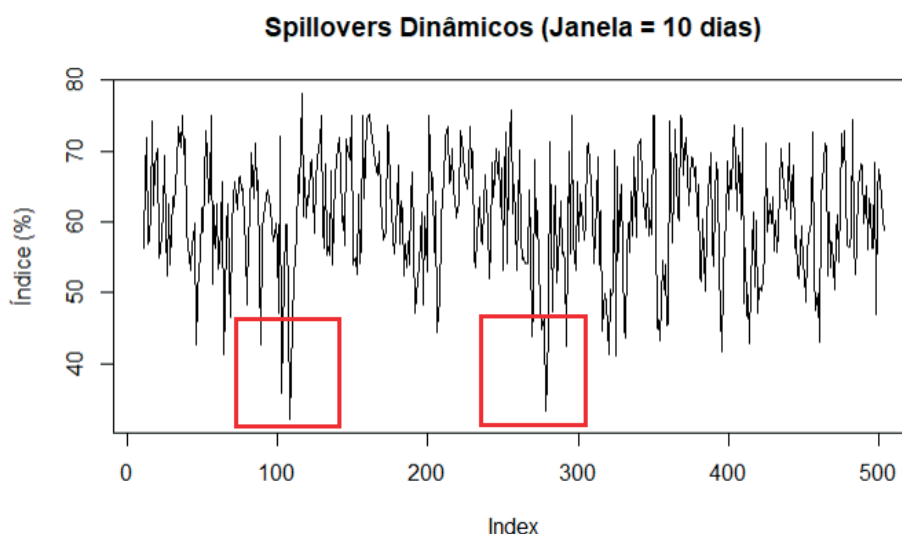
maior parte da variância permanece explicada por choques próprios, o que indica predominância de fatores específicos de cada ativo, além de fatores domésticos, setoriais e macrofinanceiros não diretamente capturados pelo sistema estimado.

No caso da PETR4, a influência do petróleo é coerente com sua exposição setorial direta ao mercado energético. Ainda assim, o percentual de 4,81% mostra que a relação entre petróleo e ações da Petrobrás não é mecânica nem exclusiva, pois a empresa também é afetada por fatores institucionais, política de preços, governança, câmbio, condições domésticas e expectativas dos investidores. No caso da VALE3, a contribuição de 7,72% do CL1 não deve ser interpretada como relação operacional direta entre petróleo e minério de ferro, mas como evidência de conectividade financeira entre ativos brasileiros expostos ao ciclo global de commodities. Esse resultado reforça a interpretação de que choques no petróleo podem se propagar indiretamente para empresas exportadoras e líquidas por meio de canais sistêmicos, como aversão ao risco, liquidez internacional, câmbio e realocação de portfólios (Escribano et al., 2023; Qin et al., 2024).

A Figura 6 mostra variações no índice dinâmico de spillover ao longo do período analisado. As áreas destacadas coincidem com momentos de elevada instabilidade internacional, incluindo picos associados à pandemia da COVID-19 e o início do conflito entre Rússia e Ucrânia. Essa evidência sugere alterações temporárias na conectividade entre os ativos, embora a interpretação desses movimentos deva ser feita de forma cautelosa, pois o modelo não estima formalmente quebras estruturais associadas a esses eventos. Ainda assim, a associação temporal entre os movimentos do índice e os períodos de crise é compatível com evidências recentes de que choques pandêmicos e geopolíticos podem alterar a conectividade entre petróleo, commodities e mercados acionários (Huang et al., 2023; Cui et al., 2024).

Figura 6

Spillovers Dinâmicos

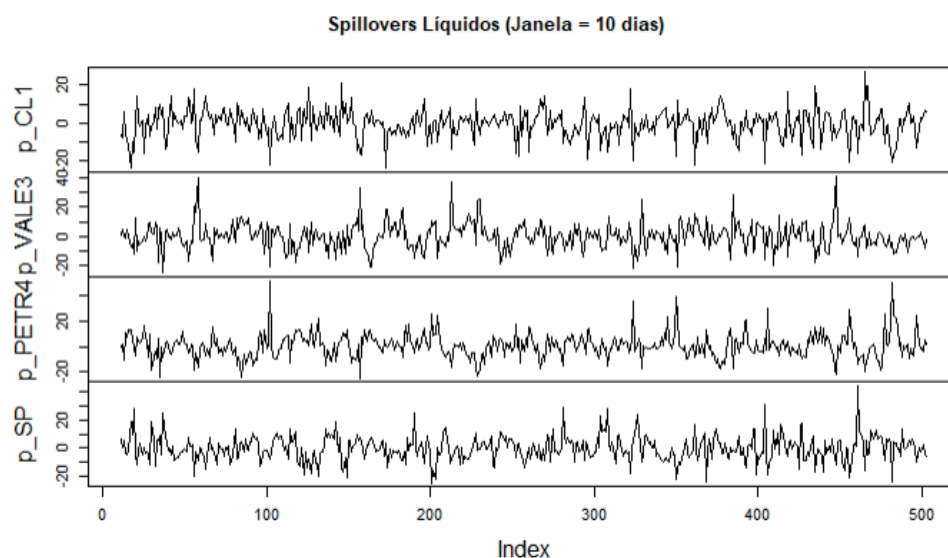


Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação aos transbordamentos líquidos do sistema, é possível assumir como transmissor àquele que a diferença entre o recebido e transmitido é positiva.

Figura 7

Spillovers Líquidos



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota-se, pela tabela 11, apenas o índice S&P é transmissor líquido de *spillover*, sendo que “To” representa o que é recebido, e “From” representa o que é transmitido às outras variáveis. Caso seja transmissor, é caracterizado como “TRUE”.

Tabela 11

Transmissores líquidos de volatilidade

	To	From	Net	Transmitter
p_CL1	16.62	16.96	-0.34	FALSE
p_VALE3	20.66	21.62	-0.94	FALSE
p_PETR4	14.70	14.75	-0.05	FALSE
p_SP	9.58	8.23	1.34	TRUE

Fonte: Elaborado pelos autores.

A identificação do S&P 500 como transmissor líquido de volatilidade reforça a importância das condições financeiras internacionais para a dinâmica dos ativos brasileiros analisados. Esse resultado sugere que, no período entre 2021 e 2023, os choques globais capturados pelo mercado acionário norte-americano tiveram papel relevante na propagação de volatilidade dentro do sistema (Attarzadeh & Balcilar, 2022; Escribano et al., 2023). Assim, mesmo que o objetivo central do estudo esteja associado ao petróleo, a presença do S&P 500 permite evidenciar que a conectividade entre CL1,

PETR4 e VALE3 ocorre em um ambiente financeiro internacional mais amplo, no qual choques externos podem afetar simultaneamente diferentes ativos negociados no mercado brasileiro.

Por fim, foi utilizado o teste de Granger (1969) de primeira ordem em função da defasagem utilizada no modelo VAR(p) para identificar a causalidade do sistema, entretanto não foram verificadas alguma transmissão significativa direcional, em contrapartida da conclusão de Santos et al. (2015) e Silva (2011) em razão de se tratar de momentos diferentes, como também com dados de alta frequência.

CONCLUSÃO

O estudo em análise investigou como o preço de quatro variáveis estava interconectado, para verificar a influência do preço do petróleo internacional nas ações da Petrobrás. Essas variáveis incluíam a PETR4, que é a ação preferencial da Petrobrás S.A. negociada no mercado de ações brasileiro B3, bem como a VALE3, que é a ação da Vale S.A. no setor de mineração, também negociada na B3. Além disso, o estudo abordou a variável CL1, que se refere ao contrato futuro de petróleo mais líquido e de prazo mais curto disponível no mercado internacional, e o S&P, que representa o índice S&P 500 dos Estados Unidos. A metodologia utilizada para a abordagem quantitativa empregou o modelo vetorial autorregressivo desenvolvido por Sims (1980). Antes disso, a correlação de Pearson (1896), foi examinada. O objetivo era analisar como a variância do erro de previsão, conforme definida por Diebold e Yilmaz (2012), foi decomposta, bem como a relação de causalidade de Granger, proposta por Granger (1969).

Ao partir de uma amostra de janeiro 2021 a janeiro 2023, os resultados apontaram que a causalidade de Granger (1969) não identifica uma transmissão significativa direcional, em contrapartida com os resultados de Santos et al. (2015), ao qual indicada uma influência de CL1 e SP1 à PETR4. Entretanto, os resultados opostos indicam as respostas em momentos diferentes, ao qual o período analisado contém eventos exógenos como o conflito Rússia x Ucrânia, que impactou fortemente a commodity, como também a pandemia do COVID-19. Ademais, a frequência dos dados foi relativamente diferente, sendo uma intra-diária e outra diária.

A questão investigada pode ser respondida pelos resultados obtidos pelos índices de conectividade do sistema, da metodologia de Diebold e Yilmaz (2012) aplicada, observa-se um valor de 15,39%. De modo geral, a variável CL1 explica a variância de PETR4 e VALE3, porém em baixa representatividade, indicando que há outros fatores externos influenciando suas oscilações. Através dos spillovers dinâmicos, verifica-se que durante os picos de casos de COVID-19 na pandemia, como também o início do conflito Rússia x Ucrânia o sistema sofreu uma queda na conectividade. No período analisado, apenas S&P 500 foi um transmissor líquido de volatilidade do sistema, indicando que as demais componentes, na média do período analisado, sofreram influência dessa componente.

De fato, compreender a influência de commodities, como o preço do petróleo, sob empresas brasileiras se faz de extrema importância para sua gestão, principalmente quando a própria é matéria-prima ou possui

influência indireta sob a produção da empresa, como é o caso da Petrobrás e da VALE. Para o governo, a análise se torna crucial em decisões sobre a gestão do petróleo nacional, seu preço e sua influência sobre as ações das estatais. Sob a ótica de investidores, essa análise corrobora ao informar sobre a necessidade de diversificação ou de movimentações em períodos como o analisado, que contém eventos exógenos, visto que, apesar de baixa, há certa influência do preço internacional do petróleo sobre as oscilações e volatilidade dos ativos analisados.

Para pesquisas futuras referente à análise realizada, em relação ao meio acadêmico, caso não tenha as limitações enfrentadas para a obtenção dos dados, podem ser realizadas as mesmas análises para informações de alta frequência. Esse estudo, por exemplo, contribuirá melhor ainda para *traders* das ações PETR4 e VALE3, em posições de arbitragens. Outros critérios de avaliação da informação podem ser aplicados para refinar os resultados encontrados.



REFERÊNCIAS

- Arouri, M. H., Jouini, J., & Nguyen, D. K. (2011). Volatility spillovers between oil prices and stock sector returns: Implications for portfolio management. *Journal of International Money and Finance*, 30(7), 1387–1405.
- Attarzadeh, A., & Balcilar, M. (2022). On the dynamic connectedness of the stock, oil, clean energy, and technology markets. *Energies*, 15(5), 1893. <https://doi.org/10.3390/en15051893>
- Balcilar, M., Gabauer, D., & Umar, Z. (2021). Crude oil futures contracts and commodity markets: New evidence from a TVP-VAR extended joint connectedness approach. *Resources Policy*, 74, 102219. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102219>
- Bamana, M. R. S. O. (2019). *O impacto do preço do petróleo: análise da vulnerabilidade dos países exportadores de petróleo* [Dissertação de Mestrado]. <http://hdl.handle.net/10437/9455>
- Bekiros, S. D., & Diks, C. G. H. (2008). The relationship between crude oil spot and futures prices: Cointegration, linear and nonlinear causality. *Energy Economics*, 30(5), 2673–2685. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2008.03.006>
- Bernanke, B. S., Gertler, M., & Watson, M. (1997). Systematic monetary policy and the effects of oil price shocks. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1997(1), 91–142.
- Brooks, C., Rew, A. G., & Ritson, S. (2001). A trading strategy based on the lead-lag relationship between the spot index and futures contract for the FTSE 100. *International Journal of Forecasting*, 17(1), 31–44. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(00\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(00)00062-5)
- Bueno, R. L. S. (2020). *Econometria de séries temporais* (2ª ed.). Cengage Learning.
- Caporale, G. M., Çatik, A. N., Kisla, G. S. H., Helmi, M. H., & Akdeniz, C. (2022). Oil prices and sectoral stock returns in the BRICS-T countries: A time-varying approach. *Resources Policy*, 79, 103044. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103044>
- Castro, M. A. R., Fontoura, G. A., Ugolini, A., & Araujo, P. S. R. (2018). Causalidade entre petróleo, câmbio e commodities energéticas: abordagem com vetores autorregressivos (VAR). *Revista de Gestão, Finanças e Contabilidade*, 8(3), 38–57.

- Cheikh, N. B., Zaied, Y. B., Saidi, S., & Mohamed, S. (2022). Global pandemic crisis and risk contagion in GCC stock markets. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 202, 746–761. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2022.08.036>
- Costa, A. D. (2012). A trajetória de internacionalização da Petrobras na indústria de petróleo e derivados. *História Econômica & História de Empresas*, 12(1).
- Cui, J., Maghyereh, A., & Liao, D. (2024). Risk connectedness between international oil and stock markets during the COVID-19 pandemic and the Russia-Ukraine conflict: Fresh evidence from the higher-order moments. *International Review of Economics & Finance*, 95, 103470. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2024.103470>
- Da Silva, M., Passos, M., Tessmann, M., & Uhr, D. (2024). Dynamic Connectivity and Contagion Risk Among Bank Stocks in Brazil. *Computational Economics*. <https://doi.org/10.1007/s10614-024-10740-z>.
- Diebold, F. X., & Yilmaz, K. (2012). Better to give than to receive: Predictive directional measurement of volatility spillovers. *International Journal of Forecasting*, 28(1), 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2011.02.006>
- Diebold, F. X., Liu, L., & Yilmaz, K. (2017). Commodity connectedness. *National Bureau of Economic Research*. <https://doi.org/10.3386/w23685>
- Ekanayake, E. (2024). Commodity Prices and the Brazilian Stock Market: Evidence from a Structural VAR Model. *Commodities*. <https://doi.org/10.3390/commodities3040027>.
- Escribano, A., Koczar, M. W., Jareño, F., & Esparcia, C. (2023). Shock transmission between crude oil prices and stock markets. *Resources Policy*, 83, 103754. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103754>
- Filho, A., Saba, H., Santos, R., Calmon, J., Araujo, M., Jorge, E., & Murari, T. (2021). Analysis of Hydrous Ethanol Price Competitiveness after the Implementation of the Fossil Fuel Import Price Parity Policy in Brazil. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su13179899>.
- Granger, C. W. J. (1969). Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica*, 37(3), 424–438. <https://doi.org/10.2307/1912791>
- Gurrola-Ríos, C., Rodríguez-Benavides, D., & López-Herrera, F. (2021). Medición y análisis de los spillovers entre el S&P500 y los mercados del MILA antes y durante la expansión inicial de la pandemia por COVID-19. *Estudios Gerenciales*, 37(159), 178–187. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2021.159.4391>
- Hammoudeh, S., & Choi, K. (2006). Behavior of GCC stock markets and impacts of US oil and financial markets. *Research in International Business and Finance*, 20(1), 22–44. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2005.05.008>

- Huang, J., Chen, B., Xu, Y., & Xia, X. (2023). Time-frequency volatility transmission among energy commodities and financial markets during the COVID-19 pandemic: A novel TVP-VAR frequency connectedness approach. *Finance Research Letters*, 53, 103634. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.103634>
- Hung, N. T. (2022). Asymmetric connectedness among S&P 500, crude oil, gold and Bitcoin. *Managerial Finance*, 48(4), 587–610. <https://doi.org/10.1108/MF-08-2021-0355>
- Johansen, S., & Juselius, K. (1990). Maximum likelihood estimation and inference on cointegration: With applications to the demand for money. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 52(2), 169–210.
- Le, T. H., & Luong, A. T. (2022). Dynamic spillovers between oil price, stock market, and investor sentiment: Evidence from the United States and Vietnam. *Resources Policy*, 78, 102931. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102931>
- Leite, A. R., Almeida, L. M. L., & Rech, L. T. (2016). Existe transmissão de preços do barril do petróleo Brent para as ações preferenciais da Petrobras? *Revista Espacios*, 37(25).
- Liu, F., Shao, S., & Zhang, C. (2020). How do China's petrochemical markets react to oil price jumps? A comparative analysis of stocks and commodities. *Energy Economics*, 92, 104979. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104979>
- Lopes, A. O., Viegas, T. O. C., Conte Filho, C. G., & Carvalho, V. S. (2021). Factors influencing Petrobras stock prices (PETR4) between 2009 and 2020. *Research, Society and Development*, 10(7), e13410716294. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16294>
- Mensi, W., Vo, X. V., & Kang, S. H. (2023). Quantile spillovers and connectedness analysis between oil and African stock markets. *Economic Analysis and Policy*, 77, 249–265. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2023.02.002>
- Mussa, A., Securato, J. R., dos Santos, J. O., & Famá, R. (2011). A influência das condições do mercado acionário e da política monetária no comportamento dos indicadores de risco tamanho, índice book-to-market e momento, no mercado acionário brasileiro. *Revista de Ciências da Administração*, 13(29), 152-172.
- Nazareno, N. C. M. (2023). *Contribuição do preço internacional do petróleo e de variáveis macroeconômicas na inflação brasileira, 2002–2021* [Dissertação de Mestrado, UFSCar]. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/17649>
- Osah, T. T., & Mollick, A. V. (2023). Stock and oil price returns in international markets: Identifying short and long-run effects. *Journal of Economics and Finance*, 47, 116–141. <https://doi.org/10.1007/s12197-022-09602-x>
- Perlin, M. S. (2021). *yfR: Download and process financial market data from Yahoo Finance (v1.1.0)* [Pacote R]. <https://CRAN.R-project.org/package=yfR>

- Qin, J., Cong, X., Ma, D., & Rong, X. (2024). Dynamic quantile connectedness between oil and stock markets: The impact of the interest rate. *Energy Economics*, 136, 107741. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107741>
- Regina, S. P., Santos, F. O., Lima, H. C. P., & Souza, W. A. R. (2012). Avaliação da correlação entre o preço das ações e das commodities: Estudo de caso da Petrobras e Vale. *Revista de Administração e Contabilidade da Faculdade Anísio Teixeira*, 4(2). <http://www.reacfat.com.br/index.php/reac/article/view/50>
- Rego, J., & Marques, R. (2006). *Economia brasileira* (3ª ed.). São Paulo: Saraiva.
- Reis, F., & Santana, A. (2024). Brazilian Stock Market and The Oil Price: An Investigation Using the Svar Model. *Studies of Applied Economics*. <https://doi.org/10.25115/vtj92t06>.
- Ribeiro, M. A. S. (2022). *O impacto do sentimento do investidor na cross-section de retornos de ações brasileiras: Uma análise da iliquidez como limite à arbitragem* [Dissertação de Mestrado].
- Roudari, S., Mensi, W., Kharusi, S. A., & Ahmadian-Yazdi, F. (2023). Impacts of oil shocks on stock markets in Norway and Japan: Does monetary policy's effectiveness matter? *International Economics*, 173, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2023.01.006>
- Sadorsky, P. (2000). The empirical relationship between energy futures prices and exchange rates. *Energy Economics*, 22(2), 253–266. [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(99\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(99)00027-4)
- Salisu, A., & Gupta, R. (2020). Oil shocks and stock market volatility of the BRICS: A GARCH-MIDAS approach. *Global Finance Journal*, 100546. <https://doi.org/10.1016/J.GFJ.2020.100546>.
- Santos, A. I. A. O. (2015). *O impacto dos preços do petróleo nos mercados acionistas: o caso brasileiro* [Tese de Doutorado, ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa].
- Santos, D., Lucas, E. C., Brunassi, V. A., & Medeiro, B. (2015). Influência intradiária do preço internacional do petróleo nas ações da Petrobrás. *Journal of Financial Innovation*, 1(1), 4–17.
- Shen, Y. (2025). Beyond CAPM: The Rise and Relevance of Arbitrage Pricing Theory in Modern Investment Strategies. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2024.19316>.
- Silva, B. F. D. (2011). *Relações entre o preço internacional do petróleo e as ações da Petrobrás* [Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília]. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/8848>
- Silveira, T. L. (2016). *Uma análise da relação entre o comportamento de variáveis macroeconômicas e o mercado acionário brasileiro de 2006 a 2014* [Dissertação de Mestrado].

- Sims, C. A. (1980). Macroeconomics and reality. *Econometrica*, 48(1), 1–48. <https://doi.org/10.2307/1912017>
- Souza, T. A., & Veríssimo, M. P. (2013). O papel das commodities para o desempenho exportador brasileiro. *Indicadores Econômicos FEE*, 41(3), 139–158.
- Theodoro, T. L. C. (2021). *O impacto do preço do petróleo nas empresas de energia renovável: Uma análise empírica usando vetores autoregressivos* [Tese de Doutorado].
- Trinh, P. T. T., & My, B. T. T. (2023). The impact of world oil price shocks on macroeconomic variables in Vietnam: The transmission through domestic oil price. *Asia Pacific Economic Literature*, 37(1), 38–55. <https://doi.org/10.1111/apel.12381>
- Wang, L. (2019). Stock Market Valuation, Foreign Investment, and Cross-Country Arbitrage. *Global Finance Journal*. <https://doi.org/10.1016/J.GFJ.2018.01.004>.
- Wolff, L., Santos, E., & Souza, A. M. (2011). Influência do mercado acionário norte-americano sobre o preço das principais ações brasileiras. *Revista Organizações em Contexto*, 7(14), 191–210. <https://doi.org/10.15603/1982-8756/roc.v7n14p191-210>
- Wu, W., Li, Z., & Feng, X. (2024). International interest rate arbitrage: Study on a novel strategy. *International Review of Financial Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2024.103705>.
- Xiao, X., & Huang, J. (2018). Dynamic connectedness of international crude oil prices: The Diebold–Yilmaz approach. *Sustainability*, 10(9), 3298. <https://doi.org/10.3390/su10093298>
- Zhang, B., & Wang, P. (2014). Return and volatility spillovers between China and world oil markets. *Economic Modelling*, 42, 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.07.013>



NOTAS

Licença de Uso

Os autores cedem à **Revista de Ciências da Administração** os direitos exclusivos de primeira publicação, com o trabalho simultaneamente licenciado sob a **Licença Creative Commons Attribution (CC BY) 4.0 International**. Esta licença permite que terceiros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho publicado, atribuindo o devido crédito de autoria e publicação inicial neste periódico. Os autores têm autorização para assumir contratos adicionais separadamente, para distribuição não exclusiva da versão do trabalho publicada neste periódico (ex.: publicar em repositório institucional, em site pessoal, publicar uma tradução, ou como capítulo de livro), com reconhecimento de autoria e publicação inicial neste periódico.

Editora

Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Ciências da Administração. Publicação no **Portal de Periódicos UFSC**. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Editores

- Rosalia Aldraci Barbosa Lavarda
- Leandro Dorneles dos Santos

Histórico

Recebido em:	23-05-2025
Aprovado em:	18-06-2026
Publicado em:	29-06-2026