

ARBITRAGEM E COINTEGRAÇÃO DAS MOEDAS DIGITAIS BITCOIN E LITECOIN

RICARDO RATNER ROCHMAN

Fundação Getúlio Vargas
ricardo.rochman@fgv.br

LUÍS HENRIQUE MITSUYUKI OLIVEIRA IMAGIIRE

Fundação Getúlio Vargas
rrrochman@hotmail.com

ÁREA: FINANÇAS

ARBITRAGEM E COINTEGRAÇÃO DAS MOEDAS DIGITAIS BITCOIN E LITECOIN

Resumo

A corrida pelo mercado das moedas digitais se iniciou com o surgimento do Bitcoin. Atualmente existem mais de 500 moedas digitais alternativas ao Bitcoin, e um grande mercado especulativo que transacionam estes ativos. O objetivo deste trabalho é analisar a possibilidade de arbitragem no mercado de moedas digitais. Será testado a hipótese de eficiência fraca de mercado como definida por Fama (1970) no longo prazo entre as duas moedas mais antigas do mercado, Bitcoin e Litecoin. Ainda que haja um desequilíbrio para arbitragem no curto prazo, este não deverá existir no longo prazo. Portanto, a existência de uma relação de cointegração entre as variáveis contestaria a hipótese de eficiência de mercado.

Palavras-Chave: Bitcoin, Eficiência de Mercado, Cointegração

Abstract

The introduction of bitcoin as the first crypto-currency in 2009 spurred a great interest in the digital coins market. Currently, there are more than 500 alternative digital coins being traded over the internet. The objective of this paper is to analyze the possibility of arbitrage in the digital currency market. The weak efficient-market hypothesis, as defined by Fama (1970), was tested in the long run between the two oldest digital currencies, Bitcoin and Litecoin. Although there might be arbitrage opportunities in the short term, this should not hold on the long run. Therefore, the existence of a cointegration relationship between the returns of these assets would challenge the efficient-market hypothesis.

Keywords: Bitcoin, Efficient-Markets, Cointegration

Introdução

O início da internet na década de 1990 marca um momento de muitas mudanças no mundo. Dentre as inúmeras utopias tecnológicas nascidas da euforia da década de 90, muitos sonhavam com a possibilidade de uma moeda virtual que pudesse ser transacionada anonimamente pela nova rede mundial de computadores. Apesar do esforço de muitos criptógrafos e programadores, os projetos não avançaram visto a dificuldade de solucionar o problema de “*double spending*” - o arquivo-moeda não pode ser copiado e utilizado em mais de uma transação simultaneamente. Os anos 2000 datam o começo do e-commerce, que viria a se popularizar rapidamente no mundo todo. Atenção voltada ao e-commerce, a ambição de se criar uma moeda digital descentralizada fora esquecida.

Entretanto, em novembro de 2008, a ideia de uma moeda digital ressurgiu com o Bitcoin, uma moeda virtual anônima e descentralizada, isto é, que opera sem a necessidade de uma instituição intermediária. Não é necessário um banco central para emití-la, e muito menos um banco comercial para guardá-la de forma segura. Os próprios usuários são quem “mineram” os Bitcoins e a transacionam diretamente de forma anônima pela internet.

O usuário deve somente baixar o programa do Bitcoin em seu computador para começar a utilizá-lo. O cliente Bitcoin salva os Bitcoins de um indivíduo em um arquivo chamado de “*wallet*”, que como o próprio nome diz, funciona como uma carteira digital. Os clientes se conectam a um outro através da Internet formando uma rede “*peer-to-peer*”. Desta maneira o sistema total do Bitcoin é construído de tal forma que ele é imune a um ataque central; uma vez que as transações são feitas em conexões diretas entre os envolvidos, sem a necessidade de um intermediador central.

Novos Bitcoins são emitidos por usuários conhecidos como mineiros. Estes mineiros digitais usam seus computadores para gerarem soluções para problemas matemáticos que ajudam a garantir a integridade e a segurança do sistema como um todo. Uma vez que o número de mineiros operando na rede está sempre variando, a dificuldade de cada problema matemático se ajusta para garantir que Bitcoins sejam criados a uma taxa pré-determinada, estabelecendo um crescimento constante do estoque da moeda. O número de Bitcoins gerados por solução dos problemas é reduzido a cada quatro anos em 50%, e no limite, a quantidade total de Bitcoins não deve passar de 21 milhões.

Quando o projeto do Bitcoin foi publicado em 2008, a confiança da população na habilidade do governo e de bancos no controle da oferta de moeda estava enfraquecida. O governo americano estava resgatando os grandes bancos de investimentos e as empresas automobilísticas americanas da falência. O federal reserve começava sua primeira onda do “*quantitative easing*”, aumentando a base monetária para estimular a economia. Enquanto a confiança no governo se deteriorava, o Bitcoin somente necessitava na confiança nos algoritmos “*open-source*” de Satoshi Nakamoto, pseudônimo do idealizador do Bitcoin.

O objetivo deste trabalho é analisar a possibilidade de arbitragem no mercado de moedas digitais, por meio de análise das séries históricas das duas moedas mais antigas do mercado, Bitcoin e Litecoin. Como objetivo secundário será avaliada a hipótese de eficiência fraca do mercado, conforme Fama (1970).

2. O Protocolo Bitcoin

Um dos principais conceitos da formulação do Bitcoin é criar um sistema financeiro sem a necessidade de uma instituição intermediária. Esta instituição pode ser centralizadora, como por exemplo um Banco Central, ou descentralizada, como Bancos comerciais e Bancos de Investimento. O meio utilizado é a criação de uma moeda digital descentralizada, mais especificamente, de contratos digitais descentralizados. Para entender o que são contratos

descentralizados é necessário compreender o protocolo no qual o Bitcoin é criado, e a partir disto estender a concepção e a infinidade de possibilidades de utilização destes contratos digitais.

Muitos trabalhos feitos sobre a temática das moedas digitais discutem a implicação de a adoção desta moeda para a economia, ou se o Bitcoin é uma bolha especulativa. Normalmente tomam como dado as promessas do protocolo Bitcoin e prosseguem discutindo a implicação da inovação da moeda digital. Entretanto, o Bitcoin e as outras crypto-currencies são somente uma aplicação específica da tecnologia do protocolo Bitcoin. Deve-se compreender que a inovação deste protocolo vai além das crypto-currencies, e juntamente com o conceito de contratos inteligentes, apresenta potencial inovador ilimitado.

Para melhor entender o protocolo, será explicado o racional do qual ela foi evoluindo e os consequentes problemas que surgiram ao longo do tempo. Os problemas enfrentados pelo Bitcoin são majoritariamente problemas de segurança, como por exemplo, impedir que pessoas não consigam roubar ou se passar por outros usuários. No mundo digital a segurança é obtida através da criptografia, portanto, esta é a parte vital de todo o protocolo Bitcoin.

O primeiro problema que surge é a falsificação. Assim como um qualquer outro arquivo de dados desprotegido dentro de um computador pode ser copiado e multiplicado quantas vezes o usuário desejar, e transmitido para quantas pessoas ele quiser, uma moeda digital também poderia. Para solucionar este problema, recorreu-se à assinatura criptográfica, ou seja, uma pessoa, digamos Luís, pode gerar uma mensagem dizendo: "Eu, Luís, transfiro 1 moeda de código XXX para João" utilizando uma chave criptografada pessoal e transmitir essa mensagem pela rede. Todos os usuários da rede conseguem abrir a mensagem e sabem que o arquivo foi criado por Luís. Nesta mensagem resolvemos dois problemas de falsificação.

O primeiro é a intenção e autenticidade, como a mensagem é gerada através da chave criptografada pessoal de Luís ela não pode ter sido gerada por outra pessoa que não o próprio, e Luís não pode negar e responder que não tinha a intenção de enviar a moeda (negando a própria mensagem). O segundo problema é que ao adicionar o número de código da moeda, esta mensagem não pode ser replicada, causando confusão; por exemplo, suponha que Luís envie a mensagem "Eu, Luís, envio 1 moeda para João" cem vezes, não sabemos se a intenção era de enviar cem moedas ou se ele desejava enviar 1 moeda e enviou a mensagem mais noventa e nove vezes para confirmar. Com o código da moeda, sabemos qual é de fato a intenção de Luís.

Para que o sistema funcione, precisamos de um sistema seguro que gere o código de cada moeda. Neste caso, poderíamos criar uma instituição garantida pelo estado que regule a emissão de moeda e garanta a autenticidade da transação, como por exemplo um banco. O banco regularia a emissão destas moedas, controlando o código de emissão, monitoraria a transação (de onde vem e para onde vai cada moeda) e verificaria legitimidade (se Luís possui aquela moeda para enviar a Joao). Desta maneira, quando Luís transmite a mensagem " Eu, Luís, envio 1 moeda de código XXX para João", João pode entrar em contato com a instituição banco e conferir se Luís possui a moeda XXX e se ele não enviou esta moeda para outra pessoa, o banco por sua vez irá verificar com Luís e aprovará ou reprovará a transação, de acordo com os critérios estabelecidos.

A tecnologia do Bitcoin é ambiciosa pois ataca diretamente a existência desta instituição intermediária. Se todas as transações feitas puderem ser registradas em um livro-razão público de fácil acesso a todos, não precisaríamos mais da intermediação de bancos. Neste Livro-razão, João poderia utilizar sua cópia do livro-razão, consultar se Luís realmente possui a moeda XXX, e ao aceitar a transação, transmitir para a rede atualizando o livro-razão público.

Este livro-razão é conhecido como "*block chain*" no protocolo do Bitcoin, e todos os usuários possuem uma cópia do "*block chain*" que deve ser atualizada constantemente. Dois

problemas surgem desta ideia: Como garantir a autenticidade do código de cada moeda? Como o livro-razão é atualizado?

O segundo problema é relacionado com a questão de que Luís poderia enviar duas mensagens ao mesmo tempo para duas pessoas utilizando o mesmo código. Suponha que Luís envie as seguintes mensagens: "Eu, Luís, envio 1 moeda de código XXX para Joao" e "Eu, Luís, envio 1 moeda de código XXX para Rafael". Supondo que João e Rafael consultem o livro-razão ao mesmo tempo, e verifiquem que a moeda pertence a Luís, ambos darão procedimento a transação. Ao tentar atualizar o livro de razão-público, João e Rafael teriam um problema, pois ambos estão tentando receber a mesma moeda.

A estratégia deve ser muito precisa, pois Luís tem que enviar a mensagem quase ao mesmo tempo para os dois, pois se um dos receptores receber a mensagem e conseguir comunicar a transação para a rede, o outro receptor saberá da transação e rejeitará a mensagem de Luís; mas ainda assim é uma estratégia crível de ser realizada.

Para resolver este problema, João ou Rafael poderiam verificar junto a rede a possibilidade da transação enviando mensagens de intenção da transação para toda a rede. Outros usuários iriam receber essas intenções e verificar se a transação é válida. Neste caso, a rede verificaria que há duas intenções de transação para uma mesma moeda e responderia João e Rafael que a transação possui um erro. Caso a transação fosse validada por um número considerável de usuários da rede, a mensagem de confirmação seria transmitida e o livro-razão se atualizaria corretamente. O problema que surge agora é de como definir quantos usuários são necessários para verificar a intenção de transação? Luís poderia gerar várias identidades diferentes e aprovar a transação passada, enganando João ou Rafael.

Este problema específico é solucionado através dos "problemas matemáticos" criados artificialmente pelo protocolo para gerar um custo computacional, tornando inviável a estratégia de Luís gerar várias identidades para validar a transação, pois o que importa é o poder computacional que será utilizado para resolver estes problemas e não o número de identidades que Luís pode controlar. Estes problemas matemáticos são chamados de "*proof-of-work*" no protocolo Bitcoin. Não será discutido em detalhes de como o problema é gerado, mas o assunto é melhor discutido em Satoshi (2008) e Nielsen (2013).

Como a resolução deste problema gera um enorme esforço computacional, é necessário que haja alguma forma de benefício para quem fornece este poder computacional. Quem fornece este serviço no Bitcoin são os "mineradores", que ao resolver estes problemas matemáticos e comprovarem a validade das transações, são remunerados em Bitcoins. No início a remuneração era de 50 Bitcoins para cada bloco de transação validado.

Hoje, a remuneração é de 25 Bitcoins, pois a cada 210 mil blocos validados, a remuneração cai pela metade. Estima-se que isso deve acontecer a cada 4 anos, logo no ano de 2140 a oferta total de Bitcoins tenderá a zero. Isso não eliminaria o incentivo dos mineradores, pois seria possível alterar o protocolo de modo a cobrar uma taxa por transação validada que seria transmitida aos mineradores. E aqui solucionamos o problema anterior de como o número de série das moedas é gerado. Cada moeda é gerada pelo sistema e distribuída inicialmente aos mineradores.

3. Passeios Aleatórios e Eficiência de Mercado

Samuelson (1965) apresenta a primeira aplicação do teste da hipótese de passeio aleatório. Acessando que em um mercado eficiente, movimento de preços são aleatórios e, portanto, não podem ser antecipados. O conceito desafiava aqueles que utilizavam análises fundamentalistas e técnicas como instrumento para buscar retornos acima do Mercado. Samuelson argumenta que em um mercado eficiente existe um exército de investidores que se ajustam a qualquer

pequeno pedaço de nova informação divulgado. Os investidores são considerados maximizadores de utilidade, e operam sob expectativas racionais, ou seja, com base na informação disponível, elaboram previsões para o futuro que na média estão corretas. Todo novo pedaço de informação disponível é incorporado rapidamente pelos agentes, impossibilitando qualquer tipo de mecanismo de arbitragem.

A hipótese de eficiência de Mercado torna-se após Samuelson um tópico muito estudado, e quase um consenso na academia. Jensen (1978) argumenta que, em sua opinião, não existe nenhuma outra proposição que possui indícios empíricos como a hipótese de eficiência de Mercado. A partir dos anos 80, a hipótese de eficiência de mercado começa a sofrer ataques.

Em 1985, Werner F. M. De Bondt and Richard Thaler encontram evidências de ineficiência de mercados, pois os agentes estavam reagindo de forma desproporcional à informação no curto prazo. Este trabalho iniciou a área de estudo de finanças comportamentais.

DeBondt e Thaler (1995) argumentam que investidores estão sujeitos a emoções e podem ser influenciados pelo otimismo ou pessimismo, levando o preço a desviar do seu valor real. Este padrão ainda é consistente com o trabalho de economia comportamental de Kahneman e Tversky (1982), em que investidores possuem um excesso de confiança na habilidade de prever preços e retornos de empresas, cometendo erros sistemáticos.

Fama (1970) sintetiza a hipótese de eficiência: se o mercado for eficiente, então, os preços devem refletir inteiramente toda a informação disponível. Fama (1970) ainda propõe uma divisão de estudo da hipótese de eficiência em 3 segmentos: a hipótese fraca, semiforte e forte. A hipótese fraca de eficiência refere-se a quão bem retornos passados podem prever retornos futuros, ou seja, diz respeito a uma área mais geral que testa a previsibilidade de retornos. A hipótese semiforte refere-se à quão rápido o preço reage a novos anúncios e informações; testes que abordam esta hipótese são chamados de estudos de eventos. A hipótese forte atesta que mesmo informações privadas não garantem retornos anormais.

Grossman e Stiglitz (1980) argumentam que a condição para a validade desta última é de que a informação e os custos de transação sejam zero. Uma vez que existem custos de transação e de obtenção de informação, a hipótese forte de eficiência de mercado é claramente irrealista.

A Hipótese de passeio aleatório é equivalente à hipótese de eficiência fraca de mercado; dado o framework proposto de agentes maximizadores, os retornos de ativos devem ser imprevisíveis pelo seu passado, isto é, a hipótese fraca de eficiência de mercado deve ao menos ser verdadeira dentro de mercados com custos de informação e transação. Lo e Mackinlay (1998) demonstram que as duas hipóteses só são equivalentes em um contexto específico de neutralidade de risco. Lucas (1978) exemplifica mercados em que a hipótese de eficiência é atendida, mas o processo gerador dos preços não é um passeio aleatório.

Apesar da temática de eficiência de mercado ser um dos temas mais debatidos na literatura de finanças nos últimos 30 anos, há pouco consenso entre os que defendem a hipótese de eficiência de mercado e aqueles que a contestam. Fricções de mercado, hipótese de aversão ao risco, vantagens de tecnologia financeira e outros tipos ruídos inviabilizam a conclusão final de eficiência (ou de ineficiência) dos mercados estudados.

É importante ressaltar que a hipótese de eficiência de mercado define que o mercado é eficiente em relação à informação, ou seja, preço reflete completamente toda a informação disponível. Se tomarmos mercados com informação imperfeita entre os agentes, que é razoável para mercados do mundo real, a hipótese de eficiência de mercado é falsa na maioria das vezes. Contudo, como hipótese de longo prazo, em que mercados aprendem e corrigem seus erros, a hipótese de eficiência de mercado é uma teoria muito forte.

Lo e Mackinlay (2002) demonstram que para certos mercados existe certa previsibilidade de retornos, encontrando certa tendência que duram alguns trimestres, mas isso não significa que o mercado é ineficiente; se a informação não for perfeita, é possível desvios e possibilidades de

arbitragens no curto prazo. Ou seja, o mercado pode ser eficiente (em relação à informação), mas a precificação de um ativo não é sempre perfeita.

Este trabalho adota uma definição mais ampla de eficiência de mercado. Permite-se que ocasionalmente possa existir algum tipo oportunidade de arbitragem no curto prazo, mas estas não podem ser exploradas sistematicamente, ou seja, no longo prazo o preço reflete o valor real. Decorre disso que entre um par de preços de um mercado especulativo eficiente não pode existir uma relação de cointegração; de outro modo, um poderia ser utilizado para prever o preço do outro sistematicamente, contradizendo a hipótese de eficiência de mercado.

Será abordado também a hipótese de passeio aleatório, uma vez que se tratando especialmente do mercado de moedas digitais, onde o custo de transação e informação é baixo, o teste de eficiência fraca de mercado se torna relevante.

4. Análise dos Dados

Foram utilizadas as séries da taxa de câmbio do Bitcoin e Litecoin em relação ao dólar obtidos no site Quandl¹, referentes aos preços de fechamento (BTC/USD e LTC/USD) na casa de câmbio BTC-e entre o período de 13/07/2014 e 05/11/2014 (846 observações). Bitcoin e o Litecoin são as duas maiores moedas digitais em valores de mercado: 6 bilhões de dólares e 168 milhões de dólares², respectivamente. Além das duas moedas serem as duas mais valiosas em termos de mercado, também são as mais antigas e, portanto, possuem maior número de informação e dados disponíveis. Abaixo são apresentados as estatísticas descritivas e os gráficos das séries de câmbio e dos retornos que serão utilizadas na modelagem econométrica. A taxa de câmbio do Euro, obtida também através do portal Quandl, é disponibilizada a seguir como comparação. Foi utilizado o software EVIEWS v8 no processamento dos dados.

Gráfico 4.1 – Taxa de câmbio diária USD/BTC

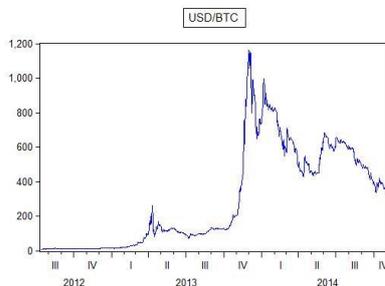


Gráfico 4.2 – Taxa de câmbio diária USD/LTC

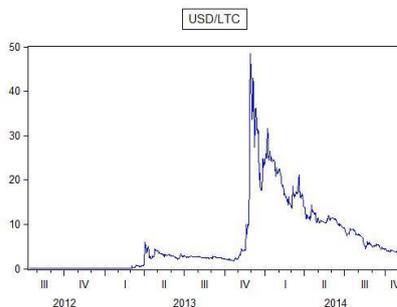


Gráfico 4.3 – Taxa de câmbio diária USD/EUR em logaritmo

¹ Disponível em <http://www.quandl.com>

² Consulta feita no dia 07/09/2014 no site Coinmarket.com. Visualização completa do “Market Share” de cada moeda está disponível em <http://coinmarketcap.com/currencies/views/all/>.



Gráfico 4.4 – Retornos diários BTC

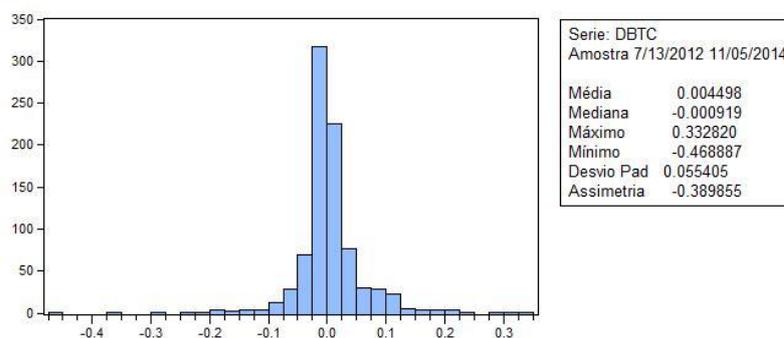
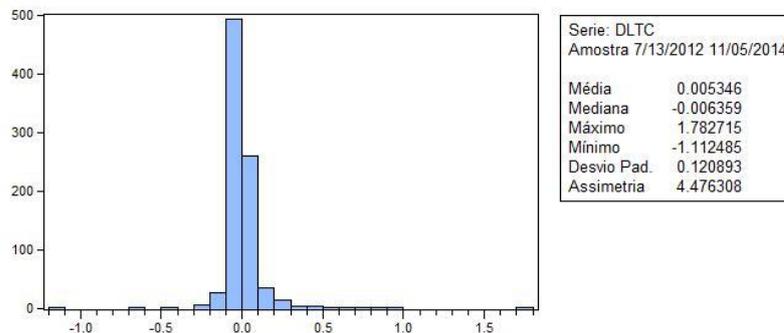


Gráfico 4.5 – Retornos diários LTC



Uma análise gráfica preliminar sugere que as séries de preços do Bitcoin e Litecoin, tanto em nível como em log, são séries não estacionárias, existindo alguma forma de tendência estocástica. As séries de retorno são aparentemente estacionárias, reforçando a hipótese de que as séries de preço sejam integradas de ordem 1. Uma análise mais cuidadosa será feita no capítulo dos resultados empíricos utilizando testes de identificação da existência de raiz unitária, assim como uma revisão sobre o conceito de não-estacionariedade, apresentado no capítulo metodológico.

Os histogramas dos log-retornos do Bitcoin e Litecoin sugerem existência de caudas pesadas, fato estilizado do retorno de séries financeiras como discutido por Fama (1965) e Mandelbrot (1963). Pelo teste Jarque-Bera apresentado acima, podemos rejeitar a hipótese de normalidade das distribuições do retorno de ambas as moedas. Uma explicação para este fato é a própria natureza dos dados, uma vez que dados financeiros tem distribuições com caudas pesadas, e normalmente estrutura na variância condicional.

Além disso, ao comparar o retorno destas moedas ao retorno da taxa de câmbio do euro em relação ao dólar, percebe-se que as distribuições dos retornos das moedas digitais possuem uma distribuição de caudas muito mais pesadas que a distribuição da taxa do euro. Sendo assim, o

mercado cambial de moedas digitais se mostra bastante instável, ainda mais quando analisamos o gráfico Box-Plot dos retornos; os retornos do Litecoin acabam distorcendo o gráfico dada a variação de até 160% em um único dia.

Em uma análise das séries de preço das duas moedas digitais, há indicação de correlação. As duas séries aparentam se mover em conjunto. Podemos também suspeitar de ao menos duas quebras estruturais nas séries. Estas características serão abordadas no capítulo metodológico a seguir.

5. Metodologia

Com o intuito de responder à questão de eficiência de mercado, devemos primeiramente identificar a ordem de integração das variáveis, uma vez que uma condição necessária para a existência de cointegração é a não estacionariedade das séries. As condições de estacionariedade fraca são presentes quando a média, variância e a auto-covariância é constante no tempo. Séries estacionárias e não estacionárias possuem propriedades muito diferentes, por exemplo, um choque em um processo estacionário irá ter seu efeito enfraquecido ao passar do tempo, regredindo a média da série, enquanto em uma série não estacionária este choque seria altamente persistente e não seria amortecido ao passar do tempo, podendo até desestabilizar a série levando a um resultado explosivo. A utilização indevida de regressões em séries não estacionárias pode resultar em uma regressão espúria. Como discutido por Granger e Newbold (1973), no caso em que as restrições de estacionariedade não sejam impostas: os parâmetros estimados serão ineficientes, a previsão do modelo será sub-ótima e os testes estatísticos de significância para os coeficientes serão inválidos. Visto que processos não estacionários possuem algum tipo de tendência, seja na média como na variância, esta tendência deve ser identificada para eliminar sua fonte de não estacionariedade. Um procedimento formal de testar a estacionariedade de uma série se dá através da verificação da existência de alguma raiz unitária no componente Autoregressivo do processo. Os testes mais comuns na literatura, e que serão utilizados neste trabalho, são o teste de Dick- Fuller (Teste ADF - 1979) e o desenvolvido por Phillips e Perron (Teste PP - 1988). No teste de Dick e Fuller desejamos testar se $\phi = 1$, ou seja, se há uma raiz unitária. Visto que a estatística de teste muda quando incluímos uma constante ou um componente de tendência determinística, os três possíveis testes são:

$$\begin{aligned}x_t &= \phi x_t + u_t \\x_t &= \phi x_t + \mu + u_t \\x_t &= \phi x_t + \mu + \psi t + u_t\end{aligned}$$

A estatística teste para cada caso é diferente, pois ela não segue uma distribuição padrão. Contudo, seus valores foram tabulados por Dick e Fuller (1979). A hipótese para a obtenção da estatística de teste é $u_t \sim NI(0,1)$. A hipótese a ser testada é:

$$\begin{aligned}H_0: \phi &= 1 \\H_a: \phi &< 1\end{aligned}$$

O problema com o teste ADF é que ele possui baixo poder em distinguir um processo que possui raiz unitária de um processo com um coeficiente próximo de uma raiz unitária, mas ainda estacionário. O problema existe, pois, muitas vezes não podemos rejeitar a hipótese de raiz unitária por falta de informação, ou seja, em amostras pequenas o teste pode se mostrar problemático. O teste PP é similar ao teste ADF, mas é robusto à heterocedasticidade e autocorrelações na série. Um problema na utilização destes testes neste trabalho é a possível existência de quebras estruturais nas séries. Perron (1989) mostra que os testes falham em rejeitar a existência de uma raiz unitária quando existe alguma mudança no nível ou inclinação da tendência da série, e que este problema se mantém mesmo assintoticamente.

Os modelos abordados serão os modelos da classe VAR (Autoregressivo vetorial) e os modelos VEC (Correção de erros vetoriais). Uma representação do VAR pode ser feita da seguinte forma:

$$\mathbf{y}_t = \varepsilon_t + \sum_{j=0}^q \varphi_j \mathbf{y}_{t-j} ; \varepsilon_t \sim NI_n[0, \Omega]$$

Aparentemente, as duas séries de preço não são estacionárias, mas a série de retorno parece ser estacionária, ou seja, como dito anteriormente temos indícios de que as séries sejam I (1). Muitas teorias econômicas discutem as relações entre variáveis no longo prazo, mais especificamente a existência de um equilíbrio entre essas variáveis. Mesmo quando há desvios deste equilíbrio no curto prazo, essas variáveis deverão voltar ao equilíbrio no longo prazo. Granger (1986) introduz o conceito de cointegração para tentar harmonizar os modelos econométricos com as teorias econômicas, propondo a separação entre efeitos de longo e curto prazo. Variáveis como nível de salários nominais e nível de preços, exportação e importação, variáveis que se acredite ter um equilíbrio de longo prazo, são variáveis que co-integram. Granger e Engle (1987) levantaram a hipótese de que duas ou mais séries não-estacionárias possam co-integrar, isto é, existe uma combinação linear entre estas séries que possa ser estacionária mesmo que nenhuma das séries sejam estacionárias. Se as séries co-integram elas se movem juntas no longo prazo, e portanto, a utilização de um modelo VAR em primeira diferença (no caso de séries I (1), por exemplo) não capturaria estes movimentos de longo prazo. Caso não haja co-integração, o modelo utilizado deve ser os modelos da classe VAR em primeira diferença, caso contrário, o modelo VAR deve ser estendido para a classe de modelos de correção de erros vetoriais-VEC. Podemos reescrever o modelo VAR (K) com p lags como um VEC na seguinte forma:

$$\mathbf{y}_t = v + A_1 \mathbf{y}_{t-1} + \dots + A_p \mathbf{y}_{t-p} + \varepsilon_t$$

$$\mathbf{y}_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^{p-1} \gamma \mathbf{y}_{t-i} + \Pi \mathbf{y}_{t-1}$$

$$\gamma = - \sum_{i=1}^{j=p} A_j$$

$$\varepsilon_t \sim NI_n[0, \Omega]$$

$$\Pi = \sum_{j=1}^{j=p} A_j - I_k$$

Ou equivalentemente:

$$\mathbf{y}_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^{p-1} \gamma \mathbf{y}_{t-i} + \alpha \beta' \mathbf{y}_{t-1}$$

Supondo que a matriz Π possui posto reduzido, e portanto possa ser reescrita como:

$$\Pi = \alpha \beta'$$

Em que α representa a velocidade de ajuste do desequilíbrio para a relação ao longo prazo e β os coeficientes da relação de cointegração.

O modelo VEC contempla tanto variações de curto prazo e os efeitos de longo prazo. O componente Π acima é o termo de correlação de erros, e é estacionário se as variáveis co-integrarem, isto é, $\beta' \mathbf{y}_{t-1} \sim I(0)$. O teste de co-integração, portanto, é o equivalente a testar se o posto da matriz Π é reduzido e igual ao número de vetores de co-integração. Do contrário (Π possui posto completo, ou posto igual a zero), as variáveis não co-integrarão, visto que $\Pi \mathbf{y}_{t-1}$ será não estacionário e as variáveis se afastarão. O teste foi proposto por Johansen (1988), sugerindo um método para a estimação de α e β via estimadores de máxima verossimilhança. É necessário, contudo, levantar algumas ressalvas ao método proposto por Johansen, pois o método pode falhar em detectar uma relação de co-integração entre duas variáveis A e B que são co-integradas através de uma relação de co-integração com outra variável C

5.1 Quebra estrutural e método de Bai-Perron

Ao analisar todo o período das duas séries, podemos suspeitar a existência de pelo menos dois momentos de quebra de estrutura; sendo a primeira em março de 2013 e a segunda em novembro de 2013 (Ver gráfico 4.3.1). Como discutido por Johansen et al (2001), Joyeux (2001) e Perron (1989), a existência de quebras estruturais pode levar a conclusões errôneas sobre a existência de relações de cointegração e problemas nos testes de raiz unitária.

Gráfico 5.3.1 – Taxas de câmbio BTC e LTC em logaritmo



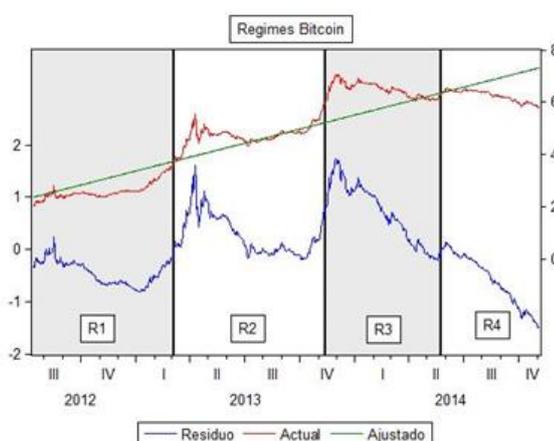
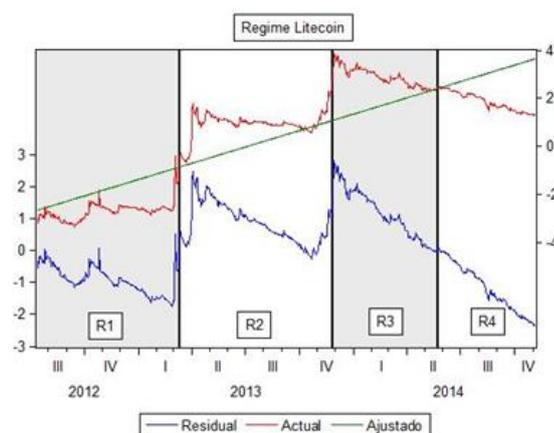
Como proposto por Bai-Perron (2003), o teste utilizado para a identificação será o “L contra L+1 quebras” (L versus L+1 breaks). O método realizará L+1 testes com a hipótese nula de nenhuma mudança estrutural, contra a hipótese alternativa de 1 quebra estrutural. O teste é aplicado para cada segmento $[\hat{T}_{i-1}, \hat{T}_i]$ com $i = 1, \dots, L + 1$ e \hat{T} é o período estimado de quebra, rejeita-se a hipótese nula a favor do modelo com L+1 quebras se o menor valor geral da soma do quadrado dos resíduos de cada período é suficientemente menor que a soma dos quadrados dos resíduos do modelo de L quebras. Ver Bai e Perron (1998, 2003).

O teste será feito sobre a regressão de ambas as séries em uma constante (c) e uma tendência linear. Permitirá a existência de correlação serial e heterocedasticidade nos resíduos, mas como a série é grande, utilizou-se um “trimming” de 15%. Como recomendado por Bai e Perron (2003), será permitido que as a distribuição de erros seja diferente entre as quebras, e os testes estatísticos contemplarão erros heterocedásticos e com autocorrelação (HAC), estimando a matriz robusta de covariância através do método de Andrew (1991).

O teste L contra L+1 aponta a existência de 3 pontos de quebra, tanto para a série de Bitcoin como para a de Litecoin (As regressões e os resultados dos testes estão disponíveis no apêndice A). As datas de quebra estimadas foram os dias 06/03/2013, 13/11/2013 e 25/05/2014 para o Bitcoin e 11/03/2013, 25/11/2013 e 23/05/2014 para o Litecoin. Desta forma, teremos 4 regimes para análise, como destacado pelos gráficos 5.3.2 e 5.3.3.

Visto que as datas são similares, a análise foi segmentada utilizando os períodos identificados na série da taxa de câmbio do Bitcoin. Logo, o regime 1 compreende ao período de 13/07/2012 até 06/03/2013, o regime 2 de 06/03/2013 até 13/11/2013, o regime 3 de 13/11/2013 até 25/05/2014 e o regime 4 de 25/05/2014 até 05/11/2014.

Gráfico 5.3.2 e 5.3.3 – Regimes Litecoin e Regimes Bitcoin



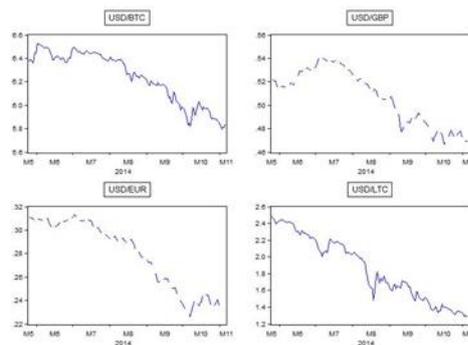
A primeira quebra no começo de março de 2013 pode ser relacionada a divulgação pela secretaria responsável pela fiscalização de crimes financeiros (“*Financial Crimes Enforcement Network*” -*FinCEN*) de diretrizes de regulamentação para moedas virtuais descentralizadas.³ O documento caracterizava os “mineradores de Bitcoin” americanos como prestadores de serviços financeiros, e submetendo-os a cadastro e outras obrigações. Uma diminuição na oferta de Bitcoins no mercado, levaria potencialmente a um aumento do preço da moeda.

A segunda quebra no início de novembro de 2013 relaciona-se com a grande exposição do Bitcoin na mídia após o fechamento do mercado clandestino Silk Road que operava dentro da “*deep web*”. O site foi fechado pelo FBI em 2 de outubro de 2013, e após a notícia de que as mercadorias ilícitas eram negociadas em uma moeda digital, o Bitcoin chegou ao grande público. O trabalho de Kristoufek (2013), se estendido para este caso, poderia explicar o impacto da mídia na demanda por Bitcoins, elevando assim o seu preço.

A terceira quebra em maio de 2014 pode ser relacionada ao menos parcialmente uma tendência de apreciação do dólar. Uma mesma tendência pode ser detectada, por exemplo, nas taxas de câmbio do euro e da libra esterlina (USD/EUR e USD/GBP, conforme gráfico 4.3.4).

Gráfico 5.3.4 – Taxas de câmbio diária comparação

³ Disponível em http://www.fincen.gov/statutes_regs/guidance/pdf/FIN-2013-G001.pdf. Acesso em 11/11/14.



6. Resultados

O processo adotado durante o trabalho de análise em cada regime será feito da seguinte forma:

- 1) Utilizar os testes ADF e PP, previamente discutidos no capítulo metodológico, buscando identificar o número de raízes unitárias presentes no processo gerador de cada série.
- 2) Modelar as séries em nível através de modelos da classe de Vetores autoregressivos (VAR), utilizando os testes de Breusch–Godfrey-Bertolo (teste LM) e de Portmanteau para identificar autocorrelação nos resíduos, o teste de White com termos cruzados para identificar presença de heterocedasticidade e o teste de Jarque-Bera para normalidade.
- 3) Especificado o melhor modelo para a série, será feito o teste proposto por Johansen (1988,1996), buscando identificar a existência da relação de cointegração entre as duas variáveis.

6.1 - Regime 1 – Taxas de câmbio diárias BTC/LTC

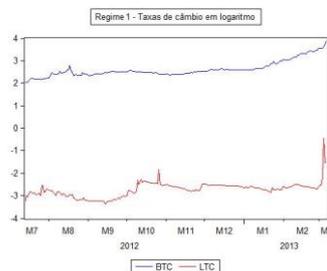


Gráfico 6.1.1 – Taxas de câmbio em logaritmo – Regime 1

Teste ADF e PP para a série BTC apontam para a existência de uma raiz unitária no teste em nível com tendência e constante, ou seja, BTC é $I(1)$. Teste ADF com tendência e constante, e PP com constante, apontam para uma raiz unitária na série LTC a nível de 5% de significância, assim LTC é $I(1)$ também. O teste de seleção ótima de defasagem aponta para 3 defasagens como melhor modelo por meio dos critérios de Hannan-Quin (HQ), Akaike (AIC), preditor final de erro (FPE) e LR. Logo, será estimado o modelo var com 3 defasagens.

Pelo teste LM para correlação serial dos resíduos, o modelo está bem especificado para a média. O teste de Portmanteau para auto-correlações também corrobora a conclusão do teste LM.

Contudo, o teste para normalidade de Jarque-Bera e teste para heterocedasticidade de White, apontam para problemas na normalidade e presença de heterocedasticidade nos resíduos.

Pelo teste de Johansen, temos que pelo critério de Schwarz, a indicação de um melhor modelo sem o componente de cointegração. Rejeitamos também a hipótese da existência de cointegração através do teste de máximo autovalor.

Concluimos que não existe relação cointegração entre as duas séries neste período. Contudo, deve-se notar que a eficiência do teste de Johansen não é ótima em situações de não normalidade e heterocedasticidade nos resíduos, como argumentado por Johansen (2001).

6.2 - Regime 2 – Taxas de câmbio diárias BTC/LTC

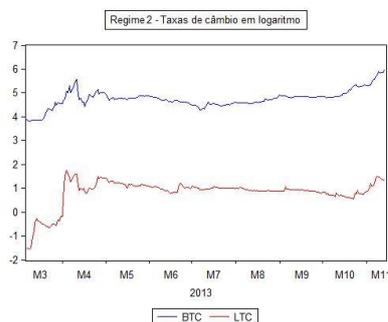


Gráfico 6.2.1 – Taxas de câmbio em logaritmo – Regime 2

Os testes ADF e PP para raiz unitária detectam a existência de uma raiz unitária para as séries BTC e LTC. Com ambas as séries possuindo a mesma ordem de integração, procedemos estimando o modelo VAR. No teste de seleção ótima de defasagem, pelos critérios AIC, FPE e LR o melhor modelo contém 17 defasagens, pelo HQ 14 e SC 2 defasagens. Os três modelos foram estimados. Contudo, somente o modelo com 17 defasagens aparece bem especificado para a média no teste LM para correlação serial dos resíduos. O modelo possui problemas tanto na normalidade dos resíduos como na heterocedasticidade, detectados pelos testes Jarque-Bera e White, respectivamente.

O método de Johansen indica a existência de uma relação de cointegração. Fora estimado o modelo indicado pelo critério de Schwarz, sem intercepto e tendência. Deve-se notar que apesar de haver problemas nos testes de posto e autovalor quando existe heterocedasticidade, a 33% de significância não podemos rejeitar a existência de uma relação de cointegração.

O modelo estima a relação de longo prazo de -0,22 entre o Litecoin e Bitcoin, e a matriz de cargas aponta a relevância em ambas as equações. O modelo está bem especificado para média até 5% de significância pelo teste LM, mas apresenta problemas com não normalidade e heterocedasticidade presente nos resíduos.

6.3 - Regime 3 – Taxas de câmbio diárias BTC/LTC

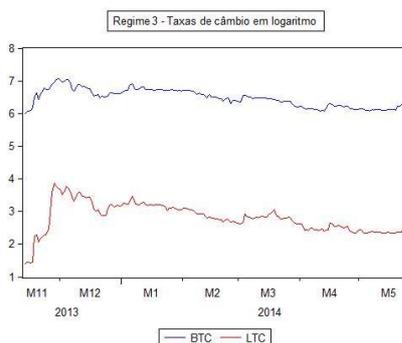


Gráfico 6.3.1 – Taxas de câmbio em logaritmo – Regime 3

Os testes ADF e PP indicam que ambas as series são I (1). Assim, procedemos estimando o modelo VAR. No teste de seleção ótima de defasagem, o critério de SC o melhor modelo é o de 2 defasagens, o critério de HQ indica 3 defasagens e para os critérios LR, FPE e AIC 4 defasagens. Utilizando critério da parcimônia começamos estimando e validando os modelos de menores defasagens. Tanto pelo teste de Portmanteau como o LM, rejeitamos o modelo com duas e três defasagens. O modelo de 4 defasagens é aceito pelo teste de Portmanteau em até 3%

de significância. Desta forma, utilizaremos este último modelo na condução dos testes. Temos novamente problemas com não normalidade e existência de heterocedasticidade nos resíduos. Conduzindo o método de Johansen, descobrimos a existência de uma possível relação de cointegração pelos testes de traço e maior autovalor. Utilizando o critério de SC fora estimado o seguinte modelo VECM com intercepto e sem tendência:

$$\begin{aligned}
 d(ltc) &= -0.26 * (ltc(-1) - 1.28 * btc(-1) + 5.45) + 0.39 * d(ltc(-1)) \\
 &\quad + 0.0031 * d(ltc(-2)) + 0.106 * d(ltc(-3)) - 0.28 * d(btc(-1)) \\
 &\quad - 0.56 * d(btc(-2)) - 0.308 * d(btc(-3)) \\
 d(btc) &= -0.103 * (ltc(-1) - 1.28 * btc(-1) + 5.45) + 0.156 * d(ltc(-1)) \\
 &\quad - 0.051 * d(ltc(-2)) + 0.171 * d(ltc(-3)) - 0.104 * d(btc(-1)) \\
 &\quad - 0.254 * d(btc(-2)) - 0.245 * d(btc(-3))
 \end{aligned}$$

O modelo estima a relação de longo prazo entre Litecoin e Bitcoin em -1,28, e a matriz de cargas é significativa nas duas equações. Este está bem especificado para média pelo teste de Portmanteau, mas também possui problemas de heterocedasticidade e não normalidade dos resíduos pelos testes Jarque-Bera e White.

6.4 - Regime 4 – Taxas de câmbio diárias BTC/LTC

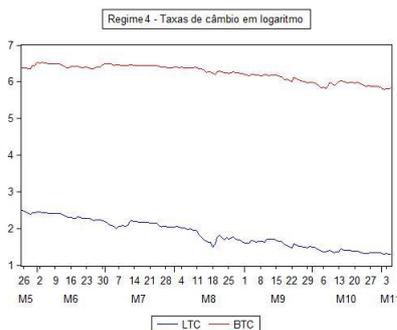


Gráfico 6.4.1 – Taxas de câmbio em logaritmo – Regime 4

Os testes ADF e PP indicam que ambas as series são I (1). Deste modo, procedemos estimando o modelo VAR.

O teste de seleção de defasagens aponta por todos os critérios que o melhor modelo é o de 1 defasagem. Ao validar este modelo, temos que este está bem especificado na média em até 5% de significância, segundo os testes de Portmanteau e LM. O modelo, porém, apresenta também problemas na não normalidade dos resíduos e presença de heterocedasticidade.

Através do método de Johansen, não podemos rejeitar a inexistência de uma relação de cointegração, e o melhor modelo segundo o critério de SC é sem tendência e sem intercepto. Contudo, quando analisamos os testes de traço, poderíamos rejeitar a hipótese de inexistência de cointegração com até 8% de significância. Visto que os problemas de não normalidade e heterocedasticidade nos resíduos afetam a eficácia dos testes propostos por Johansen, e a rejeição da hipótese de cointegração está no limiar, o modelo VECM com uma relação de cointegração com intercepto fora também estimado.

$$\begin{aligned}
 d(ltc) &= -0.011 * (ltc(-1) - 0.203 * btc(-1)) \\
 d(btc) &= -0.002 * (ltc(-1) - 0.203 * btc(-1))
 \end{aligned}$$

O modelo apresenta a relação de -0,203 entre Litecoin e Bitcoin no longo prazo, mas somente o componente do vetor de cargas da equação do Litecoin é estatisticamente significativo. O

modelo está bem especificado para a média, segundo o teste de Portmanteau, mas também possui problemas com heterocedasticidade e não normalidade nos resíduos, segundo o teste de Jarque-Bera e White.

Foi estimado também, como comparação o modelo VAR utilizando as séries em primeira diferença com 0 defasagens e constante. Este modelo apresenta um menor critério de AIC e SC, provando ser um melhor modelo que o VECM anteriormente estimado (-8,46 contra -8,40 no critério de SC, e -8,49 contra -8,47 no critério de Akaike). O modelo VAR também está bem especificado para a média, segundo o teste de Portmanteau, mas sofre de heterocedasticidade condicional (havendo estrutura nos resíduos quadrados e cruzados de ambas as equações) e de não normalidade.

Conclusões

O mercado de moedas digitais continua a crescer através da esperança de alto retorno. Contudo, a alta volatilidade das moedas digitais é camuflada em meio a promessas de alta estabilidade do poder de compra, baseado no livre algoritmo de criação das moedas e na ausência de uma instituição reguladora. O fato é que, como mostrado durante o trabalho, o mercado de moedas digitais é ainda muito volátil, e o valor destas moedas oscila muito mais que as moedas comuns. O Bitcoin e o Litecoin, atualmente, não podem ser considerados como moedas, mas como ativos financeiros virtuais de alto risco.

Analizamos aqui a possibilidade de arbitragem no mercado de moedas digitais, mais especificamente nos mercados de USD/BTC e USD/LTC, em períodos diferentes. Não é possível afirmar que há violação da hipótese de eficiência fraca de mercado, uma vez que dois períodos indicam a inexistência de uma relação de cointegração entre as variáveis. Deve-se ainda considerar que dada a limitação da eficácia dos testes de cointegração de Johansen, que na presença de heterocedasticidade e não normalidade tende a rejeitar a hipótese de inexistência de cointegração, poder-se-ia ter sobrestimado a existência de cointegração no regime 2 e 3. Foi conduzida uma investigação sobre a possibilidade de arbitragem triangular no mercado de moedas digitais. O conceito de arbitragem triangular é abordado em Wang et al. (2008) e Fenn et al. (2009). Contudo, não foi possível determinar a existência de nenhuma oportunidade de arbitragem devido ao baixo grau de liquidez no mercado de moedas digitais.

As moedas digitais ainda são recentes, e o mercado pouco robusto. Implicações econômicas de um crescimento do mercado de moedas digitais ainda são incertas. Futuros estudos sobre os potenciais ganhos na diminuição do custo de transação de uma economia que utiliza moedas digitais seriam relevantes. Na literatura de finanças, é possível explorar a utilização das moedas digitais na diversificação de portfólios, e também analisar como o mercado de moedas digitais reage a novas informações.

Referências Bibliográficas

- BAI, Jushan; PERRON, Pierre. Computation and analysis of multiple structural change models. *Journal of applied econometrics*, v. 18, n. 1, p. 1-22, 2003.
- BAI, Jushan; PERRON, Pierre. Estimating and testing linear models with multiple structural changes. *Econometrica*, p. 47-78, 1998.
- BONDT, W. the stock market overreact?. *The Journal of finance*, v. 40, n. 3, p. 793-805, 1985.
- ENGLE, R. F.; GRANGER, Camor WJ. Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, p. 251-276, 1987.
- FAMA, E. F. The behavior of stock-market prices. *Journal of business*, p. 34-105, 1965.
- FAMA, E. F. Efficient capital markets: A review of theory and empirical work*. *The journal of Finance*, v. 25, n. 2, p. 383-417, 1970

FAMA, E. F. Efficient capital markets: II. The journal of finance, v. 46, n. 5, p. 1575-1617, 1991.

FENN, Daniel J. et al. The mirage of triangular arbitrage in the spot foreign exchange market. **International Journal of Theoretical and Applied Finance**, v. 12, n. 08, p. 1105-1123, 2009.

GRANGER, C. WJ; NEWBOLD, Paul. Spurious regressions in econometrics. Journal of econometrics, v. 2, n. 2, p. 111-120, 1974.

GRANGER, C. W. Developments in the study of cointegrated economic variables. Oxford Bulletin of economics and statistics, v. 48, n. 3, p. 213-228, 1986.

GROSSMAN, S. J.; STIGLITZ, J. E. On the impossibility of informationally efficient markets. The American economic review, p. 393-408, 1980

JENSEN, M. C. Some anomalous evidence regarding market efficiency. **Journal of financial economics**, v. 6, n. 2, p. 95-101, 1978.

JOHANSEN, S. Statistical analysis of cointegration vectors. Journal of economic dynamics and control, v. 12, n. 2, p. 231-254, 1988.

JOHANSEN, S; MOSCONI, Rocco; NIELSEN, Bent. Cointegration analysis in the presence of structural breaks in the deterministic trend. The Econometrics Journal, v. 3, n. 2, p. 216-249, 2001.

JOYEUX, R. How to deal with structural breaks in practical cointegration analysis. Macquarie University, Department of Economics, 2001.

KAHNEMAN, D.; TVERSKY, A. On the psychology of prediction. **Psychological review**, v. 80, n. 4, p. 237, 1973.

KRISTOUFEK, L.. BitCoin meets Google Trends and Wikipedia: Quantifying the relationship between phenomena of the Internet era. *Scientific reports*, v. 3, 2013.

LO, A. W.; MACKINLAY, A. C.. A non-random walk down Wall Street. Princeton University Press, 2011.

LO, A. W.; MACKINLAY, A. C.. Stumbling Block for the Random Walk. The Complete Finance Companion, Pitman Publishing, 1998.

LUCAS JR, R. E. Asset prices in an exchange economy. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, p. 1429-1445, 1978.

MANDELROT, B The variation of some other speculative prices. *Journal of Business*, p. 393-413, 1967.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. v. 1, n. 2012, p. 28, 2008.

NIELSEN, M. How the Bitcoin protocol actually Works, 2013. Disponível em: "<<http://www.michaelnielsen.org/ddi/how-the-bitcoin-protocol-actually-works/>>".

PERRON, Pierre; VOGELSANG, Timothy J. Testing for a unit root in a time series with a changing mean: corrections and extensions. *Journal of Business & Economic Statistics*, v. 10, n. 4, p. 467-470, 1992.

PERRON, P. The great crash, the oil price shock, and the unit root hypothesis. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, p. 1361-1401, 1989.

SAMUELSON, P. A. Proof that properly anticipated prices fluctuate randomly. *Industrial management review*, v. 6, n. 2, p. 41-49, 1965.

WANG, F. et al. Triangular arbitrage in foreign exchange rate forecasting markets. In: **Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence)**. IEEE Congress on. IEEE, 2008. p. 2365-2371.