

**Oportunidades de arbitragem no mercado de Bitcoin:  
Um estudo de caso**

Orientador: Tiago Berriel  
Aluno: Tamir Einhorn Salem

Matrícula: 1511124

29 de Novembro de 2019



**PUC**  
**RIO**

**Oportunidades de arbitragem no mercado de Bitcoin:  
Um estudo de caso**

Orientador: Tiago Berriel

Tutor: Márcio Garcia

Aluno: Tamir Einhorn Salem

Matrícula: 1511124

29 de Novembro de 2019



Declaro que o presente trabalho é de minha autoria e que não recorri para realizá-lo à nenhuma forma de ajuda externa, exceto quando autorizado pelo professor tutor.

Toda e qualquer opinião aqui expressa é de responsabilidade única exclusiva do autor. Quaisquer erros que aqui tenham permanecido são meus.

## Agradecimentos

Gostaria de ser capaz de agradecer à todos que estiveram comigo em algum momento de minha trajetória da forma que merecem, mas creio carecer da habilidade literária e do espaço. Tentarei, mesmo assim, fazer uma pequena parte disto. Se não for suficiente, ao menos será sincera.

Gostaria, talvez de forma heterodoxa, de pedir também perdão à todos com os quais eu eventualmente tenha faltado. Pelo descuido, pelo desleixo ou por minhas próprias falhas, posso tê-los magoado ou ferido, a despeito da grande generosidade com que sempre fui tratado. Assim, peço aos aqui citados, meu perdão.

Agradeço à minha mãe, Beatriz Elise Einhorn, cujo heroísmo de seguir em frente apesar das adversidades me inspirou desde menino. Não fosse por sua generosidade em apostar em mim, eu não teria chegado até aqui. Espero um dia ser digno de tamanho amor e sacrifício.

Ao meu avô, Naftali Einhorn, cuja presença de patriarca e, por que não dizê-lo, de pai efetivo, foi imensamente enriquecedora. Tento e continuarei tentando ser merecedor de conhecer uma alma tão singular, capaz de passar os horrores da Guerra e, ainda assim, manter-se doce e sorridente. O senhor é meu herói, e seguirá sendo o herói de toda nossa família no que depender de mim. Não fosse teu suporte em nossos tempos mais difíceis, teríamos sucumbido ao desespero e a ruína. Espero poder lhe orgulhar um décimo de como você me orgulha, vô.

À minha avó, Lidia Emilia Einhorn, pela perseverança em tentar incutir em seu neto rebelde o amor pela Economia como ciência e como força motriz do bem estar de uma nação. Sem suas lições, talvez jamais tivesse descoberto o maravilhoso fio condutor de minha vida que tem sido a Economia.

Ao meu pai de criação, Jarbas Duarte dos Santos, cujas lições de vida sobre a curiosidade, a superação e a saudável ambição me permitiram alçar voos cada vez mais altos. Sem nada pedir em troca, você entrou em nossa família de supetão e mudou nossas vidas para melhor. Nada teria sido possível não fosse também teu suporte constante e incondicional. Obrigado.

Aos amigos, de cujas presenças eu dependo enormemente e que completam minha vida, em especial mas não somente: Olavo e Catarina Werlang, João Henrique Nissembaum, Fernanda Mariath, Handel Scholze Marques, Daniel Sá Earp, Raphael Vasconcellos, Clara Moraes, Miguel Corti, Lucas Pavanelli, Laila Degen, Alexandra Vincent e Danilo Epelbomi. O apoio de vocês, tanto na discussão de ideias estapafúrdias quanto na revisão de meus maneirismos linguísticos foi essencial.

Agradeço também ao meu orientador, Tiago Berriel, por sua ajuda em um tema tão pouco explorado e inédito, mantendo sua porta sempre aberta e grande entusiasmo, mesmo com apenas seis meses para realizarmos este trabalho.

## Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Motivação</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Dados</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>9</b>
4.1	Explorando a estratégia de arbitragem . . . . .	12
4.2	Analisando o livro de ordens . . . . .	13
4.3	Uma breve comparação com outro mercado . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>16</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Anexo A: Gráficos do Spread em CCCAGG</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Anexo B: Gráficos do Spread na Kraken</b>	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>Anexo C: Gráficos do número de transações horários na Kraken</b>	<b>22</b>

# Oportunidades de arbitragem no mercado de Bitcoin: Um estudo de caso

Tamir Einhorn Salem  
Orientador: Tiago Berriel

29 de Novembro de 2019

## 1 Introdução

Em 2008, Satoshi Nakamoto publicou um *whitepaper* (12), detalhando um sistema de pagamentos eletrônicos que não necessitava de intermediários para a realização de transações. Este sistema foi chamado de Bitcoin, e criou uma nova classe de ativos financeiros, chamada atualmente de criptoativos.

Em geral, sistemas de pagamento eletrônico exigem que transações feitas entre os usuários sejam validadas de alguma forma, o que implica na presença de uma entidade centralizadora que efetua a validação e verificação das transações para impedir fraudes, como a duplicação ou o cancelamento das operações feitas. A inovação trazida pelo surgimento do Bitcoin consiste no que hoje é conhecido como *Blockchain*. Sem entrarmos em detalhes técnicos desnecessários, é suficiente dizer que o *Blockchain* essencialmente cria um livro de registros públicos que é validado **diretamente** pelos usuários da rede (3), dispensando, portanto, a necessidade de uma terceira entidade, que funciona como centralizadora e verificadora da rede inteira. Assim, quando dois usuários (ou mais) realizam uma transação em Bitcoin, essa transação é propagandeada pela rede e validada pelo software dos usuários. A validação é feita por meio de um algoritmo de criptografia, o que exige maior poder computacional, mas impede que usuários mal-intencionados possam sobrepujar a rede e validar transações fraudulentas. É deste uso da criptografia que os criptoativos ganham seu nome.

A ideia do Bitcoin, em si, era a de funcionar como meio de pagamento, tentando portanto emular uma moeda, com uma emissão controlada e planejada. Logo, o plano original do Bitcoin não era funcionar como um mero software de transações descentralizado, aonde os usuários fariam pagamentos em sua moeda local; este papel poderia ser feito exclusivamente pela *Blockchain*. O Bitcoin tinha como objetivo central tornar-se a primeira moeda digital e descentralizada do mundo. Os fornecedores do poder computacional necessário para o funcionamento da rede seriam recompensados com Bitcoin e os preços seriam todos indexados nesta moeda. Desta forma, o Bitcoin é considerado uma criptomoeada, subclasse dos criptoativos.

Atualmente, quase uma década após o lançamento do Bitcoin, o site CoinMarketCap, agregador de informações do mercado de criptoativos, reporta mais de 2900 criptoativos, transacionados em mais de 20 mil mercados (1). O *marketcap* dos criptoativos, segundo o site, ultrapassa a marca dos US\$ 200 bilhões.

Uma das características mais marcantes deste mercado, especialmente preponderante no mercado de Bitcoin, é que, como a rede é descentralizada, qualquer transação confirmada é uma transação oficial, não existindo portanto uma corretora especial ou oficial como único ambiente de mercado. Os usuários podem vender diretamente entre si, usando sites de intermediação de venda *P2P* (pessoa para pessoa) ou não, ou podem criar ordens de compra e venda em uma das múltiplas corretoras existentes no mercado. Logo, o mesmo exato bem pode ser vendido em virtualmente qualquer moeda desejada, e, não obstante, podemos ter diversos mercados vendendo BTC/USD, isto é, Bitcoin cotado em dólares. Desta forma, diferentes corretoras podem, em tese, ter cotações de preços diferentes **em uma mesma moeda**. Como o mercado de Bitcoin é, ainda por cima, totalmente virtual, descentralizado e opera 24/7, sem paradas como outros mercados de ativos, o fenômeno de formação de preços é extremamente interligado e dinâmico.

Nota-se que as corretoras de criptoativos, por hora, não tem regulações específicas que ditem seu comportamento em termos de *matching* de ordens e afins, de modo que cada uma pode exibir um funcionamento único. Em geral, porém, temos um funcionamento próximo, de certa forma, do livro de ordens comumente usado no mercado de ações, com a diferença de que as corretoras não necessariamente precisam garantir que haja liquidez para seus usuários; inexistente aqui, então, a figura tradicional do *market maker*. Assim, o mercado em uma corretora é dado de modo habitual por um livro de ordens, no qual os usuários registram suas ordens de compra ou de venda, e este livro é geralmente acessível a todos os usuários. O livro de ordens faz um *matching* automático entre ordens de mesmo preço, executando o maior volume possível. Por exemplo, se um usuário colocou uma ordem de 0.1 BTC, a ser vendido por 10 dólares, e outro colocou uma ordem de compra de 0.3 BTC, pelo mesmo preço de 10 dólares, a ordem de venda será inteiramente executada, desaparecendo do livro, mas a ordem de compra permanecerá no livro, agora com o volume de 0.2 BTC. A estrutura tarifária das corretoras, bem como a possibilidade de colocação de ordens alavancadas e ordens limite serão vistas mais a fundo nos próximos capítulos.

## 2 Motivação

Dada a multiplicidade de mercados e preços para o Bitcoin, junto com o fato de que os livros de ordens são inteiramente públicos e os dados são de fácil acesso, temos então um grande campo, pouco explorado pela literatura, para o estudo de microestruturas de mercado e a presença de oportunidades de arbitragem.

O primeiro questionamento que pode ser levantado tem relação com a possibilidade de descasamento intertemporal de preços. Sabemos que, em geral, o valor fundamental de um ativo não é consensual dentro de um mercado, e não é difícil mostrar que transações só ocorrem por que os compradores e vendedores tem expectativas fundamentalmente diferentes sobre o valor esperado deste ativo. Desta forma, assumamos que tenhamos dois mercados, A e B, transacionando BTC/USD aos preços, respectivamente,  $p_A, p_B$ , onde  $p_A \neq p_B$ . Sem perda de generalidade, assumamos que  $p_A > p_B$ . Constata-se que este descasamento de preços permitiria que, sem custos de transação, um usuário comprasse em B, ao preço  $p_B$ , e vendesse em A, ao preço  $p_A$ , obtendo um lucro positivo. Espera-se, portanto, que tais oportunidades não existam em equilíbrio, e eventuais oportunidades de arbitragem desapareçam. A pergunta relevante, porém, é: para qual preço os dois mercados irão convergir?

Nota-se que, mesmo ao assumirmos que os mercados eventualmente devem convergir para o mesmo preço, em equilíbrio, não estamos falando da dimensão temporal, na qual, como se sabe, os preços são tudo, menos estáticos. Mesmo que, para fins de simplificação, supuséssemos que os preços permaneceriam constantes durante o tempo, não fosse o processo de ajuste, não estamos determinando em qual janela de tempo a convergência aconteceria.

Além do mais, mesmo que tivéssemos  $p_A = p_B$ , o que ocorreria na presença de um choque informacional que afetasse o valor intrínseco do Bitcoin? Quão rapidamente os mercados reagiriam, e sob qual o preço iria mais rapidamente atingir o novo equilíbrio, refletindo o novo valor fundamental, seja ele qual for?

Este panorama inicial levantado nos permite indagar como funciona o descasamento de preços entre corretoras, fazendo uso da literatura de microestrutura de mercados. Primeiro, é necessário que unifiquemos alguns conceitos. Em qualquer transação dentro de uma corretora, teremos os vendedores, que lançam uma ordem de venda por um certo preço. Chamaremos este preço, como de praxe na literatura, de *asking price*. Os compradores, por sua vez, dão um lance de compra ao criarem uma ordem de compra. O preço de uma ordem de compra é então o *bid price*. A diferença entre *bid* e *ask* é chamada de *bid-ask spread*, e sua presença é vista em basicamente qualquer mercado. Alguns modelos que buscam estimar os componentes do *bid-ask spread* vem da literatura de microestrutura de mercado, como (7), (10) e (6). Tais modelos serão usados mais adiante. Por hora, pensemos que uma corretora terá também um preço de mercado, que é essencialmente o preço corrente no mercado e sob o qual ordens são de fato executadas. Um indivíduo que lançar uma ordem ao preço de mercado terá ela executada de imediato, removendo, portanto, liquidez do livro de ordens. Assim, as corretoras costumam adotar esquemas de tarifas que diferenciam entre tomadores e fornecedores de liquidez. Ordens postas ao preço de mercado irão remover liquidez; ordens a preços diferentes do de mercado (*ask* mais baixo ou *bid* mais alto) irão fornecer liquidez.

Como visto em (2), não é incomum que corretoras tenham preços de mercado diferentes, o que por sua vez gera um *spread inter-mercados*. Uma discussão mais aprofundada sobre a existência de transações não econômicas e mercados falsos, que geram volumes irreais e portanto *spreads inter-mercados* que não refletem a verdadeira natureza do mercado **real** de Bitcoin podem ser encontrados no relatório (11) feito pelo fundo de investimento *Bitwise* para a Security and Exchanges Commission, órgão regulador do mercado financeiro americano. É importante notar, porém, que o que é analisado neste relatório é meramente o *spread* em dólares. A presença de aparatos regulatórios ou barreiras de transação, mesmo em um mercado teoricamente desregulado, podem fazer com que dois mercados de Bitcoin denominados em moedas locais diferentes tenham valores descasados.

O objetivo do presente trabalho é analisar a presença e comportamento destes *spreads* entre mercados denominados em moedas diferentes, tentando explicar tais aparentes anomalias por meio de modelos de microestruturas de mercado e outros ferramentais utilizados para a análise de mercados tradicionais.

### 3 Dados

Fez-se uso da API dos sites *Bitcoin Charts* e *Crypto Compare*. Ambos disponibilizam acesso gratuito aos dados agregados e individuais de diversas corretoras de criptoativos,



especialmente o Bitcoin. A API do *Crypto Compare* forneceu os preços de mercado, com a granularidade desejada, enquanto o *Bitcoin Charts* foi usado para conseguirmos o livro de ordens das corretoras analisadas. Todas as contas e análises foram feitas no Python 3.6.

Os dados horário de câmbio foram obtidos da agência Thomson Reuters, por meio do sistema disponibilizado para acesso de alunos da PUC-Rio no Departamento de Economia. Por conta desta restrição da granularidade dos dados, nossa análise inicial restringiu-se aos dados horários das corretoras, apesar de as API possibilitarem a obtenção de dados em minuto.

Selecionamos as cotações dos seguintes pares de moedas: USD/BRL, USD/CAD, USD/GBP, USD/CNY, USD/JPY e USD/EUR. O período amostral utilizado foi do dia 3/9/2018 até 3/9/2019. Nossa amostra inicial consiste em 2361 observações horárias para USD/BRL, 6548 para USD/CAD, 3646 para USD/CNY, 6478 para USD/JPY, 6516 para USD/EUR e 6542 para USD/GBP. Para cada uma das observações horárias de câmbio, temos a cotação de abertura, de fechamento, a máxima e a mínima.

No API da *Crypto Compare*, pode-se escolher em qual moeda e para qual corretora deseja-se obter o preço de mercado do Bitcoin. Se nenhum parâmetro é passado, o que se obtém é o *CCCAGG* (*Crypto Compare Current Aggregate*), que é um índice do site, calculado com metodologia própria, onde são agregadas apenas as corretoras relevantes, com preço ponderado por volume recente, dentre outros critérios (5). Assim, inicialmente foram obtidos os dados do *CCAGG* para os seguintes pares: BTC/USD, BTC/BRL, BTC/CAD, BTC/GBP, BTC/CNY e BTC/EUR, com as cotações de abertura, fechamento, máxima e mínima, bem como dados do volume horário. Em seguida, foram extraídos os mesmos dados da corretora *Kraken*. Os dados do livro de ordens da *Kraken* foram extraídos, como dito anteriormente, pelo *Bitcoin Charts*.

## 4 Resultados

Com os dados horários de câmbio e do BTC/USD, fizemos o cálculo, para as moedas selecionadas, de qual deveria ser, assumindo a inexistência de fricções, o preço do BTC na moeda local. Inicialmente, estamos calculando o *spread* para o preço agregado, de tal forma que não estamos pensando em múltiplos mercados para um mesmo par.

Tabela 1: Estatísticas descritivas de  $E_i$  para as moedas estudadas

Moeda	Média	Mediana	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose
BRL	3.867078	3.85430	0.129414	0.564409	-0.482850
CAD	1.325458	1.32690	0.016506	-0.179146	-0.287571
CNY	6.860327	6.87645	0.109113	0.376534	0.105558
JPY	110.367685	110.64000	2.211076	-0.329710	-0.797038
EUR	1.132874	1.13210	0.015047	0.552502	0.381836
GBP	1.281520	1.28630	0.030702	-0.779890	-0.039953

Seja  $E_i$  a taxa de câmbio de dólares para a moeda  $i$ , de tal forma que um dólar compra  $E_i$  unidades da moeda  $i$ . A tabela 1 contém as estatísticas descritivas para  $E_i$ . Observe-se que para GBP e EUR, a taxa de câmbio é dada pelo número de dólares necessários para comprar uma unidade da moeda. Seja  $P_{t,USD}$  o preço do Bitcoin em dólares no instante

$t$ , e seja  $P_{i,t}^e$  o preço local esperado do Bitcoin na moeda  $i$  no instante  $t$ . Este será dado pelo preço em dólares, convertido para a moeda local, ou seja:

$$P_{i,t}^e = P_{USD,t} * E_i \quad (1)$$

Sendo o preço na moeda  $i$  em  $t$  dado por  $P_{i,t}^*$ , temos então que o *spread* percentual entre o Bitcoin em dólares e a moeda  $i$ , no instante  $t$ , será dado por  $S_{i,t}$ :

$$S_{i,t} = \frac{P_{i,t}^* - P_{i,t}^e}{P_{i,t}^e} \quad (2)$$

Observe que  $S_{i,t} > 0 \iff P_{i,t}^* - P_{i,t}^e > 0$ , ou seja, se, por quaisquer motivos, o Bitcoin na moeda  $i$  for mais caro do que o preço em dólares convertido. Da mesma forma, se  $S_i < 0$ , o Bitcoin na moeda  $i$  é mais barato, convertendo-se, do que o Bitcoin em dólares. Calculando o [2] para cada uma das moedas, obtemos a seguinte tabela:

Tabela 2: Estatísticas descritivas de  $S_i$  para as moedas estudadas

Moeda	Média	Mediana	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose
BRL	1.096907	1.169895	1.164292	-0.355468	1.139008
CAD	1.657721	0.220551	3.410916	0.819656	0.298486
CNY	2.790929	2.207003	7.554337	15.594802	332.897855
JPY	-0.522512	-0.574724	0.605209	-0.533471	1.700867
EUR	-0.196918	-0.131743	0.359488	-1.448671	4.741720
GBP	-0.091297	-0.043343	0.479992	-0.385604	7.170173

Apesar de os dados do *spread* para CNY chamarem muita atenção, é necessário termos em conta que o mercado chinês é extremamente fechado, como documentado em (2), o que esperamos que impeça fortemente a arbitragem.

Os gráficos referentes aos *spreads* que embasam a Tabela 1 estão no anexo A.

Pode-se pensar que, como estamos calculando o preço por meio de um índice agregado cuja composição precisa não analisamos, o *spread* não reflete precisamente uma possibilidade de arbitragem, já que não sabemos exatamente em qual corretora deveríamos comprar e vender, qual seria o tempo que demoraria a transferência entre as corretoras, dentre outros fatores. Assim, optamos por analisar uma corretora que tivesse não apenas o mercado de BTC/USD, mas também alguns dos mercados desejados.

Levando em conta o mencionado no relatório da Bitwise (11), foi necessário optar por uma corretora cujas transações fossem limpas e não envolvessem lavagem de dinheiro ou transações artificiais. Logo, optou-se pela Kraken, que foi tida pelo Blockchain Transparency Institute como uma das corretoras com maior índice de transações verdadeiras (95%) (8). A Kraken possui mercados para BTC/USD, BTC/CAD, BTC/JPY, BTC/EUR e BTC/GBP, além de oferecer a possibilidade de alavancagem para alguns destes mercados.

A corretora também tem parceria com a empresa Etana, que oferece um serviço bancário integrado. Desta forma, usuários que quiserem colocar qualquer uma das cinco moedas supracitadas podem fazer uma transferência bancária para sua conta no Etana, pagando certas taxas, e do Etana transferirem para sua conta na Kraken de forma quase instantânea (9). A elegibilidade para uso do Etana está apenas vinculada ao país de residência do usuário não se encontrar na lista oficial de sanções do governo americano e o usuário ter uma conta intermediária ou de uso profissional na corretora.

As tarifas de transação na Kraken são cobradas sob a forma de uma porcentagem do volume da transação:

Tabela 3: Tarifas de transação na Kraken

Volume	Fornecedor de Liquidez	Tomador de Liquidez
US\$0 - US\$50,000	0.16%	0.26%
US\$50,001 - US\$100,000	0.14%	0.24%
US\$100,001 - US\$250,000	0.12%	0.22%
US\$250,001 - US\$500,000	0.10%	0.20%
US\$500,001 - US\$1,000,000	0.08%	0.18%
US\$1,000,001 - US\$2,500,000	0.06%	0.16%
US\$2,500,001 - US\$5,000,000	0.04%	0.14%
US\$5,000,001 - US\$10,000,000	0.02%	0.12%
US\$10,000,000+	0.00%	0.10%

Além disto, existem também tarifas para o uso do Etana:

Tabela 4: Depósitos/saques mínimos e tarifas para o Etana

Moeda	Depósito/Saque mínimo	Tarifa para depósito/saque
Dólar americano	US\$150	US\$35 + 0.125%
Euro	€150	€35 + 0.125%
Dólar canadense	C\$150	C\$35 + 0.125%
Libra	£150	£35 + 0.125%
Yen	¥15,000	Equivalente a US\$ 35 + 0.125% (em JPY)

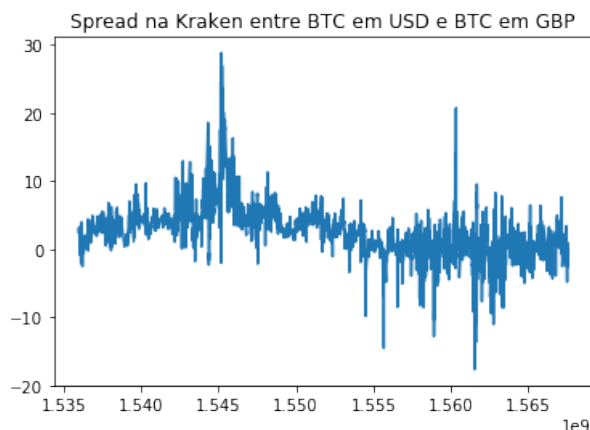
Com os dados da Kraken, pode-se calcular o  $S_i$  para os mercados relevantes, resultando na seguinte tabela:

Tabela 5: Estatísticas descritivas de  $S_i$  para a corretora Kraken

Moeda	Média	Mediana	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose
CAD	-0.132408	-0.011335	1.282045	-0.639078	3.384555
JPY	-0.382098	-0.020250	2.361583	-6.388223	124.077630
EUR	0.085735	0.084032	0.208495	-3.230454	35.137162
GBP	2.636186	2.520378	3.552892	0.752736	5.480619

Vemos então que o spread em libras parece um bom objeto para uma análise aprofundada, haja visto que não apenas tem a maior média e mediana dentre os quatro, mas é o único que, mesmo levando em conta o pior cenário tarifário possível (tarifa de tomador, menor volume, um depósito e um saque por transação), teria capacidade de gerar algum lucro. De fato, no pior caso, pagaríamos uma tarifa de aproximadamente 0.77%. Assim, o único spread médio que parece ter margem o suficiente para uma operação de arbitragem começada em dólares é o spread em libras.

Antes de analisarmos a estratégia em detalhe e tentarmos modelar como funcionaria, vejamos o gráfico deste spread. Os demais estão no anexo B.



No gráfico, vemos que o spread parece ser estacionário. O tempo, no eixo horizontal, está dado em timestamps, um tipo de dado temporal invariante para fusos horários.

Nota-se que, se antes podíamos explicar o spread como algo característico de um mercado isolado e de fluxos de capital estritamente controlados pelo governo, como é o caso chinês, tais explicações não tem lugar aqui. Encontramos um descasamento de preços em uma mesma corretora, em uma moeda sólida, cujo desvio padrão, como vemos, não é muito alto. Deste modo, encontramos uma aparente anomalia, que não parece ser explicável por uma volatilidade na taxa de câmbio (o que ajudaria a explicar o descasamento entre os preços) ou por alguma ineficiência do mercado britânico em si, já que a libra é uma moeda forte, e o sistema interno da corretora permite que usuários transacionem em moedas que não são suas moedas locais.

#### 4.1 Explorando a estratégia de arbitragem

A operação, de forma simplificada, começaria colocando USD na conta da Kraken, via Etana. A seguir, compraríamos BTC/USD ao preço de mercado, para em seguida dar uma ordem de venda em BTC/GBP. O lucro em libras seria então sacado da Kraken via Etana, aonde deveria ser reconvertido em dólares. Seja  $X$  a quantidade inicial de dólares, onde inicialmente assumiremos que  $X$  é menor que 50 mil, como investimento inicial de teste da estratégia e nos dá a noção de qual tarifa será aplicada. Assuma também que o mercado de câmbio é líquido e não há custo para a conversão entre as moedas. Assim, a estratégia é dada por:

**1ª etapa - Depósito de dólares na Kraken:**

**Pagamos a taxa da tabela 4 de 35 dólares + 0.125%.**

$$\text{Saldo} : 0.99875(X - 35)$$

**2ª etapa - Compramos Bitcoin ao preço de  $p_1$  dólares:**

**Pagamos a taxa da tabela 3 de tomador de liquidez (0.26%).**

$$\text{Saldo em BTC: } 0.9974 * \left( \frac{0.99875(X - 35)}{p_1} \right)$$

**3ª etapa - Vendemos o Bitcoin por libra, ao preço de  $p_2$  libras:**

Seja  $E$  o preço de um dólar em libras e levando em conta o spread médio:

$$Ep_2 = p_1 * 1.0264$$

$$\text{Saldo em libras: } 0.9974 * \left( 0.9974 * \left( \frac{0.99875(X - 35)}{p_1} \right) * p_2 \right)$$

**4ª etapa - Sacamos as libras:**

$$0.99875 * \left( 0.9974 * \left( 0.9974 * \left( \frac{0.99875(X - 35)}{p_1} \right) * p_2 - 35 \right) \right)$$

**5ª etapa- Convertemos de volta para dólares, sem custo adicional:**

$$\text{Saldo em dólares: } E * \left[ 0.99875 * \left( 0.9974 * \left( 0.9974 * \left( \frac{0.99875(X - 35)}{p_1} \right) * p_2 - 35 \right) \right) \right]$$

$$= \left[ 0.99875 * \left( 0.9974 * \left( 0.9974 * \left( \frac{0.99875(X - 35)}{p_1} \right) * p_2 E - 35E \right) \right) \right]$$

$$= \left[ 0.99875 * \left( 0.9974 * \left( 0.9974 * \left( \frac{0.99875(X - 35)}{p_1} \right) * p_1 * 1.0264 - 35E \right) \right) \right]$$

$$= \left[ 0.99875 * \left( 0.9974 * \left( 0.9974 * \left( 0.99875(X - 35) \right) * 1.0264 - 35E \right) \right) \right]$$

**Saldo final em dólares:**

$$1.01851857974(X - 35) - 35E$$

**Para calcular o lucro, subtraímos o saldo inicial de  $X$**

$$1.01851857974(X - 35) - 35E - X$$

$$0.01851857974X - 35.6481502909 - 35E$$

**Condição para que o lucro seja positivo:**

$$0.01851857974X - 35.6481502909 - 35E > 0$$

Usando a média da Tabela 1 e achando a condição de lucratividade:

$$X > 4325.29 \tag{3}$$

Desta forma, vemos que a estratégia requer um investimento mínimo de 4325.29 dólares para que se torne lucrativa, sob as condições médias explicitadas anteriormente. Tal quantia é relativamente baixa se pensarmos na maioria dos investimentos. Notemos que a taxa de lucro é de 1.85%, se descontarmos as taxas fixas.

## 4.2 Analisando o livro de ordens

Através da API Krakenex, pode-se obter todo o livro de ordens para o período analisado, o que nos permitiu separar cada transação pelo intervalo horário para o qual tínhamos os dados de câmbio. Pudemos, então, contabilizar quantas transações tivemos por hora nos

mercados de BTC/GBP e BTC/USD, bem como visualizar se as ordens colocadas eram ordens postas ao preço vigente no mercado ou ordens limite. Além disto, cada transação vinha com a classificação de ser uma ordem de venda ou de compra, bem como o preço pedido e seu volume. Com estas informações, pudemos fazer uso da medida de liquidez de Cooper et al (1985) (4), definida por:

$$\frac{\sum_t p_t V_t}{\sum_t \Delta \% p_t} \quad (4)$$

Esta medida nos dá o volume de uma transação hipotética no período analisado necessário para que se tenha uma variação de preço de 1%. Assim, os dados analisados nos forneceram as seguintes estatísticas descritivas:

Tabela 6: Medidas dos livros de ordens

Medida	BTC/GDP	BTC/USD
Índice de Cooper	£449.31	US\$ 162,027.01
Número total de transações	19999	173999
Média de transações por hora	3.012	943.751
Mediana de transações por hora	0	467.5
Volume médio de uma transação	0.0538 BTC	0.3879 BTC
Volume mediano de uma transação	0.0186 BTC	0.0695 BTC

No anexo C, temos os gráficos completos com o número de transações a cada intervalo horário.

A tabela nos permite observar que, sob qualquer medida adotada, o mercado de BTC/GBP parece ter uma liquidez relativamente baixa, com períodos frequentes onde nenhuma transação é realizada. Na realidade, o preço observado no cálculo do spread é o preço de uma ordem colocada no livro mas que não foi preenchida; no limite, o preço apresentado pode ser de uma ordem colocada anteriormente e ainda não realizada, já que nada garante que ordens são criadas em todos os intervalos da amostra.

Como os dados extraídos não incluem o livro de ordens com as ordens canceladas, é impossível afirmar se os intervalos aonde não há nenhuma transação se devem à completa ausência de quaisquer agentes transacionando ou se são fruto de ordens de compra ou venda que não são preenchidas. Portanto, o que sabemos é que os próprios agentes escolhem não transacionar ao preço de cotação, que em geral é mais alto do que 'deveria' ser. Desta forma, mesmo sob a hipótese não muito realista de que as transações não se deram pela ausência de vendas à preços mais próximos do preço justo e que portanto a estratégia de arbitragem sempre encontrará compradores em BTC/GBP, não se poderá esperar que eles paguem o preço de cotação. Por mais que os compradores estejam dispostos à pagar algum prêmio para o único vendedor do mercado, o preço de venda necessariamente será inferior ao preço de cotação, o que reduz ainda mais a expectativa de lucro com a estratégia.

Além do mais, se levarmos em conta o índice de Cooper, vemos que transações relativamente pequenas já fariam com que o spread essencialmente desaparecesse. Na realidade, o índice de Cooper expressa uma liquidez tão exígua para o mercado que é impossível atingir o volume necessário para obtenção das menores tarifas, uma vez que com meros 1000 USD, o spread já seria virtualmente eliminado.

Se lembrarmos da condição em [3], vemos que a quantidade necessária, sob o câmbio médio, para garantir a lucratividade da estratégia é mais do que suficiente para imediatamente eliminar o spread. Desta forma, antes que lucro pudesse ser obtido, o descasamento nos preços seria totalmente eliminado pela arbitragem aqui detalhada.

Na realidade, se refizermos os cálculos do spread entendendo que não seria possível realizar arbitragem nos horários onde não tivemos transações, gerando um spread efetivo de 0 e recalculássemos o spread médio, teríamos aproximadamente 1.15 %. Se refizermos as contas da seção 4.2 a partir da etapa relevante, teremos:

Seja  $E$  o preço de um dólar em libras e levando em conta o spread médio:

$$Ep_2 = p_1 * 1.015$$

$$\text{Saldo em libras: } 0.9974 * (0.9974 * (\frac{0.99875(X - 35)}{p_1}) * p_2)$$

**4ª etapa - Sacamos as libras:**

$$0.99875 * (0.9974 * (0.9974 * (\frac{0.99875(X - 35)}{p_1}) * p_2 - 35))$$

**5ª etapa- Convertemos de volta para dólares, sem custo adicional:**

$$\text{Saldo em dólares: } E * [0.99875 * (0.9974 * (0.9974 * (\frac{0.99875(X - 35)}{p_1}) * p_2 - 35))]$$

$$= [0.99875 * (0.9974 * (0.9974 * (\frac{0.99875(X - 35)}{p_1}) * p_2E - 35E)]$$

$$= [0.99875 * (0.9974 * (0.9974 * (\frac{0.99875(X - 35)}{p_1}) * p_1 * 1.015 - 35E)]$$

$$= [0.99875 * (0.9974 * (0.9974 * (0.99875(X - 35)) * 1.015 - 35E)]$$

**Saldo final em dólares:**

$$1.00721(X - 35) - 35E > 0$$

**Para calcular o lucro, subtraímos o saldo inicial de  $X$**

$$1.00721(X - 35) - 35E - X$$

$$0.00721X - 35.25235 - 35E$$

**Condição para que o lucro seja positivo:**

$$0.00721X - 35.25235 - 35E > 0$$

Novamente usando a média de câmbio da Tabela 1 para achar a condição de lucratividade:

$$X > 11103 \tag{5}$$

Ou seja, sob as condições verdadeiras de mercado, a necessidade de capital ultrapassa ainda mais o índice de Cooper, e, excluindo as taxas fixas, a taxa de lucro é de 0.0721%. Assim, a arbitragem é definitivamente inviável por questões de liquidez no mercado, mesmo se assumirmos, de forma generosa, que inexistem custos na conversão das moedas.

### 4.3 Uma breve comparação com outro mercado

A falta de liquidez do mercado de BTC/GBP, em comparação com o mercado de BTC/USD, pode gerar questionamentos acerca da falta de liquidez relativa em todos os mercados que

não o de dólares. Logo, optamos por realizar a mesma análise da sessão anterior, desta vez com os dados do livro de ordens do mercado de BTC/EUR. É evidente que não se pretende aqui fazer uma análise rigorosa dos porquês da ausência de liquidez, nem fazer uma comparação direta entre o mercado britânico e o mercado europeu. A ideia é apenas fornecer um exemplo de um mercado próximo para deixar claro que o mercado em dólares não é o único com alta liquidez.

Tabela 7: Mais medidas dos livros de ordens

Medida	BTC/EUR
Índice de Cooper	€98,967.20
Número total de transações	8532999
Média de transações por hora	1304.341
Mediana de transações por hora	863
Volume médio de uma transação	0.2419 BTC
Volume mediano de uma transação	0.0347 BTC

Vemos, portanto, que o número total de transações é muito superior ao do mercado americano, bem como a média e a mediana. O volume, em comparação, é menor. Desta forma, a ausência de liquidez parece ser uma condição isolada do mercado britânico, fato este que foi mencionado brevemente durante o atendimento por funcionários da corretora Kraken durante a obtenção dos dados de custos de transação.

## 5 Conclusão

Através de uma análise detalhada sobre os diversos mercados de comercialização do Bitcoin, pudemos observar aparentes discrepâncias nos preços em relação ao Bitcoin precificado em dólar, mesmo dentro de uma grande corretora. Essas discrepâncias violavam o que sabemos sobre a persistência de possibilidades de arbitragem em mercados financeiros, o que sugeria a existência de uma estratégia rentável de arbitragem que teria um lucro positivo.

Uma análise mais profunda do mercado de Bitcoin em libra esterlina nos revelou um spread médio de 2.64%, bem como a quantidade mínima a ser usada para tornar a estratégia de arbitragem lucrativa. Vimos, porém, que este mercado tem baixíssima liquidez, com transações pequenas e infrequentes, de tal forma que existem várias horas do dia em que simplesmente nenhuma ordem é liquidada. Assim, o spread 'efetivo' é na verdade de 1.15%. Além disto, o espaço de ação é tão ínfimo que transações relativamente pequenas já eliminariam totalmente o spread, por conta do baixo Índice de Cooper. Logo, não é possível realizar arbitragem de forma consistente, já que é impossível antecipar a presença de quaisquer compradores ou vendedores no momento necessário para fechar a ponta da estratégia.

As causas da ausência de liquidez no mercado de BTC/GBP não são por hora conhecidas, e decididamente merecem uma análise mais profunda em trabalhos subsequentes. A comparação com o mercado de BTC/EUR sugere que o fenômeno presente neste mercado é isolado, e uma possível hipótese é a de que tenha se formado uma espécie de ciclo vicioso onde usuários britânicos optam por transacionar em mercados mais líquidos e igualmente acessíveis, como o mercado em euros.



O que se pode intuir, porém, é que as discrepâncias de preços observadas entre os diversos mercados podem significar, ao tomarmos como base o estudo de caso aqui feito, que os diferentes mercados tem grandes discrepâncias em termos de liquidez e volume, e estratégias de arbitragem não surgem de forma a eliminar tais discrepâncias por serem inviáveis sem liquidez nos mercados, além de necessitarem de uma boa programação no lançamento das ordens, uma vez que a confirmação de saques e depósitos não costuma ser instantânea. Assim, por mais que os mercados de criptomoedas sejam totalmente digitais, fortemente interconectados e tenham custos de transação, em termos percentuais, comparáveis e até menores do que os demais mercados, a necessidade de fazer-se uso de duas moedas fiduciárias diferentes acrescenta tantas etapas e custos de transação que a margem de lucro torna-se pequena demais.

Evidentemente, mais estudos de caso como este são necessários para que se possa ter uma real noção se as aparentes possibilidades de arbitragem são todas inviáveis de fato, como é de se esperar, e se o fator primário que as inviabiliza é apenas liquidez. Como já foi dito, espera-se que certas restrições institucionais se façam presentes, como limites de capital para certas nações, ou a não existência de mercados robustos de contratos de câmbio, que fariam com que fosse inviável reconverter o lucro obtido em uma determinada moeda de volta para a moeda segura de origem (por exemplo, o dólar).

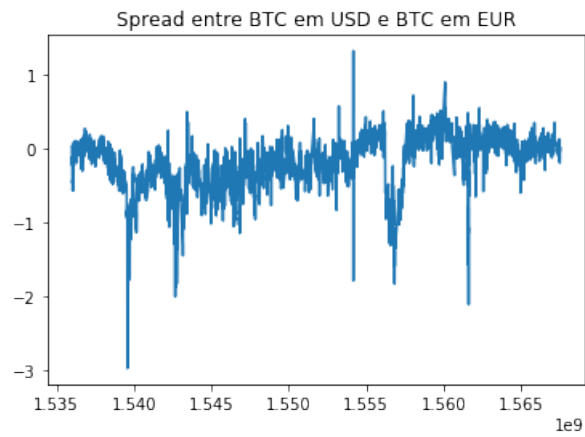
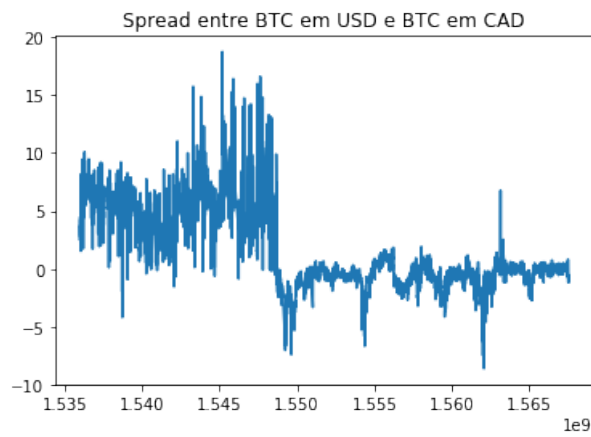
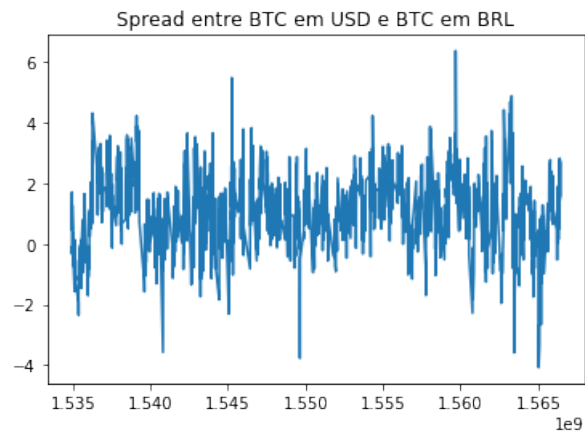
Eventualmente, poder-se-à ter como fato estilizado modelável que criptomoedas terão, sob um mesmo padrão monetário, preços diferentes em locais diferentes a despeito da aparente contradição que isto traz quando se pensa na natureza digital destes ativos, refletindo ausência de liquidez bem como outros fatores, como os supracitados.

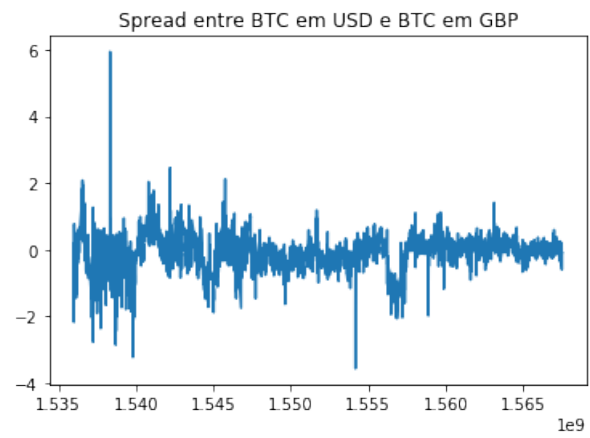
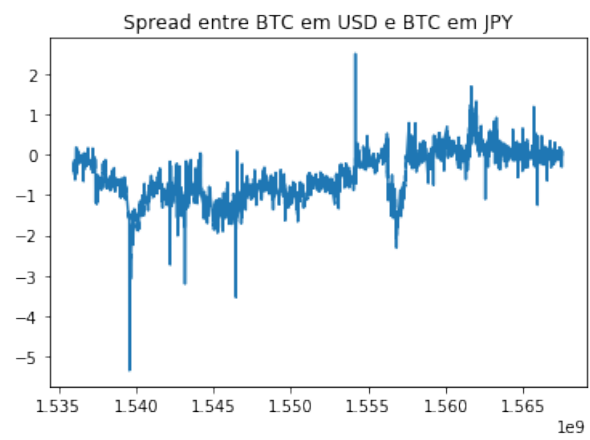
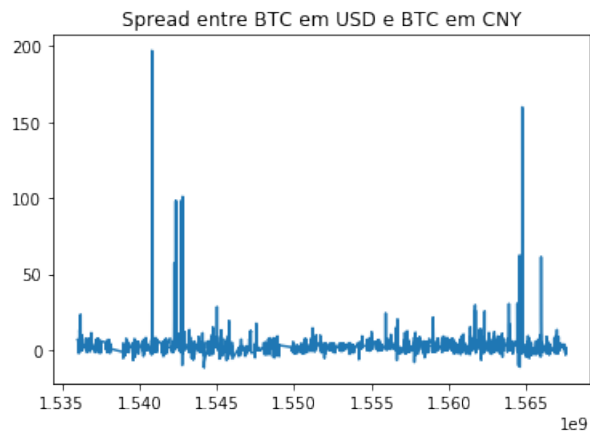
## Bibliografia

- [1] Coinmarketcap: Cryptocurrency market capitalizations. Acessado em 3/10/2019.
- [2] Morten Brandvold, Peter Molnár, Kristian Vagstad, and Ole Christian Andreas Valsstad. Price discovery on bitcoin exchanges. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 36:18–35, 2015.
- [3] Lou Carlozo. What is blockchain? *Journal of Accountancy*, 224(1):29, 2017.
- [4] S Kerry Cooper, John C Groth, and William E Avera. Liquidity, exchange listing, and common stock performance. *Journal of Economics and Business*, 37(1):19–33, 1985.
- [5] CryptoCompare. How does our cryptocurrency index work? Acessado em 1/10/2019.
- [6] Lawrence R Glosten and Lawrence E Harris. Estimating the components of the bid/ask spread. *Journal of financial Economics*, 21(1):123–142, 1988.
- [7] Roger D Huang and Hans R Stoll. The components of the bid-ask spread: A general approach. *The Review of Financial Studies*, 10(4):995–1034, 1997.
- [8] Blockchain Transparency Institute. Bti market surveillance report -september 2019, 2019.
- [9] Kraken. Etana custody funding. Acessado em 29/09/2019.

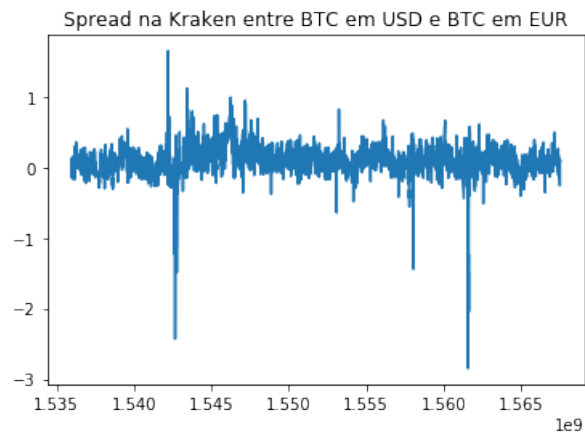
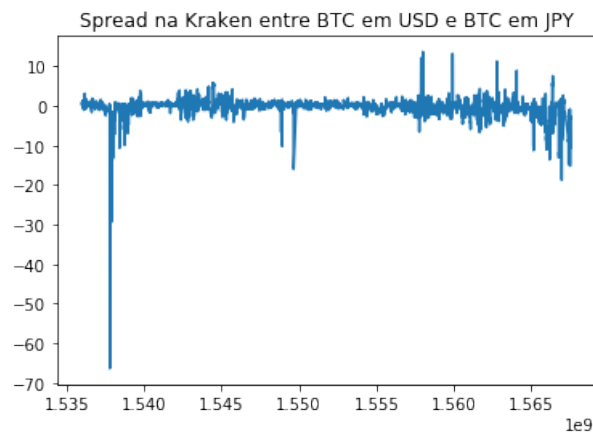
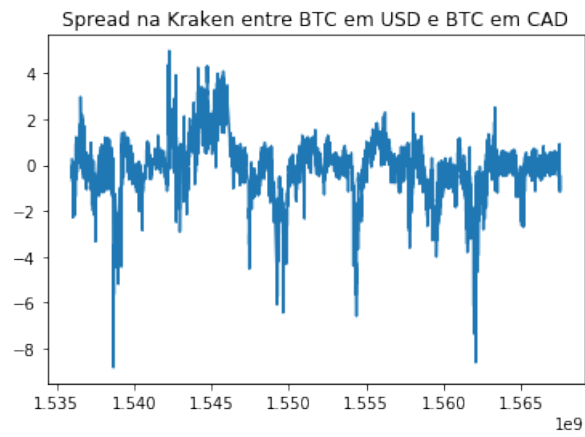
- [10] Ananth Madhavan, Matthew Richardson, and Mark Roomans. Why do security prices change? a transaction-level analysis of nyse stocks. *The Review of Financial Studies*, 10(4):1035–1064, 1997.
- [11] Hong Kim Matthew Hougan and Micah Lerner. Economic and non-economic trading in bitcoin: Exploring the real spot market for the world’s first digital commodity, 2019.
- [12] Satoshi Nakamoto et al. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. 2008.

## 6 Anexo A: Gráficos do Spread em CCCAGG



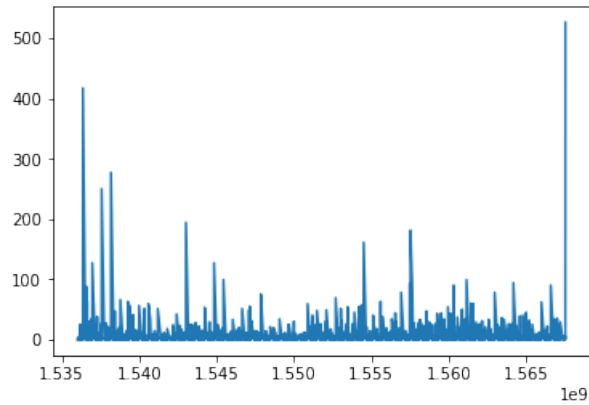


## 7 Anexo B: Gráficos do Spread na Kraken

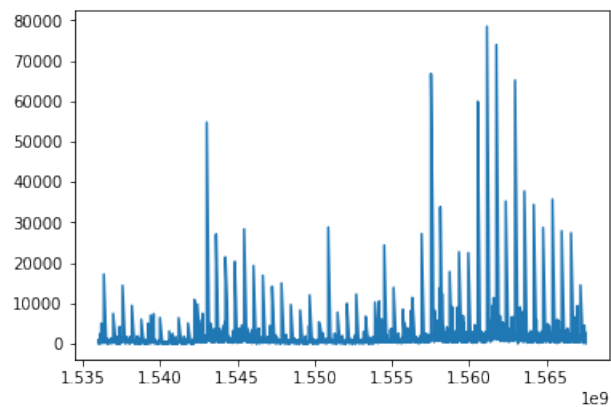


## 8 Anexo C: Gráficos do número de transações horários na Kraken

Número de transações em horário UNIX em BTC/GBP:



Número de transações em horário UNIX em BTC/USD:



Número de transações em horário UNIX em BTC/EUR:

