

Dipartimento
di Impresa e Management

Cattedra di Informatica

Opportunità di arbitraggio triangolare sul mercato delle criptovalute

Prof. Massimo Bernaschi

RELATORE

Guglielmo Cuniato Matr. 227481

CANDIDATO

Indice

Introduzione	2
Capitolo 1: Introduzione alle criptovalute	3
1.1. Cosa sono i bitcoin e cosa li caratterizza?	3
1.2. Gli Exchange	6
1.2.1. DEX o CEX?	7
1.3. Il prezzo dei bitcoin	8
1.3.1. Le stablecoin.....	10
1.3.2. Divergenze di prezzo tra exchange.....	12
Capitolo 2: Arbitraggio applicato alle criptovalute	14
2.1. Arbitraggio finanziario ed efficienza di mercato	14
2.1.1. Evidenze empiriche di arbitraggio tradizionale e ostacoli.....	16
2.2. Arbitraggio triangolare. Definizione e peculiarità.	19
2.2.1. Trading algoritmico e arbitraggio triangolare	22
Capitolo 3: Sistema di analisi algoritmico per arbitraggio triangolare	25
3.1. Presentazione delle risorse necessarie e struttura	25
3.2. Applicazione concreta del sistema di analisi	27
3.2.1. Esecuzione del primo esperimento.....	29
3.2.2. Esecuzione del secondo esperimento	38
3.2.3. Esecuzione del terzo esperimento.....	44
3.3. Analisi complessiva e indici di correlazione	49
Conclusione, limiti e sviluppi futuri	51
Bibliografia e Sitografia	53

Introduzione

La seguente tesi di laurea ha come obiettivo di determinare, sperimentalmente, la possibilità di applicare tecniche di arbitraggio sui mercati delle criptovalute, con particolare attenzione alla variante dell'arbitraggio triangolare. Le tecniche finanziarie in questione fondano le loro radici in tempi ormai lontani, mentre le criptovalute e la tecnologia su cui esse verranno applicate rappresentano un fenomeno piuttosto recente. La combinazione di questi due elementi è un ottimo esempio dell'unione tra finanza e informatica, essendo quest'ultima la disciplina che ci consentirà di analizzare con mezzi innovativi le opportunità di arbitraggio esistenti sui mercati delle criptovalute. Nel primo capitolo è fornito un richiamo delle proprietà peculiari delle criptovalute, con riferimenti alla letteratura esistente per introdurre i risultati già raggiunti relativamente all'andamento dei prezzi e alle divergenze esistenti tra diverse piattaforme di scambio. In particolare, nel corso del secondo e terzo paragrafo sono fornite le nozioni necessarie a una piena comprensione dei contenuti successivi, introducendo il ruolo degli exchange e la particolare categoria di criptovalute dette *stablecoin*. Il secondo capitolo presenta il legame tra il concetto di arbitraggio ed efficienza di mercato, illustrando le diverse tecniche di arbitraggio esistenti. Attraverso l'utilizzo di software disponibili on-line, evidenze empiriche di arbitraggio tradizionale sono inizialmente illustrate; successivamente, un modello di applicazione per l'arbitraggio triangolare è derivato analiticamente, ottenendo le condizioni che rendono quest'ultimo eseguibile in modo profittevole. Il terzo capitolo di questa tesi rappresenta la fase di ricerca attiva della stessa e consiste nella ideazione, progettazione e applicazione di un sistema software per la rilevazione di opportunità di arbitraggio triangolare. Attraverso tale applicazione è stata condotta una serie di tre esperimenti, ciascuno avente ad oggetto due diversi tipi di criptovalute: le prime caratterizzate da elevata volatilità, mentre le seconde date dalle proprietà delle *stablecoin*. Gli esperimenti sono volti all'identificazione di opportunità di arbitraggio triangolari profittevoli e alla determinazione dei fattori coinvolti nella loro formazione. Al riguardo, l'esito dell'analisi è positivo con una grande varietà di occasioni rilevate con successo. Inoltre, misure di volatilità e liquidità sembrano ricoprire un ruolo importante nella formazione di inefficienze nei mercati delle criptovalute, favorendo l'arbitraggio triangolare in occasione di elevata volatilità e scarsa liquidità, almeno secondo i risultati ottenuti.

Capitolo 1: Introduzione alle criptovalute

1.1. Cosa sono i bitcoin e cosa li caratterizza?

Le prime tracce del Bitcoin, sicuramente la più nota delle criptovalute, risalgono al lontano 2009, anno in cui Satoshi Nakamoto ha proposto una nuova soluzione al problema del double-spending delle valute digitali. Il bitcoin, così come quasi tutte le altre valute digitali, esiste grazie a un insieme di regole (protocollo) che determinano il comportamento di un software in esecuzione su una rete peer-to-peer su cui avvengono transazioni. Le criptovalute sono infatti le prime monete decentralizzate, ossia che non intrattengono alcun tipo di legame con un'“istituzione” particolare. Il loro corretto funzionamento deriva esclusivamente da un meccanismo di consenso e dalla tecnologia blockchain. Un algoritmo di consenso è un insieme di regole che consente agli utenti di coordinarsi in un contesto distribuito: esso deve infatti garantire che tutti gli agenti di un sistema possano concordare su una singola verità.¹ La tecnologia blockchain fa parte di una più grande famiglia di soluzioni informatiche definita Distributed Ledger, ossia sistemi che si basano su un registro pubblico distribuito che può essere letto e modificato da più nodi della rete. I due elementi appena citati, nel caso delle criptovalute, sono perfettamente complementari. Le applicazioni della blockchain, infatti, sono quasi sempre distinte dalla necessità di disintermediazione: dunque, validare le modifiche da effettuare su ciascun registro in assenza di un ente centrale richiede il raggiungimento di un consenso comune da parte dei nodi della rete. Il consenso richiesto può essere distinto in tre diverse tipologie: consenso sulle regole, sullo stato e sul valore. La prima categoria esprime concordanza da parte degli utenti relativamente ai criteri che determinano la validità delle transazioni eseguite. Il consenso di stato descrive la possibilità dei partecipanti di accertare chi sia il proprietario di un certo ammontare di bitcoin in ogni momento. Infine, il consenso sul valore rappresenta un problema comune praticamente a tutte le valute, ossia la necessità per i partecipanti di concordare sull'utilizzo di bitcoin come forma di pagamento. Le diverse tipologie di consenso appena menzionate devono poi realizzarsi nel rispetto di alcuni criteri di sicurezza tipici delle criptovalute. Le modalità che consentono uno scambio sicuro ed efficiente delle criptovalute si basano sui principi della crittografia asimmetrica. Gli elementi fondamentali di questa configurazione sono dati da una coppia di chiavi: una chiave pubblica e una chiave privata. Le due chiavi sono legate matematicamente da una funzione, la quale garantisce che un'informazione criptata con una delle due chiavi possa essere decifrata

¹ Binance Exchange. *Cos'è un algoritmo di consenso?* <https://academy.binance.com/it/articles/what-is-a-blockchain-consensus-algorithm>. Consultato il 06/05/2021.

solo dall'altra. Nel caso specifico di bitcoin, la chiave pubblica corrisponde all'indirizzo del proprio portafogli digitale e consente la ricezione della criptovaluta; la chiave privata, invece, è la medesima coinvolta nei sistemi di firma digitale e consente al proprietario dei token digitali di disporre. È particolarmente interessante notare come, nel caso di bitcoin, possano essere create ben 10^{48} diverse chiavi pubbliche e 10^{77} diverse chiavi private, garantendo di fatto sia la protezione dell'identità dei possessori di criptovaluta sia l'esecuzione legittima delle transazioni. Ad ogni modo, ciascun utente deve sempre proteggere la propria chiave privata in un luogo protetto: anche se non è possibile adottare tecniche di forza bruta per l'individuazione della chiave privata, questa può essere direttamente rubata al proprietario da parte di malintenzionati. Una volta compresi quali siano i principi e gli elementi chiave su cui il funzionamento delle criptovalute si basa, ha senso chiedersi come questi sistemi siano implementati nella pratica. Con particolare riferimento ai meccanismi di consenso introdotti prima, è possibile delineare le componenti pratiche comuni ai diversi protocolli esistenti. Per prima cosa, a ciascun utente che vuole partecipare alla rete peer-to-peer è solitamente richiesto di fornire una "stake". Questo termine sta ad indicare una qualche sorta di valore che il validatore, ossia l'utente partecipante, deve mettere a disposizione con l'obiettivo di dissuaderlo dall'agire in modo disonesto. Se l'utente imbroglia, infatti, perderà per sempre la sua posta in gioco. Un esempio concreto di stake potrebbe essere potenza computazionale o la stessa criptovaluta. I validatori rischiano le proprie risorse offrendo uno stake in vista di una vera e propria ricompensa in palio: questa è solitamente rappresentata dalla criptovaluta nativa della rete ed è composta da nuova criptovaluta appena generata o dalle commissioni pagate dagli altri utenti per l'esecuzione delle transazioni. Nel caso di bitcoin, il meccanismo appena descritto è implementato con il nome di Proof of Work e si basa sul concetto aggiuntivo di hash. Un hash è una stringa alfanumerica apparentemente casuale, ma che è in realtà l'output di una funzione deterministica secondo cui a un certo input digitale corrisponde un unico valore di output. Nella Proof of Work, sono stabilite all'interno del protocollo le condizioni che classificano un determinato blocco di transazioni come valido. L'unico modo che i partecipanti alla rete hanno per generare un blocco che corrisponda a queste caratteristiche, date le proprietà deterministiche delle funzioni di hashing, è il brute-force degli input. In sostanza, per validare una transazione è necessario risolvere un puzzle numerico. Tale soluzione, contro intuitiva ma piuttosto elegante, si basa sulla combinazione di due idee: rendere artificialmente costoso dal punto di vista computazionale validare le transazioni e premiare i partecipanti che validano le transazioni. L'unione di questi due concetti garantisce il corretto funzionamento della rete bitcoin in condizioni di sicurezza.

Nonostante tutte queste proprietà abbiano determinato un'evoluzione del concetto di moneta, che è passato da una forma fisica a quella digitale, ad oggi le banche centrali negano che il bitcoin possa avere legalmente funzione di moneta a causa della bassa accettazione che questo ha presso il pubblico e della sua elevata

volatilità.² Ciascuna moneta avente corso legale, infatti, dovrebbe adempiere alle tre funzioni di mezzo di scambio, unità di conto e riserva di valore. Per quanto riguarda la possibilità di individuare le criptovalute come mezzo di scambio, queste sono estremamente avvantaggiate grazie ai bassi costi e tempi di operazione. Tuttavia, caratteristiche tecniche come l'anonimato a causa della mancata associazione tra indirizzo del portafogli e identità reale del proprietario fanno da contraltare a questi indubbi pregi, determinando a livello normativo un clima di sospetto riguardo le criptovalute in genere. Per unità di conto, invece, si intende la capacità di utilizzare la valuta come metro comune per misurare il valore delle transazioni economiche. Solitamente, l'ammontare di criptovaluta è frazionabile e nel caso del bitcoin è possibile disporre fino a una quantità minima definita satoshi, la quale corrisponde a 0,00000001 bitcoin.³ La terza e ultima funzione, la riserva di valore, consiste nell'accumulo e nella conservazione nel tempo del valore della moneta. Tale caratteristica è presente nelle criptovalute, ma con una sostanziale differenza rispetto alle valute a corso legale: l'assenza di un organismo centrale non consente alcuna operazione volta a salvaguardare questa funzione. Inoltre, la loro natura estremamente volatile mina la praticità di utilizzo delle stesse come mezzo di pagamento. Le criptovalute sono caratterizzate da un'elevata volatilità a causa dell'offerta di moneta fissa, che non può espandersi o contrarsi per rispondere a variazioni della domanda e stabilizzare i prezzi. La ridotta liquidità del mercato, inoltre, contribuisce ad alimentare tale fenomeno, dato che allo stato attuale gli attori principali degli scambi in criptovaluta sono proprietari di enormi quantità di token.

²European Central Bank. *Virtual currency schemes – a further analysis*. <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/virtualcurrencyschemesen.pdf>. Consultato il 06/05/2021.

³ Francesco Ciclosi, Paolo Gaspari. *Bitcoin. Genesi e funzionamento di una criptovaluta*, Capitolo 1. Simple Editore, 2017.

1.2. Gli Exchange

Il luogo di incontro tra domanda e offerta di criptovalute prende il nome di (crypto) exchange, piattaforme che consentono di depositare una tipologia di criptovaluta per convertirla in valuta avente corso legale o in altre criptovalute. Tale sistema di distribuzione garantisce agli utenti l'opportunità di gestire ogni genere di contrattazione con questa tipologia di strumento finanziario. In questo senso, è necessario distinguere tra due grandi categorie di exchange. Vi sono piattaforme che accettano depositi in valuta emessa dalle banche centrali, che può essere convertita in criptovaluta, mentre altri supportano esclusivamente valute digitali, che non possono essere acquistate con le tradizionali monete a corso legale. Affinché sia possibile eseguire transazioni in criptovaluta su un exchange, all'utente è solitamente richiesto di superare un processo di registrazione e una serie di verifiche volte a verificarne l'identità. Completata tale operazione, un nuovo portafogli digitale è creato e l'utente può trasferire i propri fondi per acquistare altri token. I depositi e le richieste di prelievo sono solitamente soggetti al pagamento di una commissione relativa al metodo di pagamento scelto. Nel caso dei depositi, tale importo è spesso proporzionale al rischio di chargeback della transazione effettuata a favore dell'exchange: ad esempio, un bonifico bancario rappresenta un metodo di pagamento meno rischioso rispetto all'utilizzo di Paypal o servizi in cui i fondi possono essere bloccati e restituiti all'emittente. In aggiunta alle tariffe di deposito/prelievo, gli utenti potrebbero essere soggetti a commissioni di conversione di valuta. I trader hanno la possibilità di eseguire su ciascun exchange ordini a limite o ordini di mercato. Quando un ordine di mercato viene eseguito, l'utente autorizza la piattaforma ad eseguire lo scambio al miglior prezzo disponibile nel libro degli ordini. Nel caso di un ordine a limite, invece, la piattaforma esegue l'ordine ad un prezzo compreso tra la migliore offerta di acquisto e la migliore offerta di vendita, nel momento in cui una controparte è disponibile per concludere l'operazione. Ciascuna operazione è soggetta al pagamento di una commissione variabile, il cui ammontare dipende dal volume di criptovaluta scambiato. In particolare, tale costo di transazione è spesso differenziato a seconda dell'utente, che può eseguire il trade in posizione "maker" o "taker". Il primo termine si riferisce alla controparte che decide il prezzo ed esegue un ordine a limite, mentre il secondo caratterizza gli acquirenti o venditori che eseguono un ordine di mercato che è immediatamente completato.

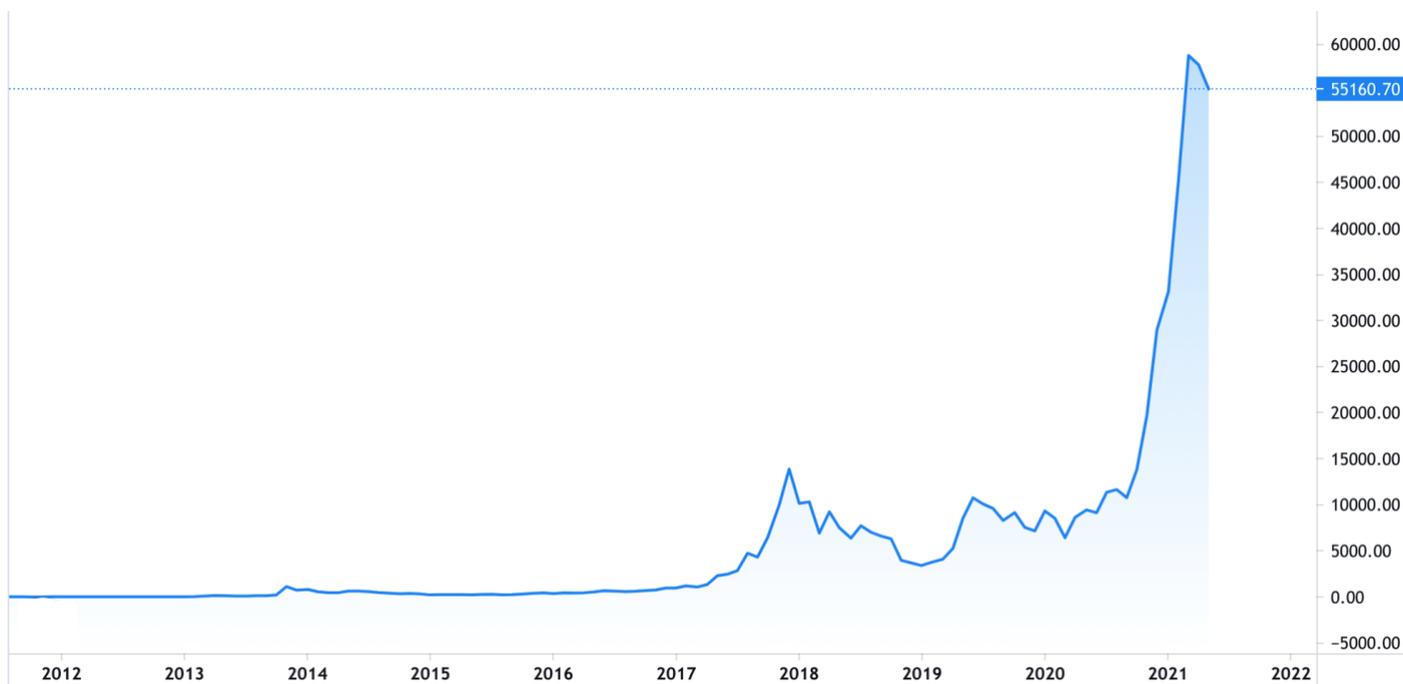
1.2.1. DEX o CEX?

Gli exchange centralizzati, anche noti come CEX, si caratterizzano per avere un proprio libro degli ordini, in cui ciascuna transazione è verificata e registrata. Affinché correttezza e integrità siano assicurati, i dati sono scambiati internamente attraverso l'utilizzo di server dedicati e attraversano processi di sicurezza centralizzati. Gli exchange CEX operano sotto la vigilanza regolamentare e, allo stesso tempo, reprimono attivamente i truffatori seguendo le leggi nazionali per il riciclaggio di denaro. I principianti tendono ad utilizzare in via prioritaria questa tipologia di exchange, poiché l'organizzazione fortemente centralizzata rende più semplice avere una piattaforma "user-friendly" e facile da usare per l'acquisto o la gestione delle proprie valute digitali. Dietro un CEX vi è solitamente un'azienda con scopo di lucro. Queste aziende offrono una vasta gamma di servizi di supporto per trading per poter garantire una buona esperienza utente. Gli exchange decentralizzati offrono le medesime funzioni principali di un CEX, quali il registro degli ordini, una sede di negoziazione, un sistema di corrispondenza e funzioni di sicurezza. La differenza rispetto alla prima categoria di piattaforme è che tutte queste funzioni sono ora decentralizzate; a tal scopo, un DEX pone le sue fondamenta su una blockchain e non è basato su server interni o una propria infrastruttura. È opportuno classificare i DEX a loro volta in due sottocategorie, relativamente alla tipologia di blockchain su cui essi si basano: currency-oriented e currency-neutral. Il primo caso rappresenta piattaforme di scambio la cui blockchain è interamente basata su uno specifico protocollo, consentendo solo depositi in criptovalute che adottano tale tecnologia. La maggior parte di questi sono basati sul token Ethereum e la tecnologia sottostante ERC-20. Gli exchange currency-neutral, invece, sono strutturati per connettere tra di loro criptovalute differenti, sollevando gli utenti dall'obbligo di essere legati all'utilizzo di un protocollo specifico. Le caratteristiche rilevanti di questa classe di exchange sono date dall'elevato livello di anonimità e dalla sicurezza. I DEX sono ritenuti anonimi in quanto quasi nessun dato sensibile riguardo l'utente è richiesto in fase di registrazione. D'altra parte, la sicurezza è garantita dal fatto che ciascun utente è in possesso della propria chiave privata per eseguire le transazioni: quest'ultima non è infatti affidata all'exchange come nel caso dei CEX, riducendo il rischio nel caso di attacco informatico. Inoltre, nessuna autorità terza o regolatore finanziario si occupa di monitorare o imporre vincoli all'attività di trading, essendo tali piattaforme delle applicazioni decentralizzate. Nonostante gli innumerevoli vantaggi, è opportuno specificare che l'esecuzione degli ordini è significativamente più lenta sui DEX rispetto alle piattaforme centralizzate, poiché ciascuna transazione deve essere validata dai miner per poter essere completata.

1.3. Il prezzo dei bitcoin

Per la maggior parte, gli investitori in criptovalute e più specificatamente in Bitcoin hanno avuto un percorso accidentato negli ultimi dieci anni. A parte le variazioni di prezzo giornaliere, essi hanno dovuto affrontare numerosi problemi che affliggono l'ecosistema Bitcoin, da molteplici truffe all'assenza di regolamentazione che alimenta ulteriormente la sua volatilità. Inoltre, ci sono stati periodi in cui le variazioni di prezzo della criptovaluta hanno superato anche le oscillazioni più estreme, provocando enormi bolle speculative.

1. Rapporto di cambio BTC/USD. Exchange Bitstamp.



Al momento (11/05/2020), le quotazioni segnano un valore di 55.161 dollari USA. Uno dei primi salti di prezzo degni di nota avvenne a novembre dell'anno 2013, in cui da un prezzo di circa 200 dollari si arrivò ad un valore di quasi 1000 dollari per bitcoin. All'inizio di quell'anno, il valore era all'incirca 12 dollari per unità mostrando fin da subito l'elevata volatilità delle criptovalute. All'epoca, un salto di prezzo del genere ha condotto il pubblico degli investitori a chiedersi se si trattasse di una bolla speculativa o meno. All'inizio dell'anno seguente, il più grande exchange di bitcoin, Mt. Gox dichiarò bancarotta, rivelando una perdita di quasi 750.000 bitcoin dei clienti e 100.000 del proprio portafogli, probabilmente rubati, per un valore totale di 473 milioni di dollari. Occupandosi della gestione di oltre il 70% di tutte le transazioni in bitcoin, Mt.Gox ha contribuito con il suo fallimento a un ripido calo di prezzo sino a un minimo di 315 dollari all'inizio del

2015.⁴ La seconda bolla di prezzo rilevante accadde nel 2017. La criptovaluta oscillava infatti intorno ai 1000 dollari all'inizio dell'anno, e dopo un periodo di breve declino nei due mesi successivi il prezzo ha segnato un notevole incremento giungendo a toccare i 20.000 dollari il 17 dicembre dello stesso anno. L'improvvisa crescita di questo asset è stata determinante per posizionare lo stesso sotto i riflettori dei principali economisti e governi, alcuni dei quali hanno iniziato a sviluppare le proprie valute digitali per competere con bitcoin. Negli anni successivi, il prezzo di bitcoin è variato seguendo un lungo movimento laterale, anche se nel mezzo vi sono stati alcuni avvenimenti degni di nota. A giugno del 2019, ad esempio, vi è stata una resurrezione del prezzo della criptovaluta riaccendendo le speranze di un nuovo rally. Purtroppo, così non è stato, in quanto una volta superata la soglia dei 10.000 dollari è avvenuto un nuovo calo di prezzo sino a quota 7.000 dollari. È stato poi all'inizio del 2020, quando l'economia è stata soppressa dalla pandemia, che l'attività del bitcoin è tornata a far parlare di sé. La criptovaluta ha infatti iniziato l'anno con una quotazione pari a 7.200 dollari, e le numerose chiusure e successive politiche di governo hanno alimentato le paure degli investitori contribuendo a una forte crescita di prezzo. Quest'ultimo raggiunge il valore di 20.000 dollari per la fine dell'anno, suscitando interesse non più solo tra investitori retail, ma anche tra le istituzioni. Il continuo interesse istituzionale ha spinto il prezzo ulteriormente al rialzo e ci è voluto poco meno di un mese prima che le quotazioni toccassero i 40.000 dollari a gennaio 2021. Le ampie oscillazioni di prezzo appena descritte lasciano spazio a numerosi interrogativi, uno dei quali è sicuramente quali siano i fattori che hanno inciso in maniera determinante. Durante i primi giorni di vita di bitcoin, la liquidità era piuttosto scarsa e vi erano davvero pochi investitori nel mercato delle criptovalute. Questo stato delle cose si è tramutato in variazioni di prezzo fortemente dipendenti dallo sviluppo del settore, ad esempio relative alla nascita o alla chiusura di nuovi exchange di criptovalute, i quali gestiscono una quota considerevole di bitcoin. Un altro importante fattore che ha influenzato il prezzo di Bitcoin all'inizio è stato il rapporto con i principali rivenditori on-line. A gennaio 2014, infatti, il prezzo ha ampiamente superato la quota di 1.000 dollari dopo che il rivenditore on-line Overstock ha annunciato che avrebbe iniziato ad accettare bitcoin per gli acquisti. Al giorno d'oggi, la combinazione di fattori che influenzano il prezzo di questa criptovaluta è cambiata. A partire dal 2017, quando il bitcoin ha attirato l'attenzione dei media, gli sviluppi normativi hanno avuto un impatto incisivo sul prezzo. Se un governo impone restrizioni sull'uso di bitcoin, i prezzi fluttuano drasticamente. A causa dell'influenza diretta che i media hanno sul pubblico, il valore di bitcoin è oggi in gran parte dipendente da esso: i prezzi possono aumentare a causa di notizie positive o raggiungere nuovi minimi a seguito di frodi ed eventi indesiderabili. D'altro canto, il sempre maggiore interesse degli investitori istituzionali è stato interpretato nel tempo come un fattore desiderabile, in quanto tale sviluppo ha apportato maggiore liquidità al sistema, riducendone appena la volatilità. Nonostante l'uso ormai diffuso di bitcoin, questo è talvolta ancora percepito come una bolla in quanto è

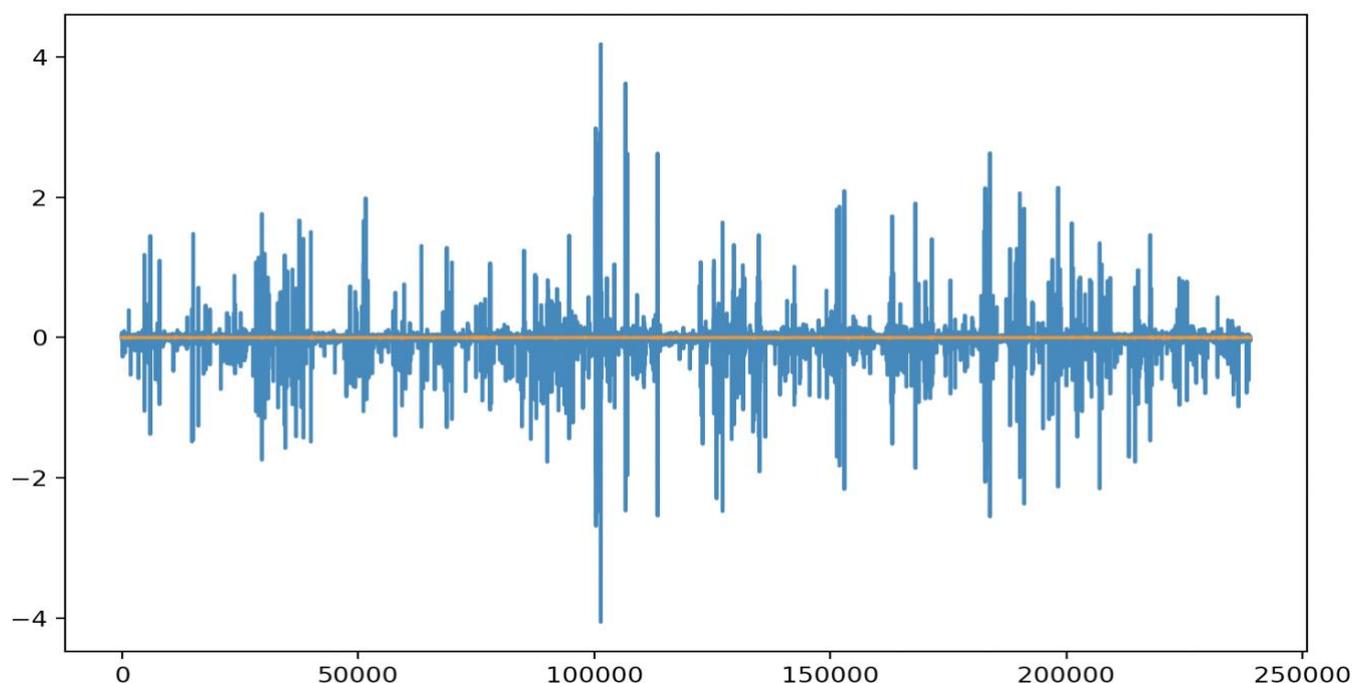
⁴ Egor Zmaznev. *Bitcoin and Ethereum evolution*. Bachelor thesis, Centria University of Applied Sciences, 2017.

privo di un proprio valore intrinseco, essendo solo scambiabile con altre valute. Tale constatazione ha determinato l'esigenza di realizzare una classe di valute digitali dotate delle medesime proprietà positive del bitcoin, ma offrendo una soluzione al problema della volatilità.

1.3.1. Le stablecoin

Le stablecoin sono una tipologia di criptovalute il cui valore è legato ad un asset esterno, ad esempio il dollaro statunitense o l'oro, al fine di stabilizzarne il prezzo. Bitcoin ed Ethereum offrono certamente un gran numero di benefici, ma uno svantaggio chiave è che i loro prezzi sono imprevedibili e hanno la tendenza a fluttuare, a volte anche selvaggiamente. Tale imprevedibilità è in contrasto con la generale stabilità dei prezzi della moneta fiat: il valore di quest'ultima cambia gradualmente con il passare del tempo, evitando drastici cambiamenti infra-giornalieri che invece caratterizzano le criptovalute. Le stablecoin rappresentano dunque una nuova classe di token virtuali basate sull'idea di offrire il meglio dei due mondi: pagamenti pressoché istantanei, sicurezza e privacy delle criptovalute combinati alla stabile quotazione dei prezzi delle valute fiat.

2. Variazione percentuale rapporto di cambio Easy/Btc (blu) e Pax/Usdt (arancione). Exchange Binance.



Il grafico appena presentato riporta dati collezionati a una frequenza di campionamento di circa 0,35 secondi durante un arco temporale di 24 ore, tra il 22 e il 23 aprile 2021. L'asse delle ordinate fornisce le variazioni percentuali dei rapporti di cambio Easy su Bitcoin e Pax su Usdt. La prima coppia è composta da criptovalute classiche, le cui variazioni di prezzo sono rappresentate attraverso la linea blu. Pax e Usdt, invece, sono entrambe delle stablecoin e sono rappresentate dalla linea arancione. La differenza tra le due categorie di valute digitali, in termini di oscillazione di prezzo, è piuttosto evidente: la prima coppia ha registrato un range di ben 8 punti percentuali, mentre la variazione registrata dalle stablecoin non è praticamente percettibile con tale scala, essendo caratterizzata da valori prossimi allo zero. Sebbene tutte le monete virtuali appartenenti a quest'ultima categoria mirino alla stabilità dei prezzi, i meccanismi attraverso cui tale obiettivo è perseguito sono piuttosto differenti. In generale, distinguiamo tra due tipologie di stablecoin, a seconda che siano ancorate ad asset esterni oppure utilizzino sistemi algoritmici per la correzione dei prezzi. Le stablecoin ancorate ad una valuta fiat sono caratterizzate dal mantenimento di una riserva di valuta a corso legale come garanzia per l'emissione di criptovalute. Tali riserve sono preservate da custodi indipendenti e vengono regolarmente ispezionate per verificarne l'aderenza alla normativa vigente. Tether (Usdt), ad esempio, è una criptovaluta popolare che sfrutta tale sistema e ha un valore equivalente a quello di un singolo dollaro statunitense, oltre ad essere garantita da depositi in dollari. Il problema tipico di questo tipo di soluzione è che si perdono alcuni benefici legati alla decentralizzazione della blockchain: la riserva posta a garanzia deve essere infatti custodita presso una terza parte, che dovrebbe al contempo garantire la corrispondenza tra token e valore della moneta fiat. Ad ogni modo, si tratta di un sistema sufficientemente semplice e stabile, sotto l'ipotesi che tutti gli attori coinvolti facciano la loro parte. Una soluzione differente è fornita dalle stablecoin algoritmiche, anche definite non collateralizzate, attraverso una variazione sistematica dell'offerta di criptovaluta sulla base di regole codificate in uno smart contract. Tale ordine di azioni è piuttosto simile a quello di una banca centrale che stampa banconote al fine di mantenere le valutazioni della moneta fiat, sfruttando i principi della teoria della quantità della moneta. Essenzialmente, un sistema di stablecoin algoritmica ridurrà la fornitura del token se il prezzo scende al di sotto della valuta fiat che sta tracciando. Se il prezzo sorpassa il valore della valuta fiat, invece, vengono emessi nuovi token in circolazione creando una pressione al ribasso sul prezzo della stablecoin. Nonostante entrambe le categorie di stablecoin risolvano il problema di fondo della volatilità delle criptovalute, ci sono comunque alcuni svantaggi da tenere a mente. Alcune critiche sono spesso mosse nei confronti della stabilità stessa incorporata nel nome di queste valute. Esse sono infatti stabili in termini di prezzo solo quanto l'asset a cui sono legate, nel caso delle stablecoin collateralizzate. Tradizionalmente, il prezzo del dollaro è sempre stato molto stabile, ma se lo stato delle cose dovesse mutare tali fluttuazioni sarebbero inevitabilmente riflesse sulle stablecoin. Inoltre, se le riserve poste a garanzia sono immagazzinate presso una banca o una terza parte, un'altra importante vulnerabilità è il rischio della controparte. Dubbi e problematiche di questo tipo hanno recentemente coinvolto la stablecoin Tether, i cui autori non hanno mai fornito risposte chiare a domande di questo tipo. Quest'ultimi devono ancora fornire un audit completo e chiaro delle riserve di

Tether.⁵ Molti emittenti di stablecoin non forniscono abbastanza trasparenza relativamente a dove si trovino e l'ammontare delle loro riserve, danneggiando di fatto gli investitori finali che non sono in grado di determinare la rischiosità dell'investimento.

1.3.2. Divergenze di prezzo tra exchange

Una semplice ricerca al momento della stesura di questa tesi suggerisce che il prezzo di Bitcoin sia pari a 55.161 dollari. Negli ultimi anni vi sono state numerose discussioni sugli enormi profitti legati al trading di questo token, ma molte poche informazioni riguardo a come il suo prezzo venga effettivamente calcolato. Alcune persone potrebbero valutare il prezzo di Bitcoin in modo diverso, magari a causa delle differenze di prezzo presenti tra i loro rapporti di cambio di valuta nazionale e i tassi del dollaro. Ad ogni modo, il valore di Bitcoin varia da paese a paese. Questo perché diversi paesi acquistano e vendono la criptovaluta a prezzi diversi, non esistendo un prezzo internazionale e accettato da tutti. Il fattore trainante dell'economia di questa criptovaluta è l'equilibrio tra domanda e offerta: poiché la domanda varia geograficamente, anche la gamma dei prezzi sarà differente. Tale affermazione rappresenta la ragione principale delle discrepanze di prezzo di bitcoin che talvolta è possibile identificare tra i vari exchange di criptovalute. Questo token non è infatti ancorato a moneta fiat o altri asset dalle quotazioni stabili, né prevede meccanismi di aggiustamento dell'offerta come nel caso di alcune stablecoin. Data la mancanza di un unico prezzo globalmente accettato, i prezzi stessi forniti dalla maggior parte dei price tracker di criptovalute non hanno alcuna garanzia di essere accurati. Anzi, la maggior parte degli stessi sono calcolati come una stima derivante dalla media dei prezzi a cui bitcoin è stato scambiato recentemente su un determinato exchange. Ad esempio, Google si basa solitamente sulle API di Coinbase, dove il prezzo di una determinata criptovaluta potrebbe essere differente rispetto alle altre piattaforme. Oltre alle inaccurately derivanti dalle quotazioni fornite dai price tracker, è necessario tenere a mente che il reale prezzo di acquisto di un token in un exchange potrebbe essere superiore a causa delle commissioni. Sebbene queste siano di solito molto modeste rispetto al prezzo pagato per un dato volume di scambio, introducono ulteriori divergenze tra le quotazioni disponibili, dato che ciascuna piattaforma di scambio ha una propria struttura delle commissioni fortemente legata al proprio business model. Talvolta, marcate differenze di prezzo tra paesi diversi possono ricollegarsi anche a fattori

⁵ Coingeek. *Tether is still lying to you.* <https://coingeek.com/tether-is-still-lying-to-you/>. Consultato il 12/05/2021.

macroeconomici, come l'inflazione o la stabilità finanziaria.⁶ A riguardo, un caso eclatante è fornito dal Venezuela. Dall'anno 2013, la crisi economica ha infatti determinato in questa nazione un lungo periodo di iperinflazione, tanto che il Fondo monetario internazionale ha stimato per il 2018 un tasso di inflazione pari a 1.000.000 punti percentuali. Con una situazione in corso di questo tipo, la popolazione locale ha iniziato a rivolgersi in maniera considerevole a Bitcoin determinando una crescita del prezzo sproporzionata di questo asset rispetto agli altri paesi. Inconsistenze di prezzo tra diversi mercati possono anche essere legate a motivi di regolamentazione finanziaria, come documentato dalla numerosa letteratura a riguardo. Ad esempio, uno studio dell'anno 2017 evidenzia che le piattaforme di scambio che non richiedono l'identificazione dell'utente in fase di registrazione sono maggiormente inclini a presentare quotazioni di prezzo deviate rispetto ai prezzi rappresentativi, sebbene non sia possibile identificare un fattore predittivo relativamente alla tempistica o entità della suddetta variazione.⁷ I numerosi dati empirici che è possibile trovare su internet a dimostrazione delle continue discrepanze di prezzo che coinvolgono le criptovalute ci inducono quindi a pensare che i loro prezzi non obbediscano alla Legge del prezzo unico tra i mercati. Assumendo infatti l'eliminazione di qualsiasi possibilità di arbitraggio, in assenza di barriere commerciali e in condizione di flessibilità dei prezzi, bene identici scambiati in sedi di negoziazione differenti dovrebbero avere lo stesso prezzo, quando espressi in una valuta comune. Essendo bitcoin un bene di fatto identico indifferentemente dal luogo in cui è scambiato, un fallimento del genere deve essere necessariamente legato a caratteristiche del mercato stesso, aprendo la porta a possibilità di arbitraggio e strategie di investimento di questo tipo.

⁶ Spade, Aleksander Bjørnå. *The impact of inflation, credit risk and corruption on local bitcoin prices: A panel data analysis*. Master thesis, University of Oslo, 2018.

⁷ Gina Pieters, Sofia Vivanco. *Financial regulations and price inconsistencies across Bitcoin markets*. Information Economics and Policy, Volume 39, 2017.

Capitolo 2: Arbitraggio applicato alle criptovalute

2.1. Arbitraggio finanziario ed efficienza di mercato

Una tipica attività di arbitraggio è l'acquisto e la vendita simultanea di un medesimo asset in mercati differenti, ottenendo un profitto privo di rischio da discrepanze di prezzo presenti tra le quotazioni. Nel mercato azionario, i trader sfruttano solitamente le opportunità di arbitraggio acquistando azioni in exchange stranieri, il cui prezzo delle azioni non si è ancora adeguato al tasso di cambio. Il prezzo del titolo in valuta estera sarà dunque sottovalutato rispetto alla borsa locale, consentendo al trader di ottenere un profitto da questo differenziale. Tale processo è un concetto strettamente legato all'efficienza di mercato. Secondo l'ipotesi del mercato efficiente, infatti, tutte le informazioni vengono incorporate nel prezzo di un asset, non consentendo agli investitori di acquistare azioni sottovalutate o effettuare vendite a prezzi gonfiati. Pertanto, dovrebbe essere impossibile performare meglio del mercato in modo consistente, in quanto l'unico modo che l'investitore ha per ottenere rendimenti più elevati è accettare investimenti più rischiosi. Tuttavia, questa aspettativa è ben lontana dalla realtà. Ad esempio, investitori come Warren Buffet hanno continuamente battuto il mercato sul lungo periodo in termini di performance, e tale circostanza è per definizione impossibile secondo la teoria del mercato efficiente. I mercati non sono certo perfetti e spesso offrono ai trader svariate opportunità di capitalizzare su discrepanze di prezzo, come numerosi studi empirici hanno dimostrato. Un'inefficienza di mercato è definita tale quando il prezzo di un asset non rispecchia il suo reale valore, situazione che potrebbe accadere per numerose ragioni. Asimmetria informativa, condizioni di scarsa liquidità, elevati costi di transazione o ritardi sono soltanto alcuni tra i molti motivi alla base di questo fenomeno. Nella realtà, la maggior parte dei mercati presenta in qualche misura inefficienze, e in alcuni casi estremi tali inefficienze possono anche trasformarsi in veri e propri fallimenti di mercato. Questa consapevolezza rende difficile accettare l'ipotesi di efficienza del mercato nella sua forma più pura, secondo cui tutte le informazioni, private o pubbliche che siano, sono rispecchiate all'interno del prezzo di ciascun asset. Di conseguenza, varianti di tale teoria sono state adottate per riflettere la differente misura in cui essa è applicabile a ciascun mercato: la variante dell'efficienza semi-forte e quella dell'efficienza debole. Secondo la prima, soltanto le informazioni pubbliche sono considerate nella valutazione del prezzo di un asset, rendendo di fatto inutili sia l'analisi fondamentale che l'analisi tecnica. La variante debole, invece, afferma che tutti i prezzi passati di un titolo si riflettono nel prezzo di oggi, sancendo l'inammissibilità dell'analisi tecnica per prevedere e battere il mercato. La caratteristica unica delle criptovalute se comparate ad attività tradizionali è data dalla mancanza di un exchange centralizzato. I mercati spot per le valute digitali sono decisamente frammentati a causa della loro natura, in gran parte non regolamentata in cui lo stesso asset,

come il Bitcoin, viene scambiato contemporaneamente in più sedi differenti in tutto il mondo. In virtù di questo, i bitcoin e le criptovalute in generale rappresentano un caso unico di studio empirico per valutare la presenza di arbitraggio e per studiare le forze che possono influenzarne l'esistenza o i limiti. Questo caso specifico ha infatti contribuito all'affermazione di un'alternativa alla statica ipotesi di efficienza del mercato, introducendo l'importanza del fattore tempo. Sarebbe infatti una vera e propria illusione accettare una condizione statica di efficienza nel caso di un mercato così giovane, in cui cambiamenti anche strutturali sono ritenuti essere frequenti. Ricerche empiriche mostrano come il livello di efficienza di mercato delle cinque più grandi criptovalute sia dipendente dal tempo. In particolare, prima dell'anno 2017, i mercati di criptovalute erano prevalentemente inefficienti e hanno successivamente invertito questa tendenza negli anni 2017-2019. In media, Litecoin appare essere la criptovaluta quotata in modo più efficiente, mentre Ripple la meno efficiente.⁸

Questi risultati sono confermati anche con riferimento alla recente pandemia Covid-19: esaminando i tre mercati chiave Bitcoin, Ethereum e Monero, è possibile constatare una maggiore efficienza durante e dopo la pandemia, a causa della presenza di una correlazione positiva più debole tra le valute durante questo lasso di tempo.⁹ Ad ogni modo, nonostante la tendenza dei mercati di criptovalute a una maggiore efficienza negli ultimi anni sia stata confermata, nessuno di essi può essere considerato perfettamente efficiente.

⁸ Vu Le Tran, Thomas Leirvik. *Efficiency in the markets of crypto-currencies*. Finance Research Letters, Volume 35, 2020

⁹ Arjun Singh. *Are crypto-currency markets, efficient markets?* Health Economics eJournal, 2020.

2.1.1. Evidenze empiriche di arbitraggio tradizionale e ostacoli

Oggigiorno, numerosi sistemi informatici esistono per rilevare opportunità di arbitraggio e sempre più strategie di investimento si basano su questi strumenti. Molti di questi, inoltre, sono software gratuiti e consentono di monitorare attivamente i prezzi di un determinato asset sui listini di innumerevoli piattaforme di scambio. L'elevata volatilità delle criptovalute, infatti, rappresenta un limite all'efficacia del trading umano in questi particolari mercati. Quest'ultimi, per giunta, consentono a chiunque in tutto il mondo di eseguire scambi a qualsiasi ora del giorno, configurando di fatto dei mercati che si prestano magnificamente a strategie di trading automatico e software di analisi. Un esempio concreto di applicazione di tali strumenti è fornito di seguito, rilevando i differenziali di prezzo presenti il 13 maggio 2021 alle ore 16.00 tra i principali mercati di criptovalute (aventi liquidità almeno pari o superiore all'ammontare di 0,25 bitcoin, un valore di circa 10.500 euro al momento della stesura di questa tesi) attraverso lo strumento on-line CoinArbitrageBot.¹⁰ Le coppie di asset su cui sono definiti i rapporti di cambio includono sia criptovalute che monete avente corso legale. Per ciascun rapporto di cambio riportato nella prima colonna, i prezzi di acquisto/vendita e le relative piattaforme di scambio per l'esecuzione degli arbitraggi sono presentati. I risultati sono rappresentati in ordine di profitto decrescente.

3. Opportunità di arbitraggio tradizionale tra exchange. Risultati rilevati da CoinArbitrageBot.

Rapporto di cambio	Exchange per l'acquisto	Prezzo di acquisto	Exchange per la vendita	Prezzo di vendita	Profitto percentuale
ETC-USD	Hitbtc	66,7792 \$	Binance	92,019\$	27,43 %
DASH-BTC	Probit	0,005601 BTC	Binance	0,007331 BTC	23,60 %
NANO-BTC	Hitbtc	0,000227 BTC	Binance	0,0002659	14,62 %
LIT-USD	Binance	7,0445 \$	Bitrue	7,973\$	11,65%
AVAX-BTC	Binance	0,0006985 BTC	Bittrex	0,0007793 BTC	10,36%
BNB-BTC	Binance	0,012118 BTC	Finexbox	0,0129999 BTC	6,78%
TROY-USD	Aex	0,01672 \$	Binance	0,017451 \$	4,19%

¹⁰ CoinArbitrageBot. *Software on-line in grado di rilevare opportunità di arbitraggio tradizionale tra exchange di criptovalute.* <https://coinarbitragebot.com>. Consultato il 13/05/2021.

La tabella appena riportata ci permette di constatare immediatamente che opportunità di arbitraggio tra mercati di criptovalute differenti esistono e, almeno teoricamente, possono anche essere piuttosto profittevoli. Il guadagno è determinato dal processo di acquisto, trasferimento e successiva vendita della criptovaluta tra due differenti piattaforme di scambio. La criptovaluta che ha registrato profitti potenziali maggiori tra quelle analizzate è Ethereum Classic (ETC) con misure di profitto del 27,43%, per giunta a rischio zero, che rappresentano probabilmente il sogno di qualsiasi investitore. Purtroppo, tale superiorità teorica dei profitti di ETC, in occasione di arbitraggio, definisce il punto di partenza di una serie di argomentazioni volte ad evidenziare i limiti e le carenze dell'applicazione concreta di questa tecnica. L'arbitraggio tradizionale, infatti, definito come l'acquisto e la vendita simultanea di un asset in due mercati differenti, prevede una fase di trasferimento del token appena acquistato da una piattaforma di scambio all'altra. Tale processo è spesso la nota dolente che impossibilita un'esecuzione efficiente dell'arbitraggio, e nel caso specifico di Ethereum Classic numerosi exchange, tra cui Coinbase, hanno deciso di incrementare i tempi di trasferimento fino a due settimane a causa dei recenti attacchi informatici che hanno coinvolto la criptovaluta.¹¹ Il mese di agosto del 2020 è infatti stata sfruttata una tecnica di attacco verso Ethereum Classic conosciuta come “attacco del 51%”, definita dalla condizione in cui un gruppo di miner ottengono il controllo di più del 50% della potenza computazionale della rete. In tale situazione, i pirati informatici sarebbero in grado di prevenire che nuove transazioni siano eseguite, interrompendo i pagamenti tra alcuni o tutti gli utenti. Essi sarebbero anche in grado di invertire le transazioni completate nel periodo in cui la rete è sotto il loro controllo, determinando potenziali problemi di doppia spesa della criptovaluta. Tale contesto fornisce una spiegazione al perché gli arbitraggisti non abbiano ancora corretto l'opportunità di profitto appena rilevata su Ethereum Classic: tempi di trasferimento elevati determinano una maggiore esposizione al rischio di variazione dei prezzi di mercato prima che l'arbitraggio sia sfruttato. Il rischio di attacco informatico non è l'unica ragione alla base di tempi di trasferimento occasionalmente alti, in quanto esiste anche il rischio di congestione della rete blockchain. Questo si verifica quando la rete subisce un picco di traffico, provocando ritardi e l'accumularsi delle transazioni in coda, oltre a un incremento significativo dei costi di transazione. Infatti, quando il numero di transazioni in sospeso supera la dimensione massima di un blocco della rete, gli utenti sostengono costi di congestione. Una blockchain congestionata pone gli utenti dinanzi a due scelte: la prima è competere per la priorità di esecuzione pagando commissioni di transazione più elevate, mentre l'alternativa è semplicemente concedere più tempo per la conferma di ciascuna transazione senza impegnarsi in concorrenza con gli altri utenti. I dati rilevano che nella maggior parte dei casi gli utenti scelgono la prima opzione, determinando un aumento medio dei costi di transazione pari

¹¹ Cryptoslate. *Coinbase delays Ethereum classic transactions after two 51 attacks*. <https://cryptoslate.com/coinbase-delays-ethereum-classic-transactions-after-two-51-attacks/>. Consultato il 16/05/2021.

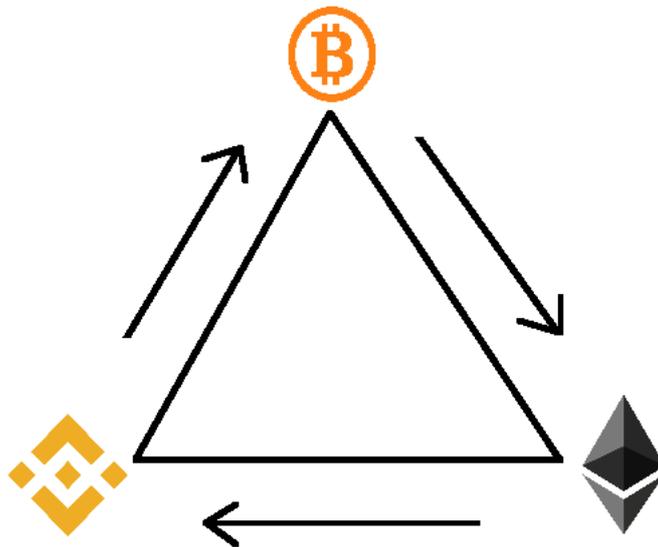
all'11,5%.¹² In questi casi, anche transazioni con commissioni molto elevate potrebbero dover aspettare un po' prima di essere completate. L'esecuzione di arbitraggio può essere talvolta ostacolata direttamente dalla piattaforma di scambio, ad esempio sospendendo la possibilità di invio o ricezione di una specifica criptovaluta verso o da altri exchange. Decisioni del genere possono avvenire per un'ampia varietà di motivi, spaziando da problemi di sicurezza a manutenzione generale, oltre al poter essere appositamente intraprese a causa di differenziali di prezzo troppo elevati rispetto alle altre piattaforme di scambio. La maggior parte degli exchange presentano una pagina apposita per reperire informazioni riguardo lo stato di ciascun portafogli digitale e la verifica della stessa è fondamentale per evitare di iniziare una transazione che non può poi essere conclusa. Non è poi un segreto che ciascuna piattaforma di scambio sia particolarmente legata alle proprie commissioni di ritiro e deposito di criptovaluta, che possono anche rappresentare una quota considerevole del volume della transazione, influenzando negativamente l'esito dell'attività di arbitraggio. Al riguardo, è opportuno specificare che i profitti percentuali riportati nell'ultima colonna sono calcolati assumendo l'assenza di costi di transazione, i quali saranno diversi da piattaforma a piattaforma a seconda della propria struttura. La fase di trasferimento delle criptovalute non è l'unica parte del processo in grado di generare problemi in un ciclo di arbitraggio, in quanto spesso anche la fase di vendita può essere interrotta da carenza di liquidità vanificando l'ottenimento di un profitto. Ad oggi, centinaia di criptovalute sono state rimosse dai listini delle piattaforme di scambio a causa di un volume di scambio eccessivamente basso. Per evitare di incorrere in questo problema, è necessario analizzare attentamente il registro degli ordini dell'exchange su cui andrebbe effettuata l'operazione di vendita, assicurandosi che vi sia attività in termini di scambi. La significatività delle transazioni anche rappresenta un parametro importante da valutare, evitando situazioni in cui il movimento del libro degli ordini sia dato da piccole quantità spostate solo per indurre a pensare che il mercato sia liquido. Un'analisi di questa tipologia è già stata effettuata in automatico dal software utilizzato assumendo una soglia di rilevanza pari a 0,25 bitcoin, oltre la quale i mercati sono considerati abbastanza liquidi per eseguire gli ordini necessari.

¹² Konstantin Sokolov. *Ransomware activity and blockchain congestion*. Journal of Financial Economics, 2021.

2.2. Arbitraggio triangolare. Definizione e peculiarità.

L'arbitraggio triangolare è una tecnica di trading che mira a trarre un profitto privo di rischio da una discrepanza di prezzo tra tre diversi asset scambiati nello stesso mercato. Qualora i tassi di cambio non corrispondessero correttamente, infatti, sarebbe possibile eseguire una serie di tre ordini che culminerebbero nel possedere una maggiore quantità dell'asset inizialmente investito, generando un guadagno in un breve lasso di tempo. Queste opportunità sono considerate rare nei mercati e i trader che ne approfittano di solito dispongono di apparecchiature informatiche o software appositi per automatizzare il processo. Inoltre, le discrepanze di prezzo presenti tra i tassi di cambio sono a volte solo frazioni di un centesimo, creando la necessità di una grande disponibilità di capitale affinché questa forma di arbitraggio sia redditizia.

4. Illustrazione grafica di un processo di arbitraggio triangolare. Bitcoin, Ethereum e Binance Coin.



L'immagine sopra riportata descrive sinteticamente lo svolgimento del processo. Considerando infatti tre criptovalute, come ad esempio Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH) e Binance coin (BNB) è possibile effettuare valutazioni volte a identificare l'esistenza di opportunità di arbitraggio triangolare. Definito un exchange su cui si vuole effettuare tale indagine, è innanzitutto necessario individuare le coppie di trading esistenti che coinvolgono tra loro i tre asset. Nel caso di Binance, è possibile individuare i seguenti rapporti di cambio: ETH/BTC, BNB/ETH e BNB/BTC. Sfruttando le seguenti coppie di trading, è possibile eseguire una serie di due ordini di acquisto volti a trasformare il proprio asset iniziale, ad esempio Bitcoin, nelle altre criptovalute individuate. Di conseguenza, Bitcoin sarà prima scambiato per Ethereum al tasso di cambio definito dal

rapporto ETH/BTC, ottenendo una determinata quantità della seconda criptovaluta. Successivamente, il secondo trade è eseguito scambiando Ethereum per Binance Coin al tasso di cambio BNB/ETH. La chiusura del ciclo è determinata dal terzo e ultimo scambio, che rappresenta in questo caso un'operazione di vendita e consiste nel cedere la quantità appena ottenuta di Binance Coin per Bitcoin, al prezzo definito dalla quotazione BNB/BTC. Le condizioni che determinano la possibilità di ottenere un profitto al termine di questo processo possono essere derivate da una semplice formalizzazione analitica di quanto appena descritto.

Innanzitutto, definiamo i rapporti di cambio presenti nel mercato tra le criptovalute coinvolte come tre costanti:

$$\frac{ETH}{BTC} = k_1, \quad \frac{BNB}{ETH} = k_2, \quad \frac{BNB}{BTC} = k_3$$

Ricordando che ai primi due rapporti di cambio sono associate operazioni di acquisto, mentre al terzo cambio corrisponde un'operazione di vendita, possiamo ricavare le quantità di criptovaluta ottenute al termine di ciascuna transazione:

$$Q_1 (ETH) = \frac{Q_0 (BTC)}{k_1}, \quad Q_2 (BNB) = \frac{Q_1 (ETH)}{k_2}, \quad Q_3 (BTC) = k_3 \times Q_2 (BNB)$$

Precisiamo che la quantità $Q_0 (BTC)$ rappresenta l'ammontare di Bitcoin posseduto inizialmente in portafogli ed è uguale all'investimento iniziale. Avendo calcolato queste grandezze, è ora possibile calcolare il profitto espresso in percentuale della somma investita attraverso una serie di passaggi:

$$Profitto \% = \frac{k_3 \times Q_2 (BNB) - Q_0 (BTC)}{Q_0 (BTC)}$$

Sostituendo prima la definizione di $Q_2 (BNB)$ e poi di $Q_1 (ETH)$ all'interno della formula otteniamo:

$$Profitto \% = \frac{k_3 \times Q_1 (ETH) / k_2 - Q_0 (BTC)}{Q_0 (BTC)} = \frac{k_3}{k_1 \times k_2} \times Q_0 (BTC) - Q_0 (BTC)$$

Raccogliendo a fattor comune la grandezza $Q_0 (BTC)$ sia al numeratore che al denominatore, essa può essere semplificata e si ottiene l'espressione finale:

$$Profitto \% = \frac{k_3}{k_1 \times k_2} - 1$$

La relazione appena ricavata consente di definire le condizioni in cui è possibile effettuare arbitraggio triangolare in modo profittevole, ignorando la presenza di eventuali costi di transazione. La redditività del processo in questa circostanza, infatti, dipende solo ed esclusivamente dai tassi di cambio delle criptovalute.

In particolare, affinché si possa ottenere un profitto positivo, è necessario che il valore appena individuato sia positivo. Ponendo $\frac{k_3}{k_1 \times k_2} - 1$ maggiore di zero, otteniamo che il prodotto tra il primo e il secondo rapporto di cambio deve essere minore del terzo. Tale vincolo rappresenta la condizione di profittabilità dell'arbitraggio triangolare eseguito per mezzo di due ordini di acquisto e uno di vendita: $k_1 \times k_2 < k_3$. È opportuno precisare che cicli di arbitraggio triangolare possono essere conclusi anche attraverso una serie di due ordini di vendita e un'operazione di acquisto, in modo speculare a quanto appena esposto. Nella maggior parte dei casi, tale distinzione opera in funzione delle coppie di trading che una piattaforma di scambio offre, in quanto è la disponibilità di quest'ultime a definire la modalità con cui è possibile procedere. Definendo infatti tre generiche criptovalute, ad esempio C_1, C_2 e C_3 , è necessario individuare le seguenti coppie di trading a seconda che si voglia procedere con due ordini di acquisto e uno di vendita o viceversa: $\frac{C_2}{C_1}, \frac{C_3}{C_2}, \frac{C_3}{C_1}$ nel primo caso, oppure $\frac{C_2}{C_1}, \frac{C_2}{C_3}, \frac{C_3}{C_1}$ in alternativa. In quest'ultimo caso, tale variazione delle coppie considerate determina un piccolo cambiamento all'interno della formula del profitto percentuale. Le quantità individuate con i rapporti di cambio precedenti, infatti, possono essere così ridefinite:

$$Q_1 (ETH) = \frac{Q_0 (BTC)}{k_1}, \quad Q_2 (BNB) = k_2 \times Q_1 (ETH), \quad Q_3 (BTC) = k_3 \times Q_2 (BNB)$$

La formula del profitto percentuale sarà dunque:

$$\begin{aligned} \text{Profitto \%} &= \frac{k_3 \times k_2 \times Q_1 (ETH) - Q_0 (BTC)}{Q_0 (BTC)} = \frac{\frac{k_3 \times k_2}{k_1} \times Q_0 (BTC) - Q_0 (BTC)}{Q_0 (BTC)} \\ &= \frac{k_3 \times k_2}{k_1} - 1 \end{aligned}$$

La condizione di profittabilità, invece, è data da: $k_3 \times k_2 > k_1$. In questo caso, quindi, arbitraggi profittevoli saranno dati dalla situazione in cui il prodotto tra il secondo e il terzo cambio è superiore al primo. Come già specificato precedentemente, le relazioni appena calcolate non tengono conto dei costi di transazione presenti nell'esecuzione di ciascun trade. Il ruolo delle commissioni, in realtà, è molto importante in questi contesti come sarà dimostrato successivamente con alcuni esperimenti empirici. Spesso, valutazioni poco attente del loro peso determinano il fallimento dell'esecuzione degli arbitraggi triangolari. È quindi fondamentale inglobare in tali relazioni teoriche il loro calcolo: ciò sarà effettuato assumendo come modalità di applicazione delle commissioni la medesima struttura tariffaria dell'exchange Binance. Di conseguenza, ciascuna tariffa applicata per transazione sarà considerata come una commissione variabile applicata al volume scambiato e si assume che le aliquote percentuali tra commissioni market-maker e market-taker siano uguali. La quantità corrispondente a ciascuna operazione, a seconda che sia di acquisto o di vendita, può essere definita in questo modo includendo i costi di transazione:

$$Q(\text{acquisto}) = \frac{(1 - fee) \times Q_0}{k}, \quad Q(\text{vendita}) = (1 - fee) \times Q_0 \times k$$

L'unica differenza fondamentale rispetto alle equazioni del caso precedente è data dal fattore $(1 - fee)$ ora considerato nell'ottenimento di ciascuna quantità di criptovaluta. Essendo ciascun ciclo di arbitraggio triangolare composto da una serie di tre scambi, otterremo che il profitto percentuale al netto dei costi di scambio, nel caso di due ordini di acquisto e uno di vendita, sarà pari a:

$$\text{Profitto \% (al netto di commissioni)} = [(1 - fee)^3 \times \frac{k_3}{k_1 \times k_2}] - 1$$

invece, nel caso di due ordini di vendita e uno di acquisto:

$$\text{Profitto \% (al netto di commissioni)} = [(1 - fee)^3 \times \frac{k_3 \times k_2}{k_1}] - 1$$

Anche in questo caso opera la distinzione tra le due modalità di arbitraggio triangolare, dipendendo la formula del profitto percentuale dalla tipologia di ordini eseguiti.

2.2.1. Trading algoritmico e arbitraggio triangolare

Numerose forme di arbitraggio, sia nel mercato delle criptovalute sia nei mercati finanziari tradizionali sono eseguite attraverso computer e software, i quali sono in grado di assumere posizioni di investimento sulla base di modelli matematici in pochissimi millisecondi. Tale strategia prende il nome di trading algoritmico e si caratterizza per tentare di sfruttare la velocità e le risorse computazionali di elaboratori elettronici rispetto ai trader umani. Il maggiore vantaggio di questo sistema è la rapidità di esecuzione degli ordini: il trading ad alta frequenza è interamente gestito da un computer e consente agli investitori di ottenere profitti anche da piccole variazioni di prezzo. Oggigiorno, il volume di scambio generato da questa tipologia di approccio nei mercati globali è piuttosto elevato: basti pensare che già solo nell'anno 2019 uno studio rilevava che oltre il 92% delle transazioni nel mercato del forex era eseguito da sistemi automatici di trading.¹³ Nel caso specifico dell'arbitraggio, il trading algoritmico si presta particolarmente all'esecuzione di questa tecnica di investimento in quanto permette la definizione di un insieme di regole per eseguire le transazioni. Le condizioni di profittabilità rilevate precedentemente, ad esempio, potrebbero rappresentare un set di istruzioni preimpostate di un software sviluppato per eseguire gli scambi desiderati. Scegliendo infatti una

¹³ Robert Kissell. *Algorithmic Trading Methods 2nd Edition*, Chapter 2. Elsevier Science Publishing, 2020.

piattaforma su cui fare trading di criptovalute e impostando i parametri della propria strategia, l'algoritmo definito monitorerà costantemente i prezzi degli asset e le altre variabili rilevanti, eseguendo automaticamente le operazioni se le condizioni definite verranno raggiunte. La capacità di programmazione di tali sistemi, combinata all'elevata velocità di esecuzione che gli stessi mettono a disposizione dei trader, rappresenta quindi lo strumento ideale per rilevare e sfruttare opportunità di arbitraggio triangolare nei mercati. Infatti, è necessario ricordare che anche se i processi di arbitraggio triangolare non prevedono una fase di trasferimento dei token e i problemi di timing ad essa associati, le discrepanze di prezzo che consentono l'esecuzione di questa strategia di investimento sono di solito opportunità che hanno vita molto breve. Durano anche solo poche frazioni di secondo e dei trader umani privi di strumenti informatici semplicemente non sarebbero in grado di accorgersi di tali disallineamenti. In tal senso, una misura particolarmente importante nel caso di sistemi informatici applicati al trading è la latenza di trasmissione: essa è definita come il tempo impiegato da un pacchetto di informazioni a raggiungere un altro computer o server all'interno della rete. Basti pensare che ad oggi ci vogliono appena tredici millisecondi per un pacchetto ad effettuare un viaggio di andata e ritorno via cavo tra la borsa del NASDAQ e quella di Chicago. Un approccio efficiente all'esecuzione di arbitraggio triangolare mediante trading automatico prevede la minimizzazione di questa misura, la quale dipende sia dalla tipologia di connessione Internet che dalle apparecchiature fisiche che il segnale attraversa durante il suo percorso. Maggiore è la latenza, infatti, maggiore sarà il tempo impiegato dalla piattaforma di scambio per ricevere gli ordini da parte del software, e magari le opportunità precedentemente rilevate potrebbero non essere più valide nel momento in cui le transazioni sono eseguite. Il processo di creazione di un bot, ossia di un software in grado di eseguire trading algoritmico, introduce ulteriori concetti necessari alla comprensione di quanto sarà esposto successivamente. Tali software interagiscono con gli exchange per effettuare operazioni di scambio mediante le API, acronimo di Application Programming Interface, le quali sono strumenti di programmazione che le stesse piattaforme di scambio mettono a disposizione degli sviluppatori per facilitare la realizzazione di applicazioni volte a interagire con loro. Le API possono assumere diverse forme, ma in tal caso appaiono come delle librerie di funzioni che possono essere chiamate da un software per eseguire in modo automatico le stesse azioni che un utente qualsiasi eseguirebbe sulla piattaforma di scambio. La comunicazione tra il software e l'exchange inizia attraverso una fase di autenticazione, funzione che consente alla piattaforma di riconoscere l'account dell'utente e il suo portafoglio virtuale con cui eseguire gli ordini di scambio. Successivamente, è possibile eseguire la richiesta di tutte le informazioni di cui si necessita, come ad esempio i rapporti di cambio tra le criptovalute interessate, distinguendo tra miglior offerta di acquisto o vendita, così da eseguire le proprie valutazioni su dati aggiornati. Nel momento in cui una valutazione restituisce esito positivo, ovvero la condizione di profittabilità impostata risulta verificata, il software chiamerà per mezzo delle API le funzioni necessarie ad eseguire gli ordini desiderati, specificando l'asset su cui tali ordini sono eseguiti ed il prezzo nel caso di ordini a limite. Informazioni più dettagliate relative ai singoli passi attraverso cui un software del genere interagisce con le piattaforme di exchange saranno fornite nel prossimo capitolo, contestualmente alla

presentazione di una serie di esperimenti pratici volti a interpretare le opportunità di arbitraggio triangolare presenti sui mercati delle criptovalute.

Capitolo 3: Sistema di analisi algoritmico per arbitraggio triangolare

3.1. Presentazione delle risorse necessarie e struttura

Come anticipato al termine dello precedente capitolo, i benefici dei software applicati alla finanza sono innumerevoli e consentono di portare a termine operazioni caratterizzate da cicli di vita molto brevi. Potenzialmente è possibile utilizzare un gran numero di soluzioni informatiche al fine di stabilire un collegamento con un exchange e disegnare un architettura software valida per i nostri scopi. Un linguaggio di programmazione che particolarmente si è distinto negli ultimi anni è Python: la sua semplicità di scrittura unita alle estese librerie e funzioni che lo stesso mette a disposizione lo rendono un linguaggio ideale per la realizzazione di un software di trading automatico. Il primo passo fondamentale consiste nell'individuare l'insieme di moduli e funzioni che tale linguaggio richiede al fine di raggiungere i nostri scopi specifici: ci riferiamo dunque sia alle API per la comunicazione client-server sia all'insieme di funzioni offline che saranno necessarie alla rilevazione o interpretazione dei dati raccolti. Le API necessarie alla creazione dell'applicazione variano in funzione della piattaforma di exchange che si intende utilizzare. In questo caso specifico, la piattaforma di riferimento è data da Binance, exchange di criptovalute nato nel 2017 e ad oggi il più grande del mondo in termini di volume di scambio di asset digitali.¹⁴ In particolare, il rapporto tra Binance e l'insieme delle API che la stessa mette a disposizione è piuttosto interessante. La società, infatti, non dispone di un codice proprietario sviluppato da essa direttamente. Quando la piattaforma è stata lanciata nell'anno 2017, gli amministratori hanno condotto una vera e propria gara tra sviluppatori così da individuare l'inventore della migliore libreria tra tanti linguaggi di programmazione differenti. I vincitori sono stati premiati ciascuno con il pagamento di un ammontare pari a 1000 Binance coin, una criptovaluta ideata e presentata ai mercati dalla stessa piattaforma. Ci sono state una serie di buone proposte per la categoria Python, ma alla fine la libreria Python-Binance è stata coronata come la vincitrice e rappresenta la stessa soluzione che abbiamo adottato durante la scrittura di questa tesi. L'approccio seguito da Binance è stato molto intelligente per garantire che i migliori sviluppatori lavorassero duramente per produrre una buona libreria, anche se è opportuno specificare che sotto certi punti di vista sarebbe più vantaggioso per l'utente avere una libreria interna, sviluppata e mantenuta dallo staff, così da evitare ritardi o problemi legati ad aggiornamenti. L'implementazione pratica delle API all'interno di un sistema informatico richiede

¹⁴ CoinMarketCap. *Top crypto-currency spot exchanges*. <https://coinmarketcap.com/rankings/exchanges/>. Consultato il 18/05/2021.

innanzitutto la comprensione della successione di operazioni che devono essere eseguite al fine di stabilire un contatto stabile tra il software e il server della piattaforma di scambio. Prima che quest'ultima acconsenta all'invio di qualsiasi tipo di dati relativi ai mercati o ci consenta di eseguire ordini, è necessario avviare una connessione che è stabilita con successo solo al termine di un processo di autenticazione. Tale fase richiede due diversi dati di cui l'utente deve aver proceduto alla creazione, la API key e la secret key: entrambi rappresentano codici alfanumerici univoci e legati al nostro account personale sulla piattaforma. Essi sono delle vere e proprie credenziali che permettono a Binance di riconoscere chi siamo e con quale portafoglio stiamo operando. La prima fase del design che stiamo strutturando richiede quindi di effettuare una connessione verso Binance comunicando tali due parametri per eseguire con successo la fase di autenticazione. Nella pratica, ciò si svolge attraverso la classe Client definita da Python-binance: questa effettua una richiesta di connessione con le chiavi passate come parametri, per poi ritornare un oggetto che ci permette di eseguire le funzioni successive volte ad operare sulla piattaforma di scambio. Nella pratica, queste due istruzioni consentono di eseguire in modo semplice quanto appena esposto:

1. `from binance.client import Client`
2. `oggetto = Client(ApiKey, ApiSecret)`

La prima si occupa di specificare a Python l'insieme di istruzioni aggiuntive che stiamo utilizzando (quelle contenute nell'API di Binance), mentre come enunciato precedentemente la seconda si occupa di definire un'istanza della classe Client che permetta di eseguire la connessione e l'autenticazione. Completato il processo di autenticazione, entrano in gioco le funzioni che tali API mettono a disposizione per richiedere dati relativi ai mercati o eseguire operazioni sulla piattaforma. Le funzioni in questione rappresentano metodi della classe Client e in particolare, per quanto riguarda l'ottenimento dati, è possibile raccogliere i valori delle migliori offerte in acquisto e in vendita (sia prezzo che quantità) mediante un'unica istruzione:

3. `ticker = oggetto.get_ticker(symbol = 'ETHBTC')`

Il metodo `get_ticker()` si occupa dell'ottenimento di tutti i dati rilevanti per una certa coppia di trading che è specificata come argomento (tra parentesi tonde). In questo caso, a scopo esemplificativo, Ethereum scambiato verso Bitcoin è la coppia considerata. Tale metodo ritorna dunque in output una serie di valori assegnati alla variabile di nostra creazione 'ticker': tali valori possono essere estrapolati dalla variabile in questione trattandola la stessa come un dizionario (nel senso in cui è inteso in Python) e specificando i dati che si desidera ottenere. Ad esempio, metriche rilevanti che saranno considerate nelle nostre analisi successive sono raccolte in questo modo:

4. `best_ask = ticker['askPrice']`

5. `best_bid = ticker['bidPrice']`
6. `last_change = ticker['priceChangePercent']`

Le istruzioni numero quattro e cinque si occupano di prelevare dalla variabile ticker i prezzi migliori per eseguire un ordine di mercato di acquisto e di vendita, mentre l'istruzione numero 6 definisce la variazione percentuale del prezzo medio dell'asset calcolata sulla base della quotazione nelle ventiquattro ore precedenti. Quest'ultima costituisce una misura di volatilità dei prezzi dell'asset considerato. Le ultime istruzioni rilevanti di cui è necessario fornire una presentazione riguardano l'esecuzione vera e propria degli ordini e sono coinvolte non tanto nell'analisi dell'arbitraggio quanto nell'esecuzione dello stesso.

7. `order = oggetto.order_market_buy (symbol = 'ETHBTC', quantity = 10)`
8. `order = oggetto.order_market_sell (symbol = 'ETHBTC', quantity = 10)`

Il primo esegue un ordine di mercato di acquisto al miglior prezzo disponibile, considerando la coppia di trading specificata al parametro symbol e la quantità che si desidera scambiare al parametro quantity. Il medesimo ragionamento vale anche per l'altra istruzione, la cui sintassi è praticamente identica e si distingue dalla prima esclusivamente per la denominazione della funzione 'order_market_sell' in quanto esegue una operazione di vendita e non di acquisto. Le primitive di programmazione appena presentate, rappresentano il punto di partenza per un tentativo di applicazione pratica delle idee finora enunciate. È infatti possibile studiare la presenza di opportunità di arbitraggio triangolare nei mercati reali, avvalendosi di un sistema informatico in grado di eseguire le istruzioni sopra riportate. A tale scopo, è stata quindi realizzata un'applicazione Python che attraverso un monitoraggio costante dei prezzi ed il controllo della sussistenza della condizione di arbitraggio, ci ha permesso di verificare le circostanze in cui tali inefficienze si verificano nei mercati delle criptovalute.

3.2. Applicazione concreta del sistema di analisi

Una serie di esperimenti è stata condotta al fine di individuare la reale presenza di opportunità di arbitraggio nel caso specifico dei mercati di criptovalute. Sfruttando un software programmato sulla base della struttura descritta nel paragrafo 3.1, sono state scelte un totale di sei triadi di criptovalute di cui sono state costantemente monitorate, nell'arco di ventiquattro ore, le informazioni relative a prezzi, liquidità e

volatilità. Le coppie di trading scelte sono state differenziate in due gruppi: criptovalute ad alta volatilità e stablecoin. In particolare, l'alta volatilità della prima categoria di criptovalute è stata definita sulla base della variazione percentuale dei prezzi nei giorni precedenti agli esperimenti. Le stablecoin, invece, presentano movimenti marginali di prezzo per definizione, come già esposto nel primo capitolo. Tale distinzione in gruppi è stata volutamente ideata per verificare l'esistenza di un qualche rapporto tra la volatilità di un asset e la presenza di opportunità di arbitraggio triangolare potenzialmente legate a lag o disallineamenti temporali dei prezzi tra i mercati. In linea teorica, infatti, forti shock della domanda o dell'offerta in un qualche mercato potrebbero indurre il prezzo a deviare per pochi istanti dalla condizione di non arbitraggio, determinando di fatto situazioni profittevoli per l'applicazione di questa tecnica di investimento. Le triadi oggetto di analisi, suddivise per categoria, sono rappresentate nella tabella sottostante.

5. Coppie di trading di criptovalute oggetto di analisi. Exchange Binance.

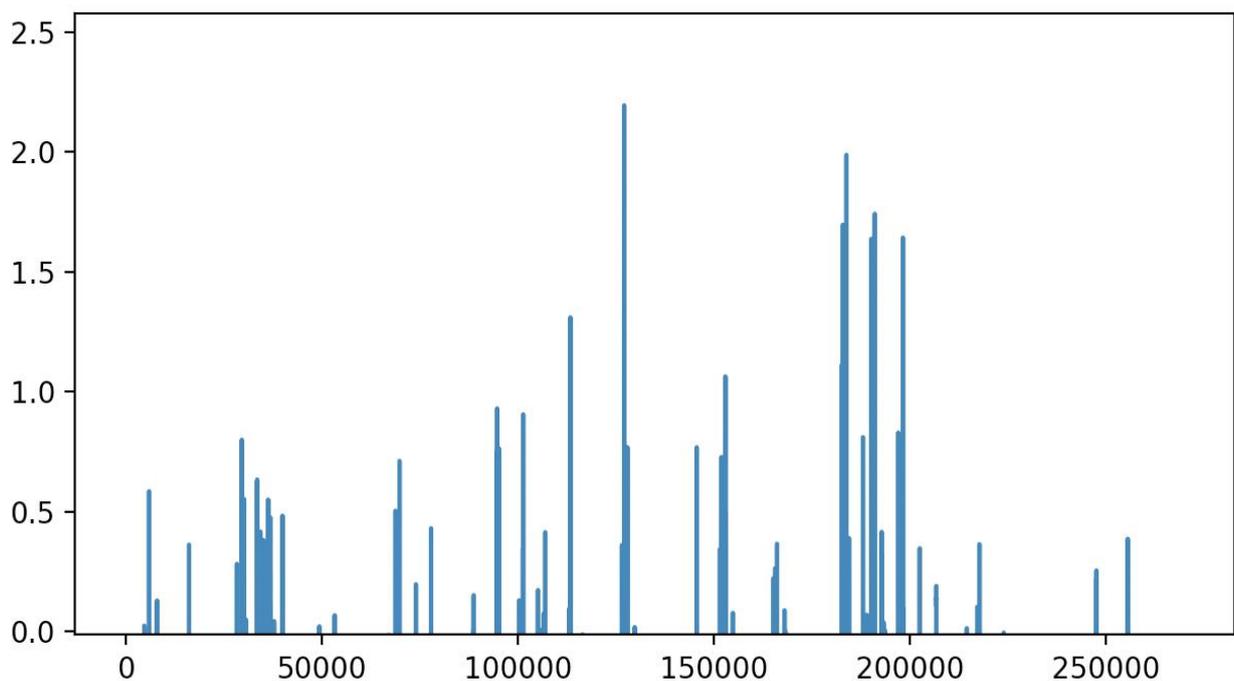
Triadi di criptovalute ad alta volatilità				Triadi di stablecoin		
EASY/BTC	EASY/ETH	ETH/BTC	1°	BUSD/DAI	BUSD/USDT	USDT/DAI
XVS/BTC	XVS/BNB	BNB/BTC	2°	PAX/USDT	PAX/BUSD	BUSD/USDT
NANO/BTC	NANO/ETH	ETH/BTC	3°	USDC/USDT	USDC/BUSD	BUSD/USDT

L'analisi è stata condotta in parallelo considerando coppie di triadi di categorie opposte: una costituita da criptovalute ad alta volatilità e un'altra esclusivamente da stablecoin, così da rilevare differenze tra le due tipologie di token. In dettaglio, le triadi indagate in parallelo sono quelle presenti sulla stessa riga della tabella. Sono stati eseguiti complessivamente tre esperimenti, ciascuno della durata di ventiquattro ore. Le modalità di esecuzione di ciascuno di questi sono le medesime, rilevando per le criptovalute considerate i seguenti dati: quotazione dei rapporti di cambio sull'exchange (considerando la miglior offerta sia per acquisto sia per la vendita), misura di liquidità bid-ask spread e variazione percentuale del prezzo rispetto alle precedenti ventiquattro ore. Il processo di raccolta dei dati è stato eseguito nei limiti della tecnologia a disposizione, utilizzando come connessione una fibra ottica domestica che ha garantito una frequenza di campionamento approssimativamente compresa tra 300 e 350 millisecondi. La piattaforma di scambio su cui i dati relativi alle criptovalute sono stati raccolti è Binance, mentre la tipologia di arbitraggio triangolare considerata è quella costituita da un ordine di acquisto e due ordini di vendita.

3.2.1. Esecuzione del primo esperimento

Il primo tentativo di rilevazione di opportunità di arbitraggio triangolare è stato eseguito il giorno 22 aprile 2021 sulle triadi EASY-BTC-ETH e BUSD-DAI-USDT. Per un arco temporale di ventiquattro ore il software Python ha eseguito l'attività di raccoglimento dei dati on-line: quest'ultimi sono stati successivamente elaborati offline per una presentazione chiara dei risultati e un'attenta analisi delle circostanze in cui i disallineamenti di prezzo appaiono. Le elaborazioni offline dei dati sono inoltre finalizzate alla visualizzazione grafica degli stessi, eseguita per mezzo della libreria Matplotlib di Python. Per quanto riguarda la prima triade di criptovalute, l'esito dell'esperimento eseguito è riassunto dal grafico sottostante. Esso presenta le opportunità trovate durante l'analisi e i profitti percentuali che possono essere potenzialmente ottenuti.

6. Profitti percentuali al netto delle commissioni con arbitraggio triangolare. Triade Easy-Btc-Eth.



Il diagramma appena riportato presenta sull'asse delle ascisse il tempo di campionamento, mentre sull'asse delle ordinate i profitti percentuali sul capitale investito ottenibili ipotizzando di eseguire una strategia di arbitraggio triangolare. Come è possibile appurare dal grafico, inefficienze di mercato di questa tipologia sono una realtà nel caso delle criptovalute, anche se bisogna riconoscere che l'esperimento in questione è stato particolarmente fortunato: sono stati infatti rilevate 618 occasioni di arbitraggio su un totale di circa

270000 richieste. Il profitto percentuale più alto ottenibile è pari al 2.19%, già considerato al netto delle commissioni, assumendo una tasso variabile pari al 0.1% per transazione, ed è rappresentato dall'impulso presente all'incirca al centro del grafico. Nonostante il numero di arbitraggi profittevoli potenzialmente eseguibile fosse piuttosto ampio, è decisamente interessante notare come le opportunità di arbitraggio con i profitti più alti siano anche quelle di durata più breve. Sebbene ciò non sia molto evidente da un grafico di questo tipo a causa delle continue oscillazioni dei profitti, una tabella riportante l'andamento dei profitti percentuali nel tempo è decisamente d'aiuto. Nel caso del picco centrale, ad esempio, sono qui riportati i risultati anche dei segnali immediatamente precedenti e successivi:

7. Profitti percentuali con arbitraggio triangolare. Distribuzione segnali. Triade Easy-Btc-Eth.

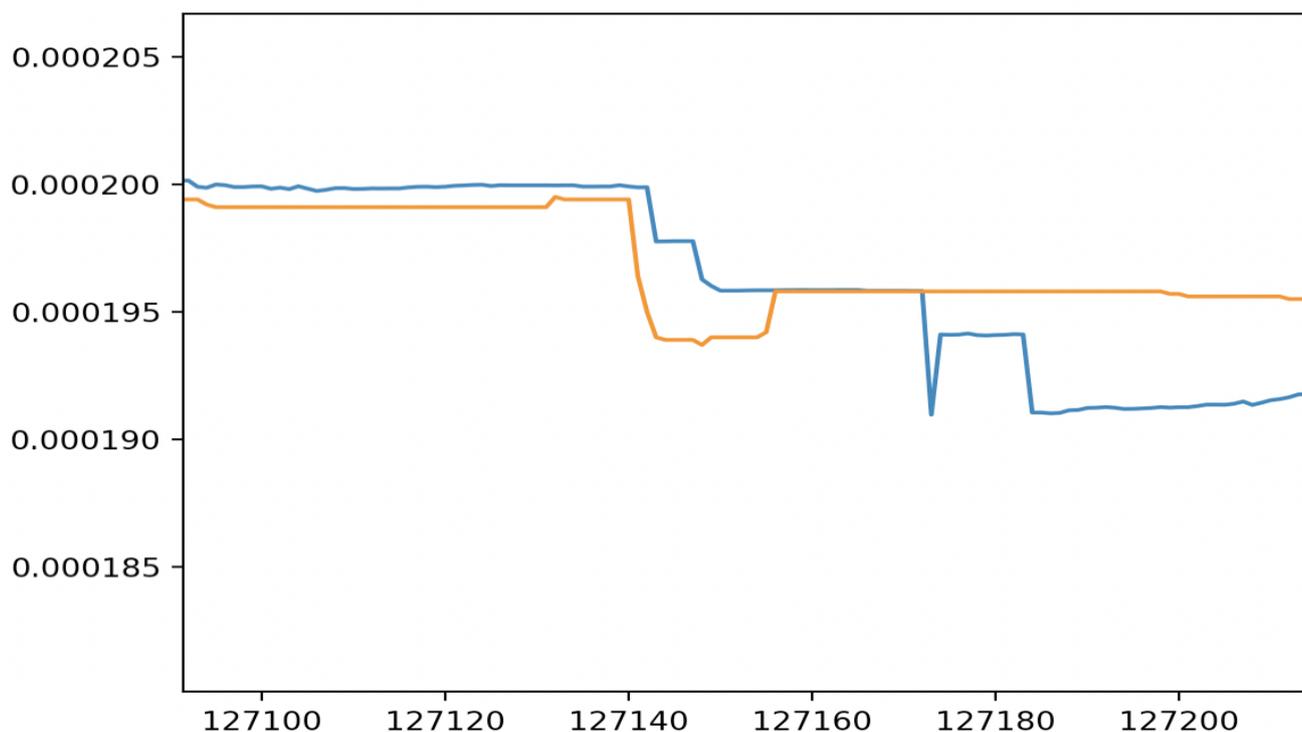
Tempo di campionamento	Profitto percentuale al netto delle commissioni
127.125	0,11%
127.126	0,13%
127.127	0,13%
127.141	1,46%
127.142	2,19%
127.143	1,63%
127.150	0,64%
127.155	0,54%

Per limiti di spazio non è possibile rappresentare tutti i segnali in una tabella, ma i valori degli altri profitti percentuali precedenti e successivi si stabilizzano intorno al 0.10% per i primi e al 0.20% per i secondi. Di fatto, considerando sempre il gruppo di segnali centrali, tale distribuzione ha determinato che profitti superiori al 2% fossero ottenibili in un'unica occasione, superiori all'1% in alcune occasioni contigue alla precedente, mentre inferiori all'1% in tutti gli altri casi compresi in questo insieme. Ricordando che il software in questione è in grado di effettuare circa tre richieste al secondo dato il tempo di campionamento, la possibilità di ottenere un profitto superiore al 2% oltre ad essere l'unica rilevata è esistita al massimo per tre decimi di secondo, un arco di tempo decisamente breve.

La tipologia di grafico presentata per illustrare le occasioni di arbitraggio triangolare rilevate è particolarmente utile per l'esposizione dei profitti ottenibili, tuttavia fornisce scarse informazioni riguardo i movimenti e le dinamiche dei prezzi che concorrono alla creazione di queste opportunità. A tal fine, è possibile scomporre la formula del profitto percentuale presentata nel paragrafo 2.2 e analizzare i valori delle

sue singole componenti. Precisamente, è possibile accorpate i rapporti di cambio rilevati tra le criptovalute in due misure: la prima definita dal prodotto del secondo e del terzo cambio, la seconda semplicemente pari alla quotazione della prima coppia di trading. Dall'andamento di tali due misure è possibile analizzare istante per istante come ciascuna occasione di arbitraggio si sia creata. Nel caso del profitto massimo rilevato, pari a 2,19% l'esito di questo tipo di visualizzazione è il seguente:

8. Andamento dei rapporti di cambio in occasione di arbitraggio triangolare. Triade Easy-Btc-Eth.



La linea blu rappresenta la prima misura descritta, ossia il prodotto tra il secondo e il terzo rapporto di cambio. La linea arancione, invece, è pari al primo rapporto di cambio. In condizioni di piena efficienza di mercato, affinché tecniche di arbitraggio non siano applicabili, la linea arancione dovrebbe essere sovrapposta o superiore rispetto a quella blu. È bene precisare che nel grafico in questione non sempre la superiorità del prodotto tra secondo e terzo cambio implica la possibilità di eseguire arbitraggio, in quanto la presenza di costi di transazione rendono piccoli gap tra le due linee ammissibili. Come è possibile notare dalla figura, prima del tempo di campionamento 127.141 le due misure seguono un andamento simile, con un valore del prodotto tra secondo e terzo cambio di poco superiore al primo. Tale superiorità iniziale, per l'appunto, descrive perfettamente la precisazione appena fatta riguardo la presenza di costi di transazione: inizialmente le opportunità di arbitraggio sono inesistenti o dell'ordine di pochi decimi percentuali. A partire dal tempo 217.141, vi è un improvviso calo di prezzo del primo rapporto di cambio che non è ancora

compensato da una correzione dei valori del secondo e del terzo rapporto. La presenza di questo “ritardo” nella correzione dei prezzi di secondo e terzo cambio è proprio la determinante della formazione di questa opportunità di arbitraggio. Il tempo di correzione totale che è stato impiegato dal mercato è ricavabile conoscendo la frequenza di campionamento e l’intervallo di richieste in cui i disallineamenti di prezzo sono avvenuti: un totale di circa 15 richieste per una frequenza di campionamento pari a 3 decimi di secondo restituiscono un valore totale di 5 secondi. Ad ogni modo, durante questo arco di tempo l’intensità dei profitti potenziali è gradualmente diminuita e ricordiamo che il picco di 2,19% corrisponde ad un’unica rilevazione.

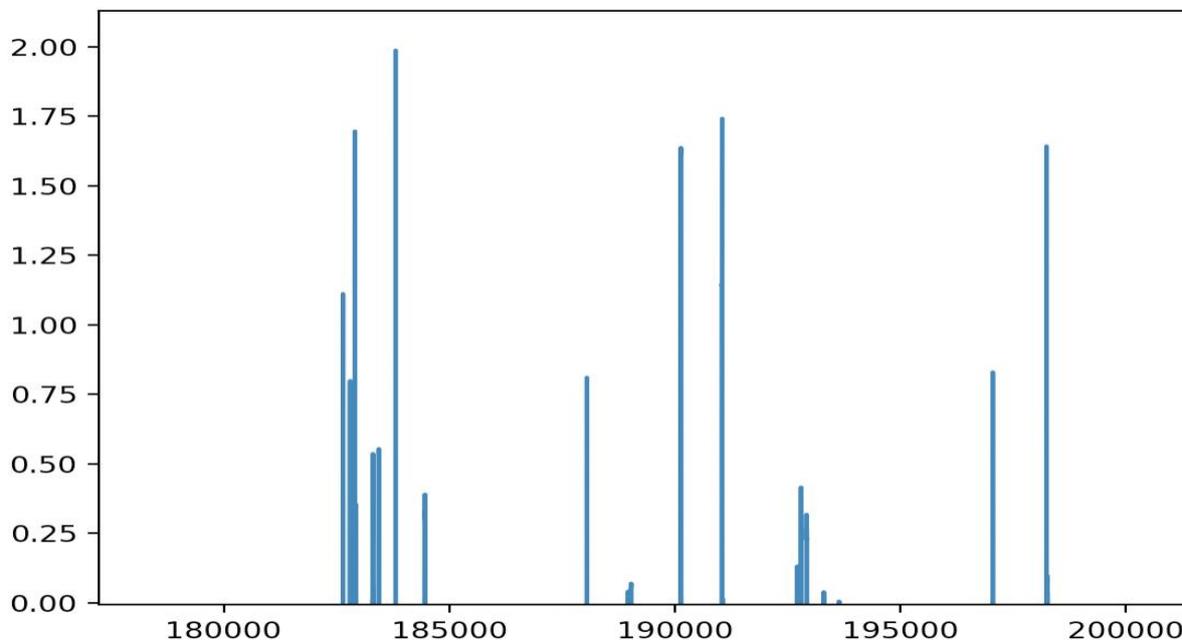
Le opportunità finora presentate non sono gli unici valori degni di nota trovati durante l’analisi; un secondo gruppo di segnali piuttosto interessanti è infatti situato tra i tempi di campionamento pari a 180.000 e 200.000. All’interno di questo gruppo sono infatti presenti tre picchi di profitto con andamento decrescente:

9. Profitti percentuali con arbitraggio triangolare. Distribuzione segnali. Triade Easy-Btc-Eth.

Tempo di campionamento	Profitto percentuale al netto delle commissioni
183.114	1,98%
191.051	1,74%
198.240	1,64%

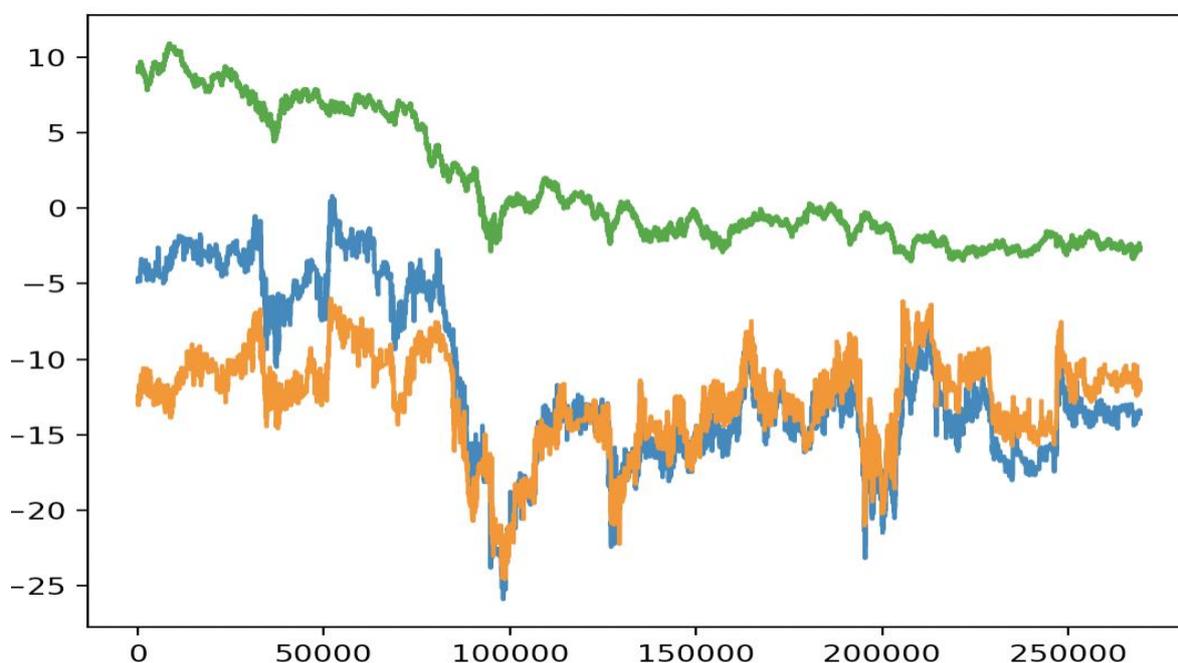
La visualizzazione grafica di questo gruppo di segnali è favorita da questo ulteriore diagramma, ricavato dal sesto grafico a seguito di uno zoom sui tempi di campionamento interessati:

10. Profitti percentuali al netto delle commissioni con arbitraggio triangolare. Triade Easy-Btc-Eth.



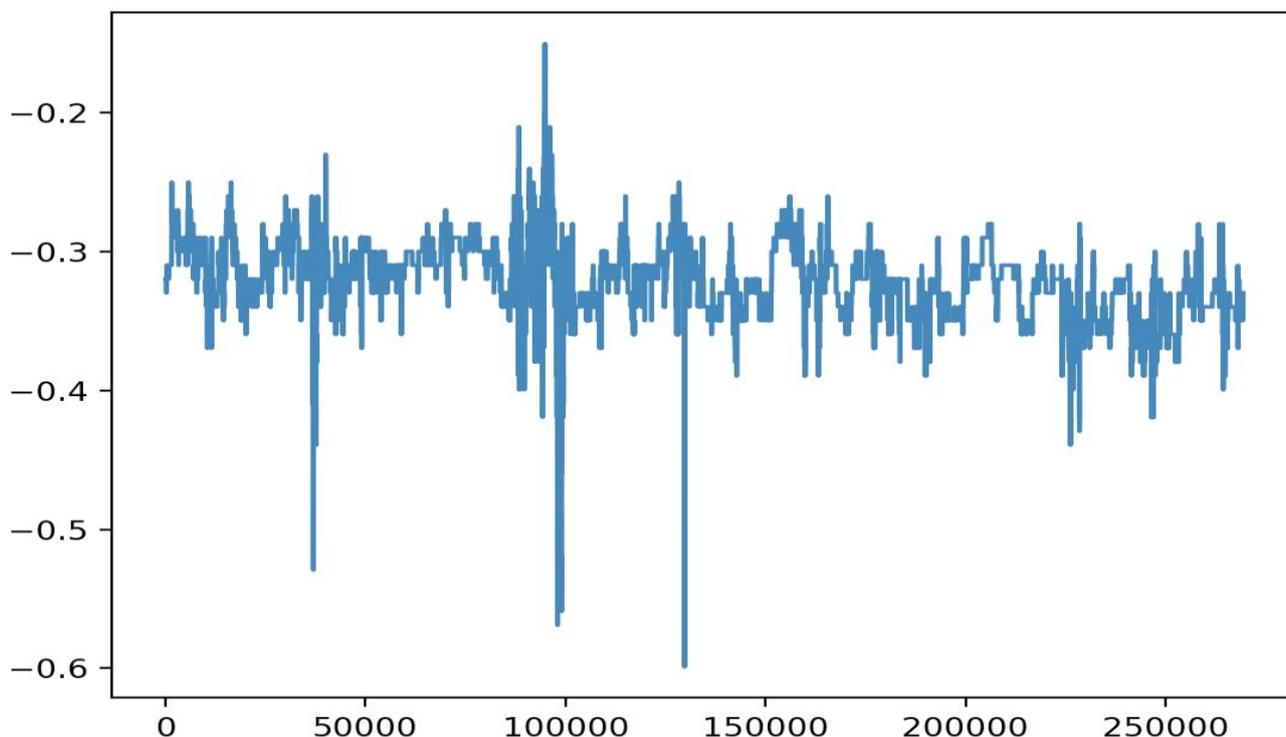
La triade di criptovalute appena considerata ha complessivamente riportato un elevato numero di opportunità di arbitraggio triangolare. Tale circostanza potrebbe essere stata favorita da movimenti di prezzo piuttosto volatili per le criptovalute in questione: durante l'analisi sono infatti stati raccolti dati relativi alla variazione percentuale dei prezzi nelle ultime ventiquattro ore e i valori ottenuti variano secondo intervalli piuttosto ampi.

11. Variazioni percentuali dei rapporti di cambio rispetto al prezzo delle ultime ventiquattro ore. Triade Easy-Btc-Eth.



Le linee di colore blu, arancione e verde rappresentano rispettivamente le variazioni percentuali del primo, secondo e terzo rapporto di cambio. Come è possibile osservare dal grafico, il primo rapporto di cambio presenta un range di variazione dei valori di quasi 25 punti percentuali rispetto al prezzo delle ventiquattro ore precedenti. La seconda coppia di trading, invece, ha registrato un'ampiezza di circa 20 punti percentuali in termini di variazione di prezzo. La variazione minore registrata nell'esperimento in questione appartiene infine al terzo rapporto di cambio, il cui prezzo è variato meno del 15 per cento. Nonostante i valori in termini assoluti non siano eccessivamente elevati, le variazioni di prezzo registrate sulla triade EASY-BTC-ETH sono significative, soprattutto se paragonate ai risultati dell'equivalente esperimento eseguito con le stablecoin BUSD-DAI-USDT. Quest'ultimo esperimento è stato eseguito parallelamente all'analisi condotta sulla prima triade di criptovalute ad elevata volatilità e presenta risultati opposti rispetto alle numerose opportunità di arbitraggio appena presentate. Riproponiamo dunque la stessa tipologia di grafico del punto sei, stavolta evitando di fissare l'origine dell'asse delle ordinate pari a zero, in quanto non sono state rilevate occasioni di arbitraggio profittevoli al netto delle commissioni nel caso della triade BUSD-DAI-USDT.

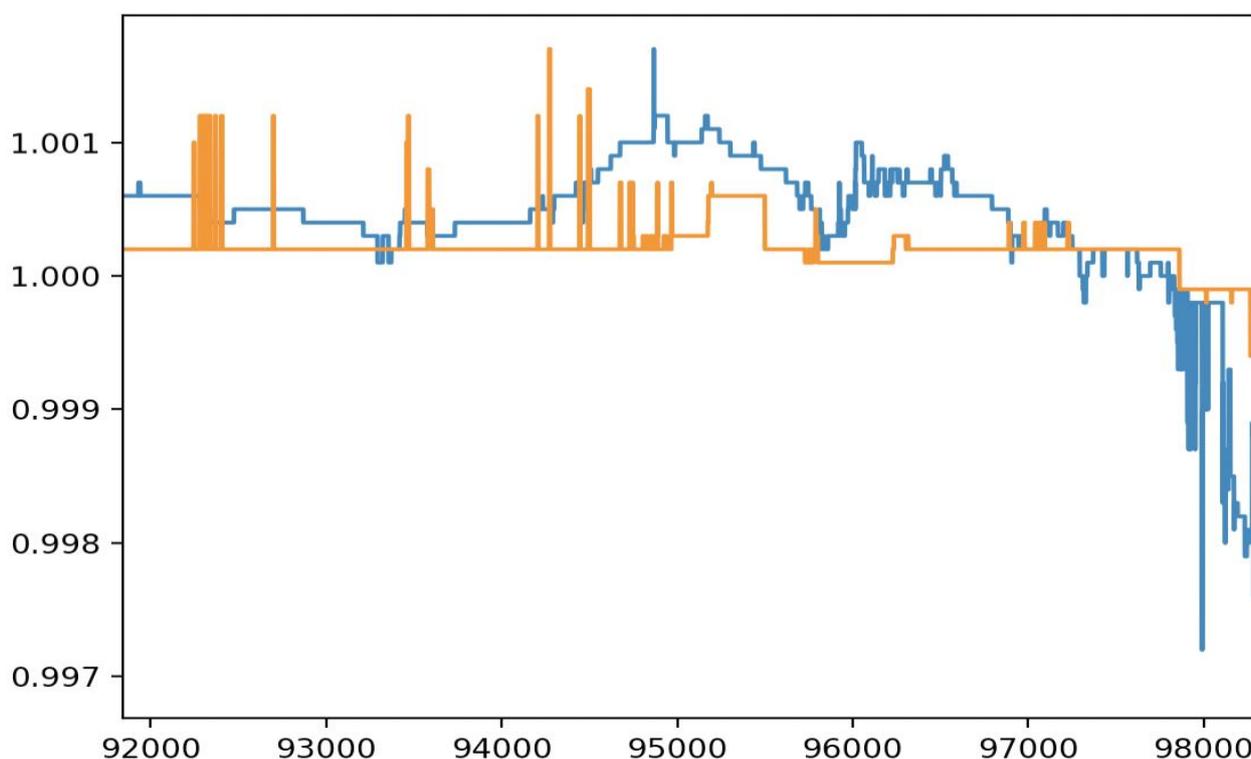
12. Profitti percentuali al netto delle commissioni con arbitraggio triangolare. Triade Busd-Dai-Usdt.



I profitti percentuali rilevati sono purtroppo tutti negativi, di fatto rendendo inutile l'esecuzione di una tecnica di arbitraggio sui mercati considerati. Il range di variazione dei valori è di 45 punti percentuali, 34

mentre il profitto massimo ottenibile è stato pari al $-0,15\%$ al tempo di campionamento 94.910. I movimenti di prezzo di questa categoria di token, come è possibile notare dall'aspetto più "denso" del grafico, hanno un andamento quasi a scalini rispetto alle prime criptovalute considerate. Questo accade perché le stablecoin tendono a variare meno nel tempo per ragioni strutturali, di fatto preservando il loro valore e restituendo lo stesso livello di prezzo per molte richieste consecutive del software. Nel caso in questione, almeno apparentemente, questa tipologia di movimento non si presta alla creazione di disallineamenti tra i prezzi delle diverse coppie di trading. Ad ogni modo, qualora non vi fossero stati costi di transazione, alcune delle opportunità rilevate sarebbero risultate profittevoli. In tal senso, l'unica opportunità un po' più rilevante da indagare rappresenta il massimo rilevato durante questo arco di tempo, per cui il primo cambio e il prodotto tra secondo e terzo cambio sono riportati nel seguente diagramma:

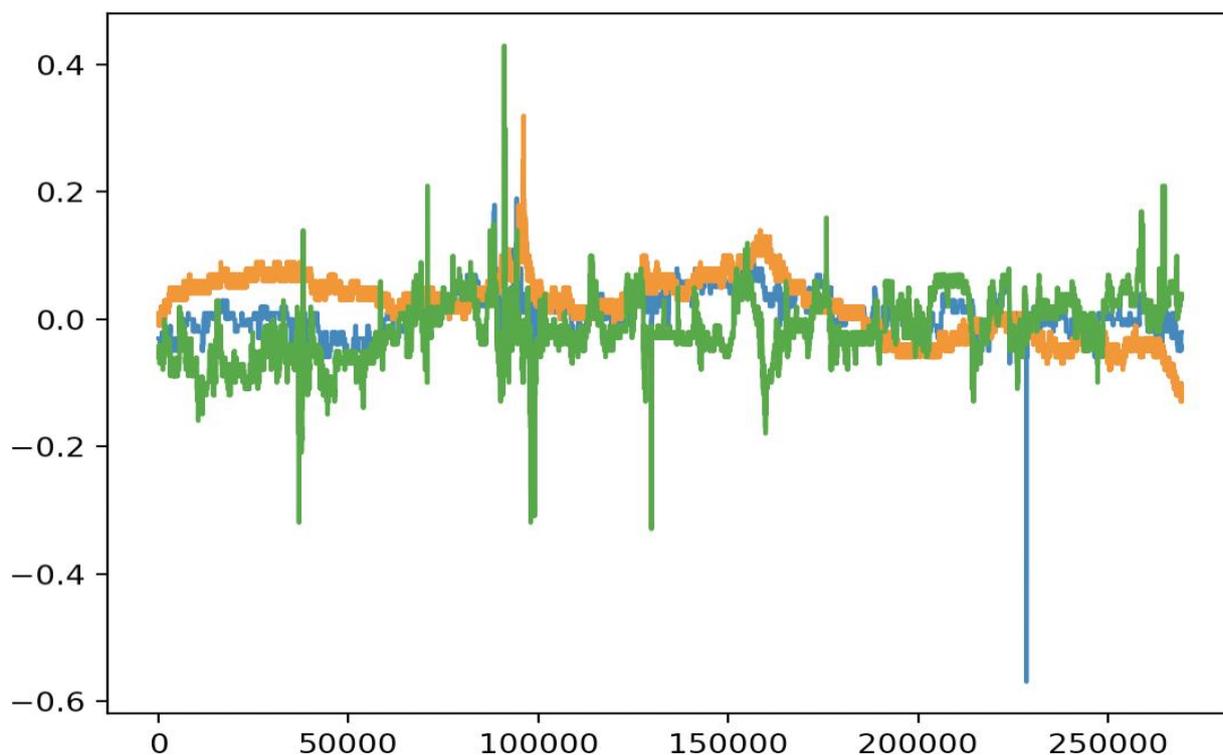
13. Andamento dei rapporti di cambio in occasione di arbitraggio triangolare. Triade Busd-Dai-USdt.



Come nel grafico precedente relativo ai valori dei rapporti di cambio, la linea blu corrisponde al prodotto tra il secondo e il terzo cambio, mentre la linea arancione è pari alla prima quotazione individualmente considerata. Dal grafico in questione è possibile appurare maggiormente l'andamento a scalini dei prezzi prima menzionato, oltre a verificare che la determinante del picco di profitto rilevato pari a $0,15\%$ in assenza di commissioni è data dal secondo o dal terzo rapporto di cambio. Un improvviso aumento di una di queste due misure ha infatti determinato una crescita della linea blu a partire dal tempo di campionamento 94.200.

Combinando tale aumento a un andamento più o meno stabile del prezzo della prima coppia di trading tra le richieste numero 94.200 e 95.000, in assenza di commissioni si sarebbe creata un'inefficienza di mercato per cui l'esecuzione di arbitraggio triangolare sarebbe stata profittevole. Nonostante i movimenti di prezzo presentati abbiano un'ampiezza simile ai grafici precedenti, se non considerati in scala, è importante non lasciarsi ingannare dalle oscillazioni risultanti dal diagramma appena riportato. L'asse delle ordinate consente di ottenere l'intervallo dei valori assunti dalle due misure rappresentate, il quale è facilmente calcolabile attraverso la differenza tra il valore massimo e minimo ed è pari a 0,004. Rapportando tale valore al minimo o al massimo delle osservazioni, è possibile appurare come l'oscillazione massima stessa dei prezzi nei tempi di campionamento considerati sia minore di un singolo punto percentuale. Questo comportamento è perfettamente coerente con il resto dei dati ottenuti durante l'arco temporale delle ventiquattro ore, come espresso dalle variazioni percentuali dei prezzi considerando tutti i segnali di campionamento:

14. Variazioni percentuali dei rapporti di cambio rispetto al prezzo delle ultime ventiquattro ore. Triade Busd-Dai-Usdt



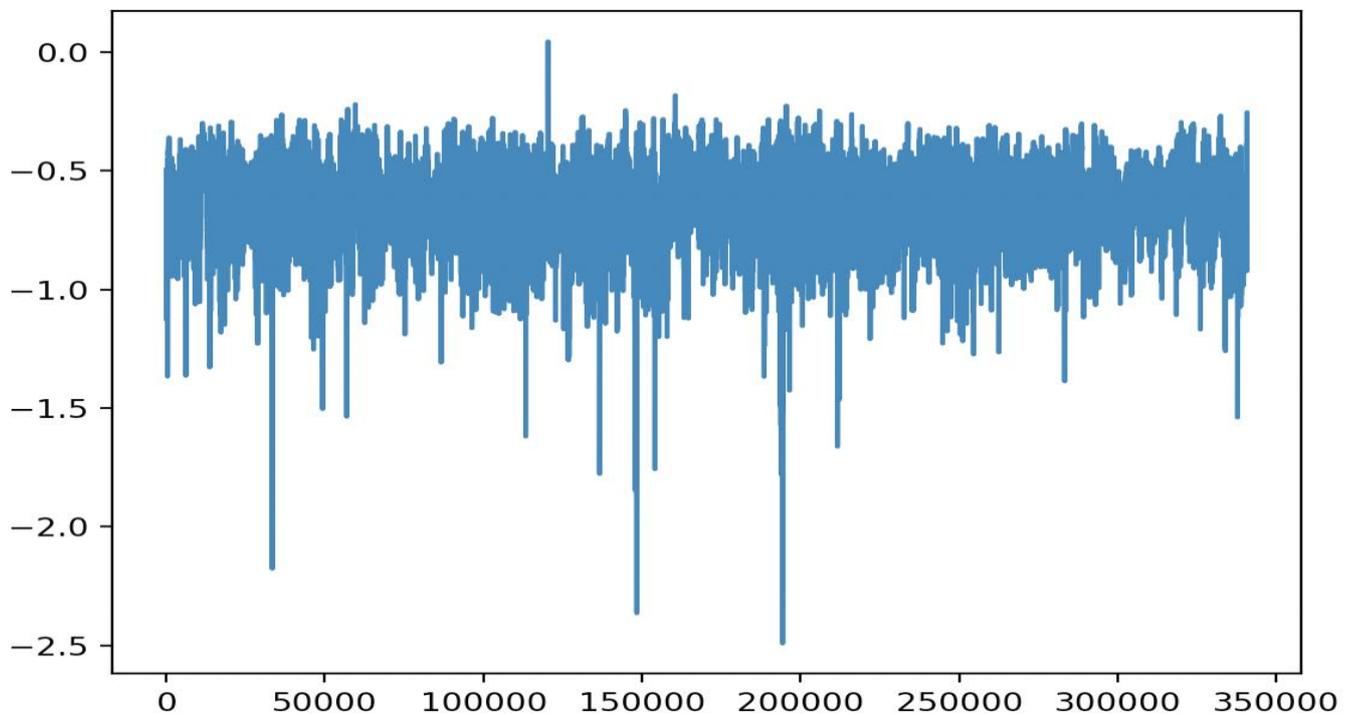
Le linee di colore blu, arancione e verde rappresentano rispettivamente le variazioni percentuali del primo, secondo e terzo rapporto di cambio. Il grafico in questione potrebbe apparire un po' caotico al primo

sguardo, in quanto le misure riportate tendono a sovrapporsi nei valori che assumono nel tempo. Ad ogni modo, i valori presenti sull'asse delle ordinate consentono anche in questo caso di cogliere la piccola entità delle variazioni di prezzo registrate da queste stablecoin nell'arco di ventiquattro ore. Il valore massimo ottenuto, considerato in termini assoluti, corrisponde infatti al primo rapporto di cambio ed è pari a una variazione negativa di 0,6%. La seconda più alta variazione di prezzo è invece determinata dal terzo rapporto di cambio, che ha registrato una variazione positiva di prezzo di poco superiore allo 0,4%. Il secondo rapporto di cambio ha invece preservato un andamento piuttosto stabile, discostandosi di poco dal suo valore medio in corrispondenza del tempo di campionamento 95,600. È dunque plausibile ipotizzare che una minore volatilità in termini di variazione di prezzi non abbia consentito la formazione di discrepanze tra i rapporti di cambio, in quanto oscillazioni di minore entità fanno sì che i prezzi non si discostino eccessivamente dal loro andamento corrente. La mancanza di forti shock del livello dei prezzi in questi mercati, di conseguenza, potrebbe non aver creato la necessità di correzioni di mercato sfruttabili mediante arbitraggio triangolare.

3.2.2. Esecuzione del secondo esperimento

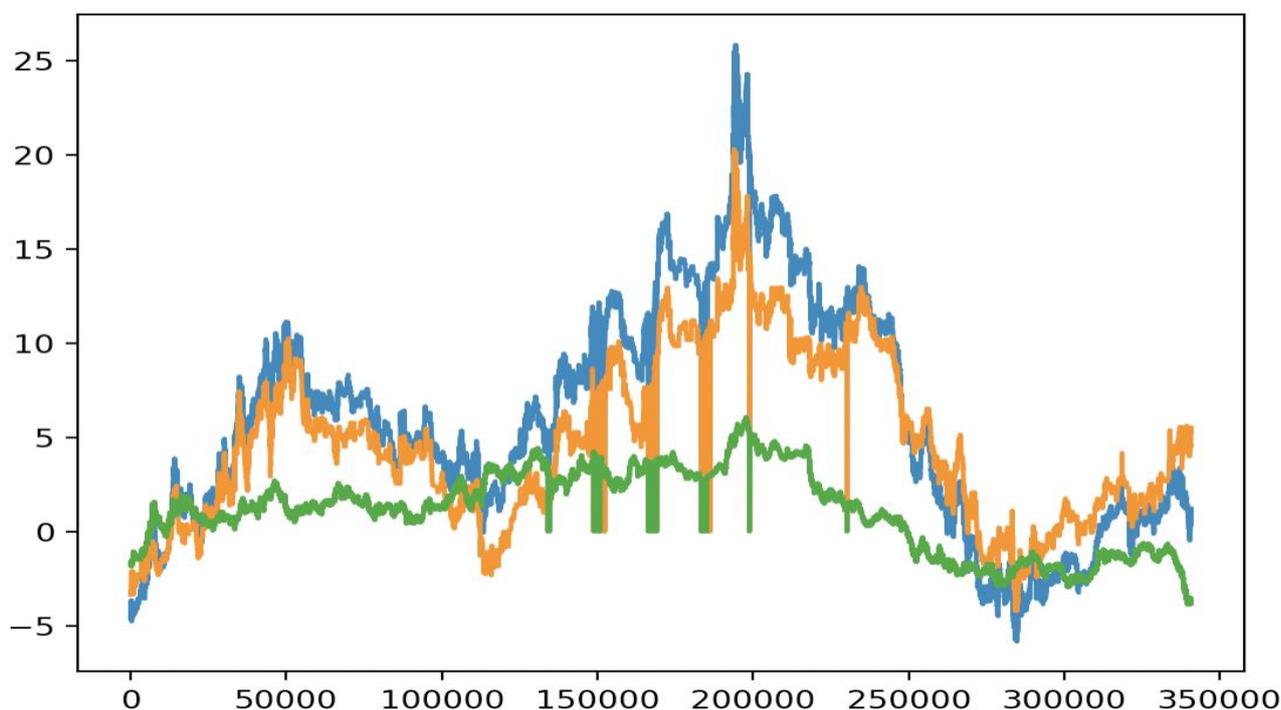
Il secondo esperimento volto alla rilevazione di opportunità di arbitraggio triangolare sui mercati di criptovalute è stato eseguito sulle triadi XVS-BTC-BNB e PAX-USDT-BUSD. Come per il tentativo precedente, al fine di garantire la consistenza dell'analisi è stata condotta una rilevazione in parallelo per entrambe le triadi durante un arco temporale complessivo di ventiquattro ore. Il software per l'ottenimento dei dati è stato eseguito il giorno 25 aprile 2021. Di seguito, il grafico raffigurante i profitti percentuali potenziali al netto delle commissioni durante l'intera tempistica di campionamento:

15. Profitti percentuali al netto delle commissioni con arbitraggio triangolare. Triade Xvs-Btc-Bnb



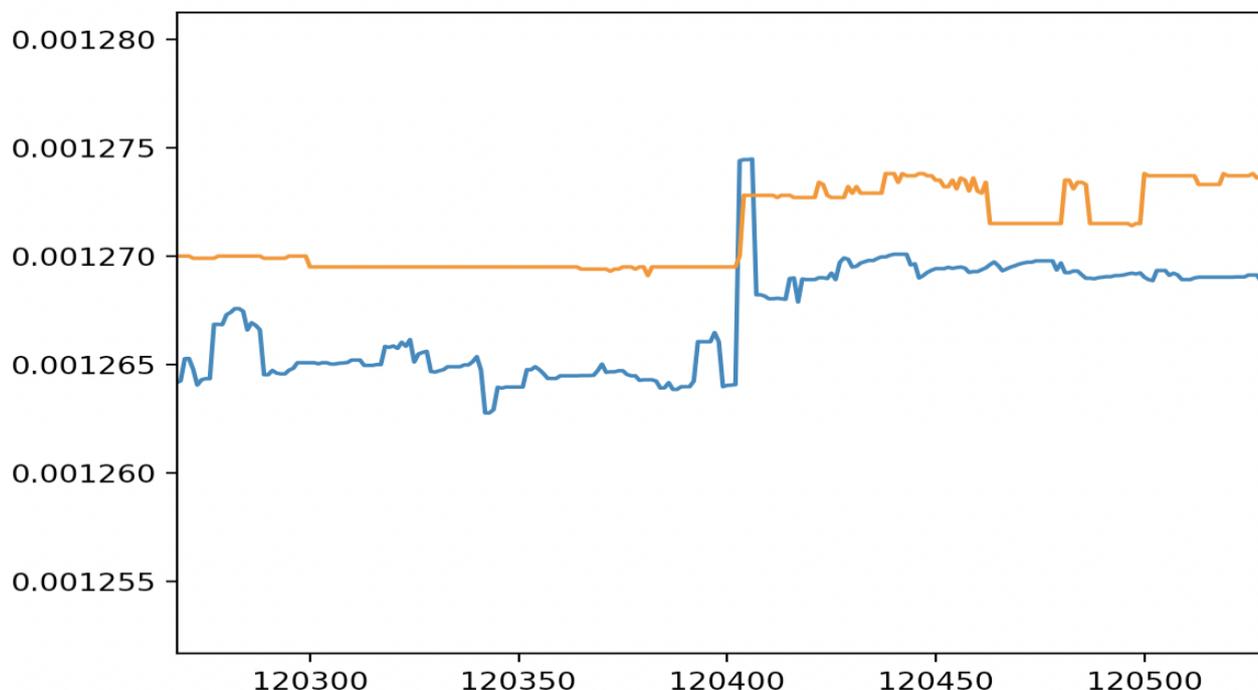
Come per la triade BUSD-DAI-USDT indagata durante il primo esperimento, nel caso in questione si è deciso di esporre i risultati evitando di fissare l'origine dell'asse delle ordinate al punto zero, in quanto vi è stata un'unica occasione di arbitraggio profittevole rilevata. Questa si è verificata al tempo di campionamento 120.404 e riporta un profitto raggiungibile minore al decimo percentuale, precisamente pari a 0,04%. Nonostante i risultati ottenuti siano meno eclatanti rispetto alla triade volatile EASY-BTC-ETH, le volatilità registrate durante il periodo in questione sono piuttosto simili in termini di ampiezza:

16. Variazioni percentuali dei rapporti di cambio rispetto al prezzo delle ultime ventiquattro ore. Triade Xvs-Btc-Bnb.



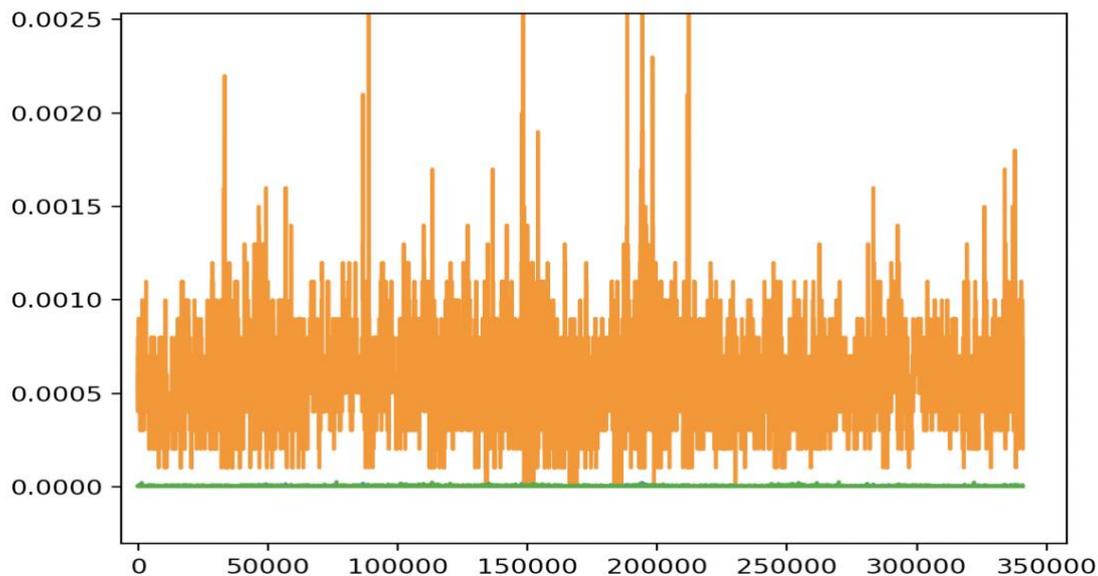
Se si osservano le variazioni percentuali di prezzo dei tre rapporti di cambio, sono immediatamente rilevabili le elevate ampiezze che caratterizzano la prima e la seconda coppia di trading considerata. La prima coppia PAX/USDT presenta infatti un range di trenta punti percentuali, con un valore iniziale pari a -5% rispetto alle ventiquattro ore precedenti e un massimo leggermente superiore al 25% in corrispondenza del tempo di campionamento 200.000. La seconda più alta variazione è registrata dal secondo rapporto di cambio che, come il primo, ha un valore iniziale prossimo al -5% e registra un massimo pari a poco meno di 20%. Infine, la terza coppia di trading BUSD/USDT è quella che ha mostrato una quotazione più stabile, con un'ampiezza totale di variazione di circa 10 punti percentuali. Nonostante le variazioni di prezzo abbiano avuto un andamento piuttosto movimentato, durante il corso di quest'esperimento è stata rilevata un'unica opportunità di arbitraggio come menzionato in precedenza. Il valore in questione è piuttosto lontano dalle oltre seicento occasioni profittevoli rilevate durante l'analisi di EASY-BTC-ETH e sembra invalidare la potenziale relazione tra la volatilità dei prezzi e la formazione di disallineamenti tra le varie quotazioni. Conduciamo quindi nuovamente un'analisi più specifica volta a valutare i movimenti dei rapporti di cambio intorno al tempo di campionamento 120.404, momento in cui è rilevata l'unica possibilità di arbitraggio triangolare che avrebbe potuto creare un profitto anche al netto delle commissioni.

17. Andamento dei rapporti di cambio in occasione di arbitraggio triangolare. Triade Xvs-Btc-Bnb.

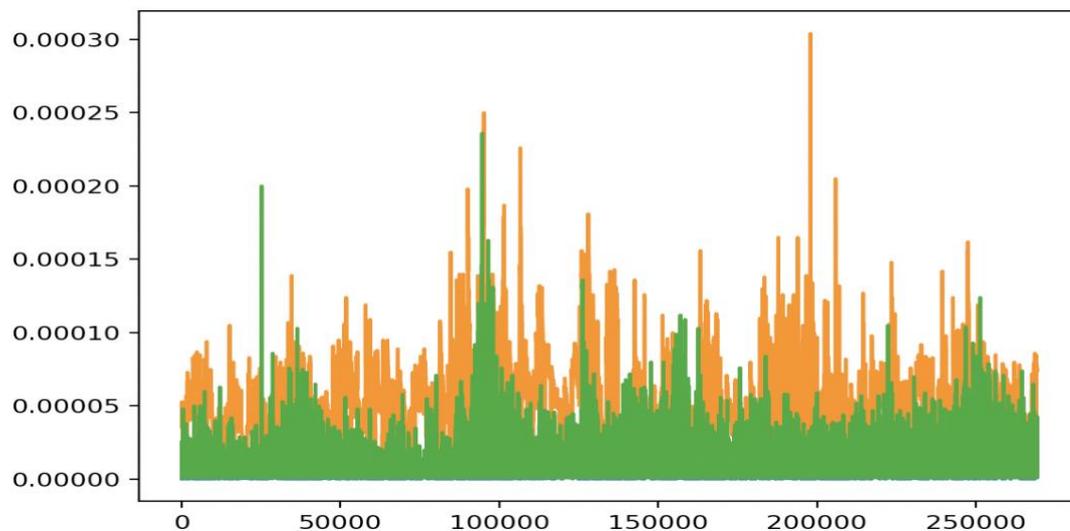


Ricordando che la linea arancione è pari al primo rapporto di cambio, mentre la linea blu è data dal prodotto tra il secondo e il terzo rapporto, il grafico appena riportato descrive l'andamento dei cambi in corrispondenza dell'unica occasione di arbitraggio rilevata. La determinante della discrepanza in questione è costituita da un'improvvisa crescita della linea blu in corrispondenza del tempo 120.404 e dipende dunque dai valori del secondo o del terzo rapporto di cambio. La durata dell'occasione rilevata è di circa tre richieste, determinando un tempo totale di correzione pari a meno di un secondo. È interessante notare come il tempo in questione, a parità di intensità di profitti conseguibili, sia profondamente diverso dai valori registrati nel caso della triade EASY-BTC-ETH. Nel primo esperimento, infatti, sono state rilevate molte opportunità di arbitraggio a cui sono associati profitti piuttosto bassi come quella appena presentata. La differenza tra i due casi è però relativa ai "tempi di sopravvivenza" di tali occasioni, i quali erano piuttosto dilatati nel caso del primo esperimento e sono invece meno di un secondo in quest'ultimo caso. I risultati empirici appena osservati ci inducono quindi a confermare l'idea che la volatilità dei prezzi non possa essere l'unica determinante di discrepanze per l'applicazione di arbitraggio, ma sia parte di un più complesso insieme di fattori che concorrono a determinare la possibilità di esecuzione di questa tecnica o meno. Altri fattori, ad esempio la liquidità del mercato, potrebbero indurre risposte più veloci in termini di correzioni di prezzo facendo quindi sparire la presenza di lag o ritardi sfruttabili secondo tecniche di questo tipo. L'idea appena riportata è confermata con riferimento al *bid-ask spread* presente nel mercato, il quale è una valida misura di liquidità calcolata attraverso la differenza tra i prezzi della migliore offerta di acquisto e di vendita per ciascuna coppia di trading.

18. Bid-ask spread: misura di liquidità del mercato. Triade Xvs-Btc-Bnb.



19. Bid-ask spread: misura di liquidità del mercato. Triade Easy-Btc-Eth.

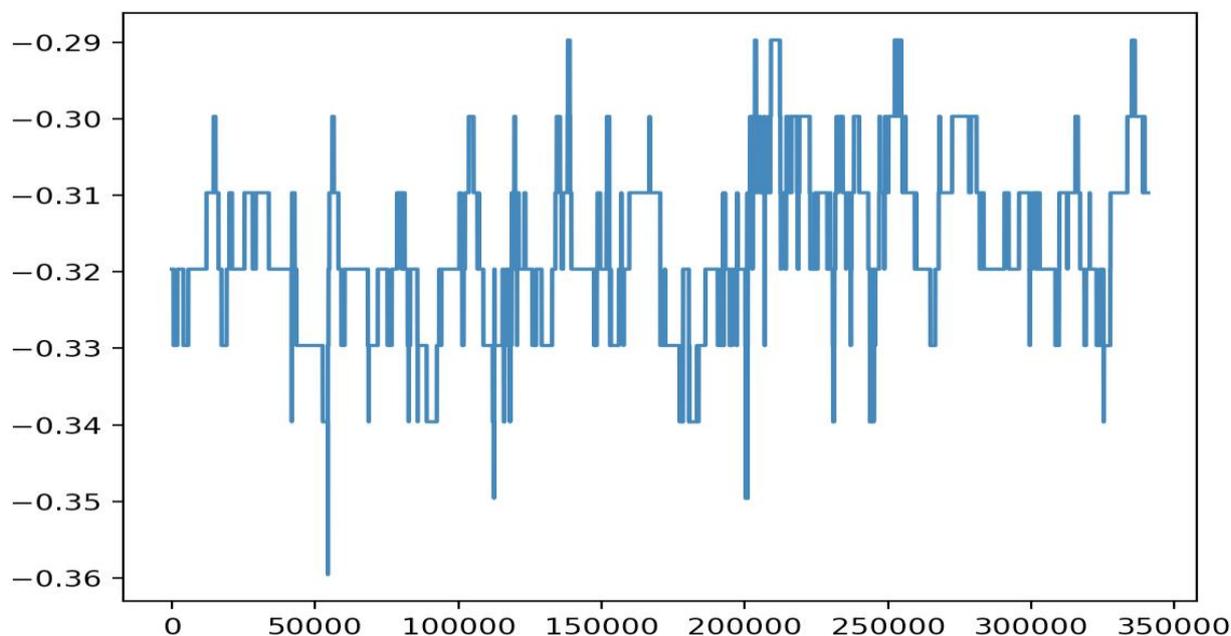


I diagrammi appena riportati descrivono la liquidità dei mercati relativi a ciascuna delle triadi considerate. Il grafico numero 19, in particolare, si riferisce alla triade EASY-BTC-ETH ed è riportato al fine di eseguire un confronto con i dati dell'esperimento attuale. Con riferimento al grafico numero 18, i colori blu, verde e arancione rappresentano rispettivamente dati relativi al primo, secondo e terzo rapporto di cambio, anche se la linea blu non è visibile in quanto il cambio XVS/BTC è apparso essere il più liquido in assoluto tra i tre. Secondo la misura del bid-ask spread, il grado di liquidità è infatti inversamente proporzionale alle oscillazioni visibili nel grafico. Di conseguenza, è possibile affermare che anche il terzo rapporto di cambio

BNB/BTC appare essere caratterizzato da elevata liquidità, in quanto come il primo presenta valori prossimi allo zero. Diverso è invece l'esito dell'analisi per quanto riguarda la seconda coppia di trading XVS/BNB, le cui oscillazioni del *bid-ask spread* raggiungono più volte il massimo valore di 0.0025. Complessivamente, la liquidità dei rapporti in questione è elevata e tale affermazione può essere ulteriormente appurata alla luce di un confronto con i dati del primo esperimento. Analizzando infatti la seconda figura possiamo notare come, oltre al secondo cambio EASY/ETH, anche la prima coppia di trading EASY/BTC presenti un *bid-ask spread* caratterizzato da oscillazioni piuttosto elevate. Questo, contrariamente a quanto rilevato durante il secondo esperimento, configura quindi un insieme di tre rapporti di cambio di cui due caratterizzati da una liquidità relativamente non elevata (se paragonata ai valori prossimi allo zero del secondo esperimento). Le differenze appena rilevate tra i mercati in termini di liquidità potrebbero contribuire alla spiegazione del perché in questo caso siano state rilevate così poche occasioni profittevoli di arbitraggio triangolare.

La seconda triade analizzata durante l'esecuzione del secondo esperimento è composta dalle seguenti criptovalute: PAX, USDT e BUSD. Come in precedenza, tutti e tre i token in questione rappresentano delle stablecoin e l'esito dell'analisi è riassunto dal diagramma sottostante:

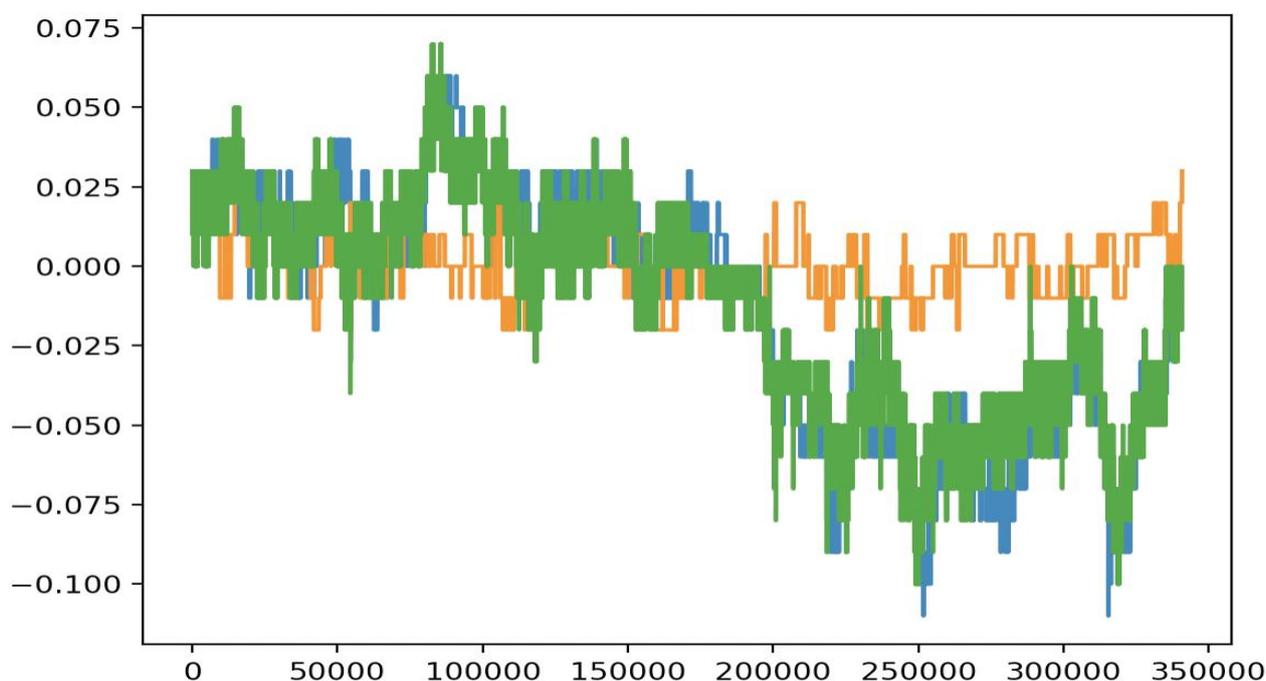
20. Profitti percentuali al netto delle commissioni con arbitraggio triangolare. Triade Pax-Usdt-Busd.



Anche in questo caso, così come per le stablecoin considerate durante il primo esperimento, non sono state rilevate opportunità profittevoli per l'esecuzione di arbitraggio triangolare. Il profitto massimo rilevato al

netto delle commissioni di trading corrisponde infatti all'aliquota percentuale -0,29% da applicare al capitale investito. Qualora non fossero considerati i costi di transazione, invece, dai dati possiamo rilevare 22 opportunità totali di arbitraggio: queste sono lo stesso irrilevanti, in quanto il profitto massimo raggiungibile è pari allo 0,01%, percentuale piuttosto irrisoria. Le dinamiche di movimento dei prezzi sono alquanto simili alle stablecoin già analizzate in precedenza e la volatilità dei prezzi è rappresentata dal grafico sottostante:

21. Variazioni percentuali dei rapporti di cambio rispetto al prezzo delle ultime ventiquattro ore. Triade Pax-Usdt-Busd.

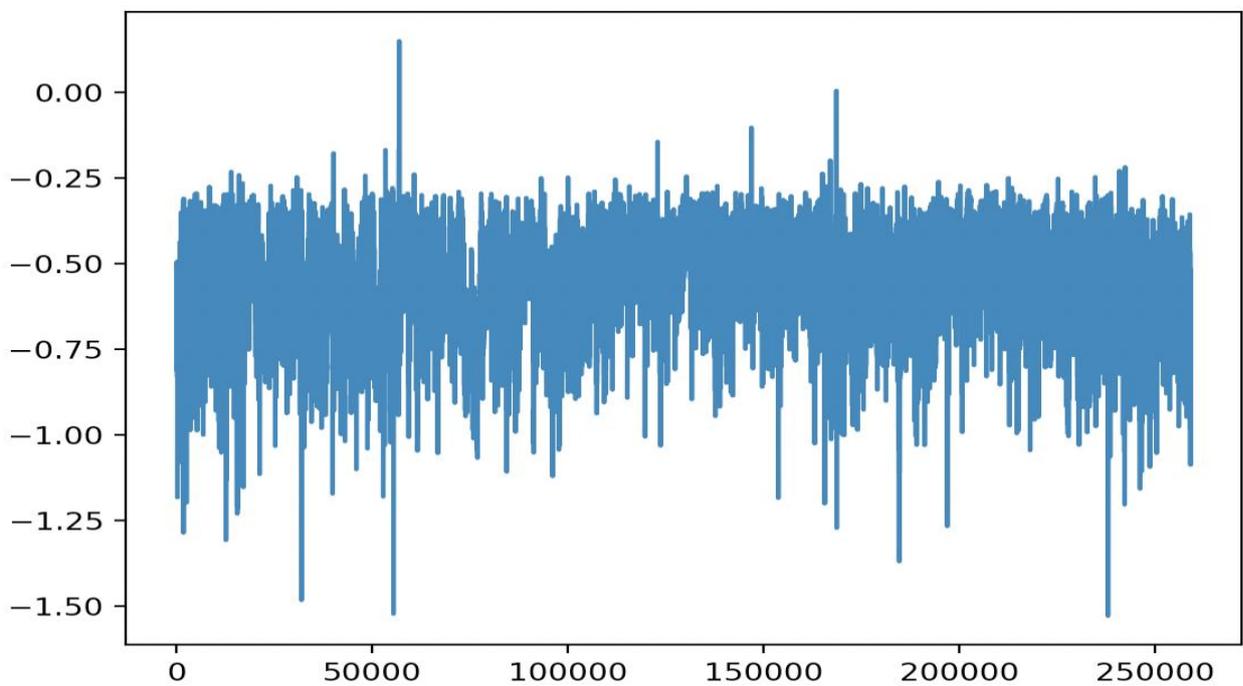


Le oscillazioni riportate dai rapporti di cambio in termini di variazione percentuale rispetto al prezzo delle ventiquattro ore precedenti sono minime. I valori presenti sull'asse delle ordinate ci forniscono un'idea dell'intervallo delle osservazioni in questione: la differenza tra il valore massimo e il valore minimo è infatti pari a 0.175 punti percentuali. Occorre poi specificare che questo valore è la variazione di massima intensità registrata e corrisponde solo alle variazioni del primo e terzo rapporto di cambio. Osservando la linea arancione, infatti, è possibile appurare come la seconda coppia di trading abbia mantenuto una quotazione dei prezzi ulteriormente più stabile e con una deviazione prossima a zero.

3.2.3. Esecuzione del terzo esperimento

Il terzo esperimento è stato eseguito il giorno 2 maggio 2021 allo scopo di confermare i risultati precedentemente ottenuti. Le criptovalute oggetto di analisi sono determinate dalle due triadi NANO-BTC-ETH e USDC-USDT-BUSD. Considerando la prima triade di criptovalute ad alta volatilità, procediamo direttamente con l'esposizione dei risultati in quanto le caratteristiche dell'esperimento in questione sono le medesime dei precedenti. Di seguito sono esposti i profitti percentuali ottenibili al netto delle commissioni con arbitraggio triangolare:

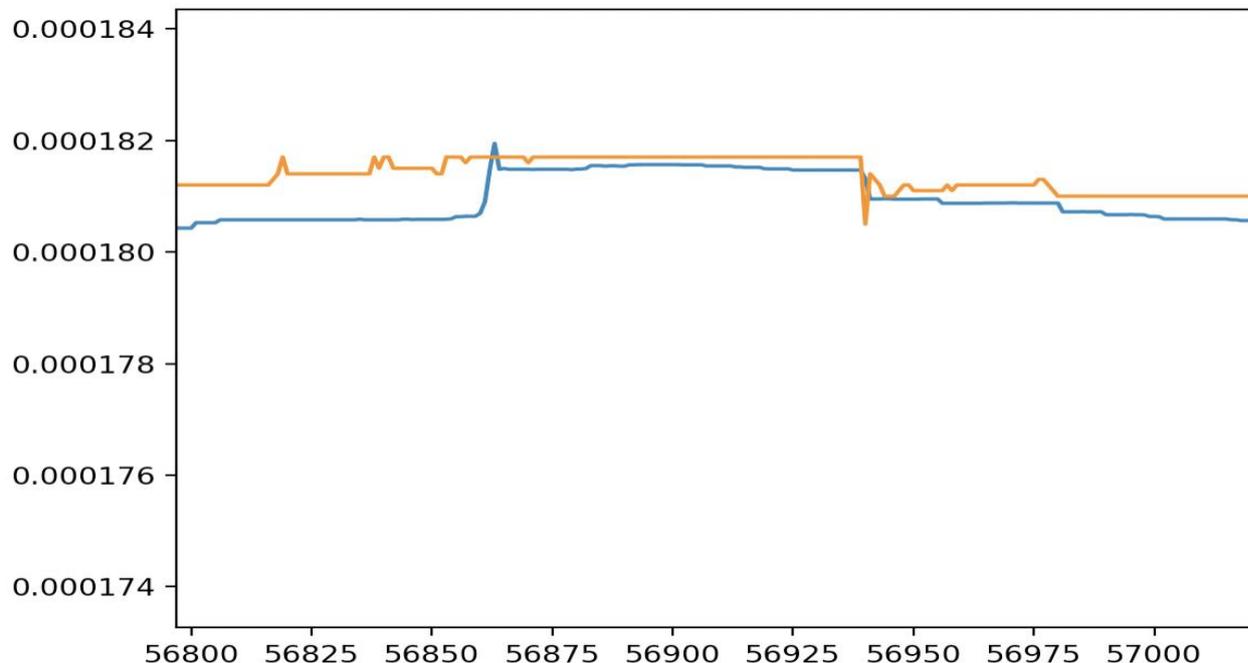
22. Profitti percentuali al netto delle commissioni con arbitraggio triangolare. Triade Nano-Btc-Eth.



Le opportunità riportanti profitti positivi sono due, rispettivamente di entità pari al 0,15% e 0,005% ai tempi di campionamento 56.940 e 168.626 già considerate al netto delle commissioni variabili di trading. Sebbene anche questi valori siano lontani dalle oltre seicento occasioni rilevate nel caso della triade EASY-BTC-ETH, essi sono comunque interessanti e le criptovalute ad alta volatilità insistono nel presentare quasi sempre qualche occasione di arbitraggio a differenza delle stablecoin. In particolare, il profitto registrato di 0,15% rappresenta sicuramente la più rilevante delle due occasioni e vale la pena verificare come questa si sia creata con un'analisi dei movimenti dei cambi. Consideriamo quindi il prodotto tra il secondo e il terzo

rapporto di cambio come una singola misura e rappresentiamo tale grandezza sul grafico insieme al primo rapporto di cambio individualmente considerato:

23. Andamento dei rapporti di cambio in occasione di arbitraggio triangolare. Triade Nano-Btc-Eth.

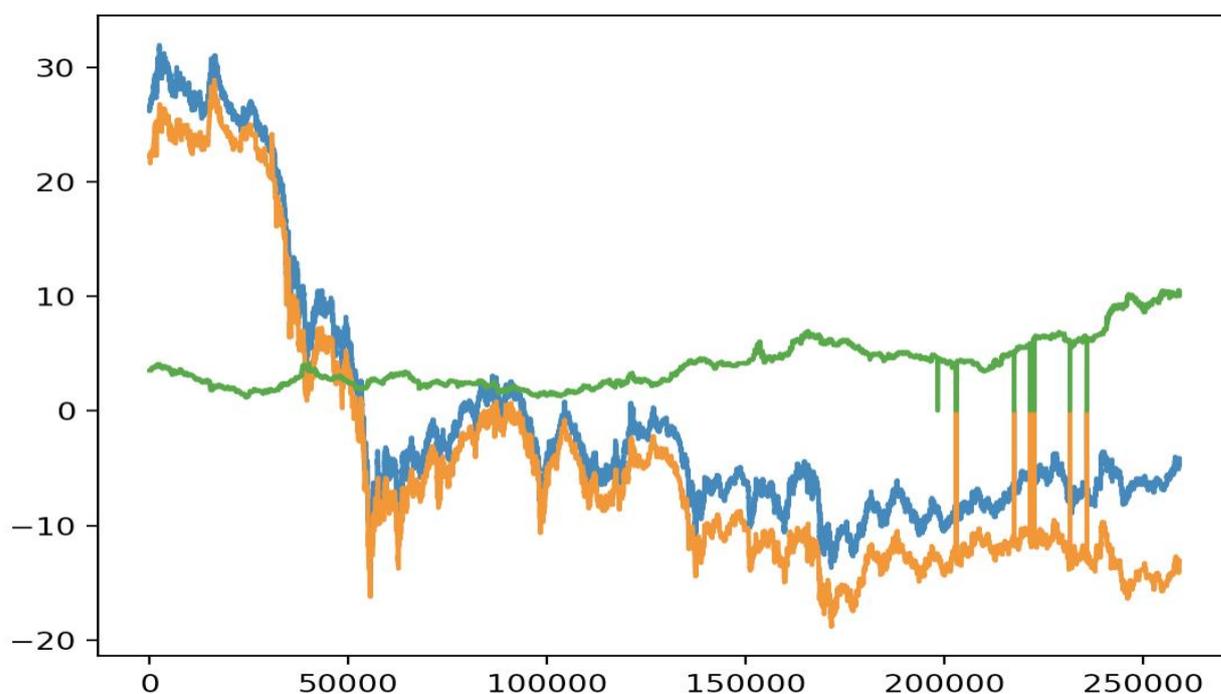


Come anticipato, il picco di profitto pari a 0,15 punti percentuali è stato raggiunto in corrispondenza del tempo di campionamento 56.940, ossia il punto del grafico in cui il prodotto tra secondo e terzo rapporto di cambio ha superato la quotazione della prima coppia di trading. Un aumento di uno dei due cambi facenti parte del prodotto ha infatti determinato una crescita repentina della linea blu, la quale ha superato quella arancione generando una sola rilevazione di possibile arbitraggio. L'andamento precedente dei cambi appare essere piuttosto stabile e in condizioni di efficienza di mercato, in quanto la condizione di profittabilità non appare verificata. Successivamente alla creazione di un'inefficienza al tempo 56.940, segue una repentina correzione al ribasso da parte della stessa metrica facendo sparire l'occasione di arbitraggio in appena un terzo di secondo circa. Inoltre, poco prima del tempo di campionamento 56.950 una rapida discesa del primo rapporto di cambio sembra generare un'ulteriore occasione profittabile: purtroppo così non è stato in quanto tale movimento è stato corretto da una contemporanea discesa della linea blu.

Per quanto riguarda le considerazioni che è possibile effettuare con riferimento alla volatilità dei prezzi nell'arco di tempo considerato, affermiamo che il comportamento della triade in questione non si è

discostato dalle ampie variazioni registrate nei casi precedenti. Anche in questo caso i rapporti di cambio hanno mostrato oscillazioni piuttosto decise, con range dei valori molto simili a quelli calcolati negli altri esperimenti:

24. Variazioni percentuali dei rapporti di cambio rispetto al prezzo delle ultime ventiquattro ore. Triade Nano-Btc-Eth.

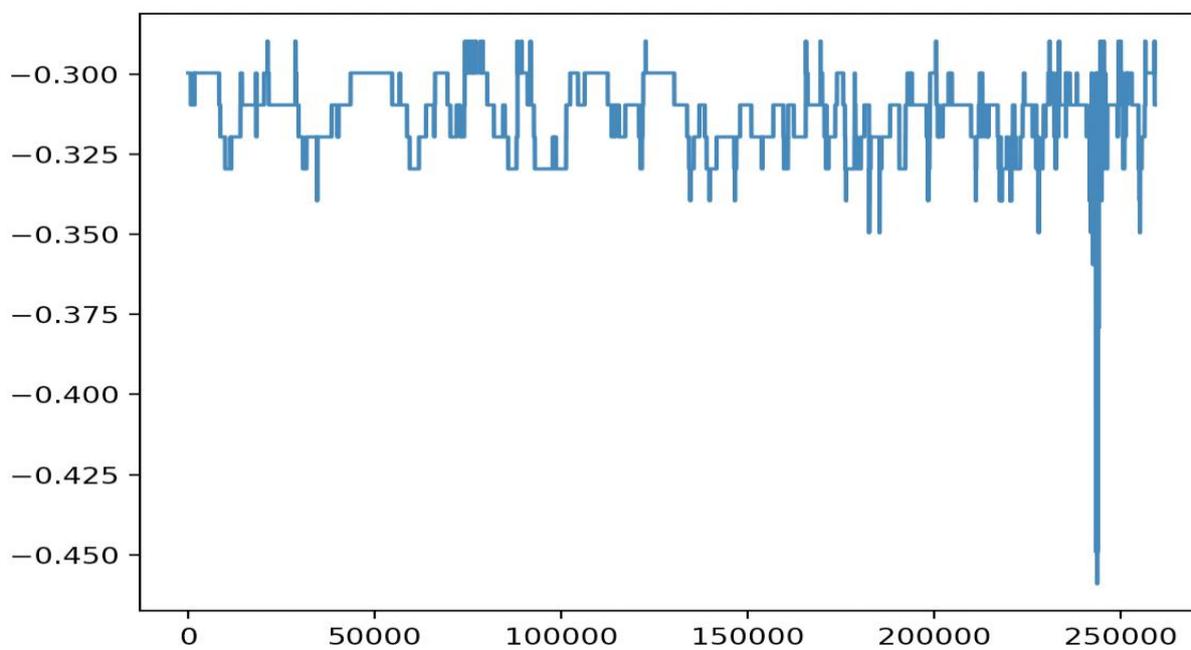


Il primo rapporto di cambio ha registrato una variazione di prezzo al ribasso prossima ai 40 punti percentuali, partendo da una quotazione al rialzo del 30% rispetto alle ventiquattrore precedenti. Un andamento decisamente simile è fornito anche dalla seconda coppia di trading, la quale seguendo lo stesso modello di movimenti registra una variazione leggermente superiore al primo rapporto e si assesta sui -15 punti percentuali al termine dell'esperimento. Il terzo rapporto di cambio è invece quello che ha mostrato meno oscillazioni tra i tre, registrando un rialzo di circa 10 punti percentuali a partire dall'inizio della fase di raccoglimento dei dati.

La seconda triade considerata nel terzo esperimento è composta esclusivamente da stablecoin ed è denominata USDC-USDT-BUSD. Come è naturale aspettarsi seguendo l'andamento dei risultati presentati durante questa tesi, anche in questo caso non sono state rilevate occasioni profittevoli per applicare tecniche di arbitraggio triangolare sulle stablecoin. Ogni singolo tempo di campionamento riporta infatti profitti negativi, talvolta anche di entità superiore (in valore assoluto) rispetto ai rilevamenti effettuati sulla triade di

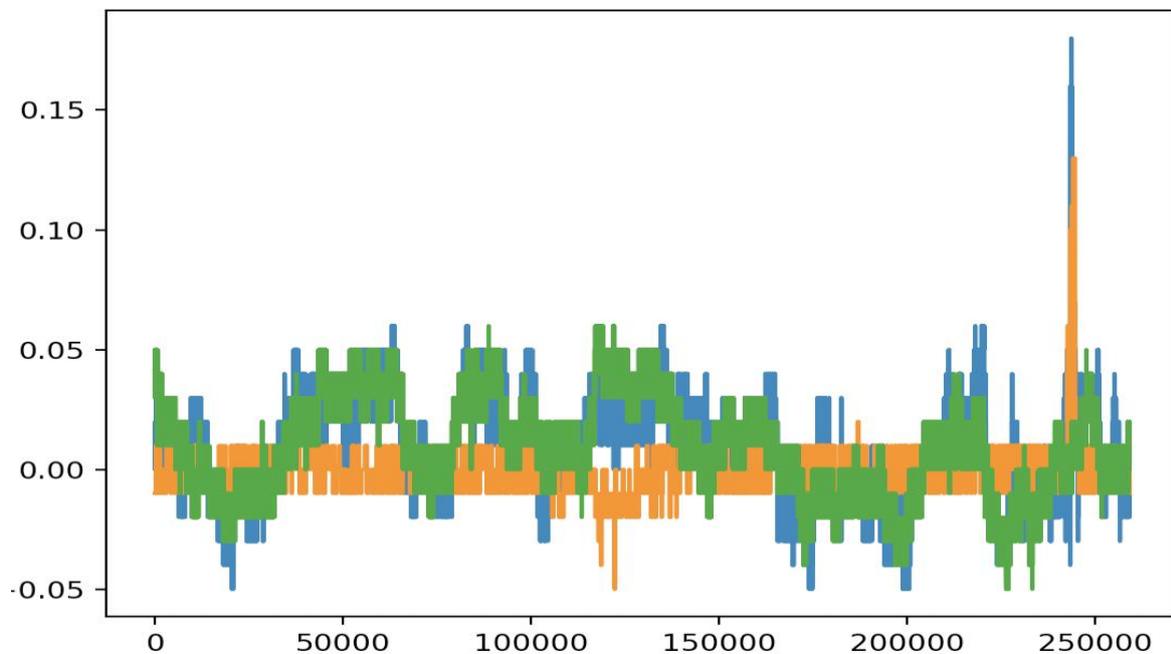
stablecoin del secondo esperimento. Il seguente grafico riassume la situazione appena descritta, seguito da un ulteriore diagramma volto a presentare le caratteristiche rilevate in termini di volatilità:

25. Profitti percentuali al netto delle commissioni con arbitraggio triangolare. Triade Usdc-Usdt-Busd



I profitti massimi registrati sono chiaramente valori negativi e di poco superiori alla soglia del -0,3% da considerare sul capitale investito. L'andamento dei movimenti è piuttosto a scalini, come nei casi precedenti con stablecoin. Inoltre, è possibile notare che in corrispondenza del tempo di campionamento 240.000 circa, vi è un picco di profitto negativo, per cui eseguire arbitraggio triangolare avrebbe portato una perdita del -0,45% sul capitale iniziale, valore persino superiore a quanto rilevato in precedenza.

26. Variazioni percentuali dei rapporti di cambio rispetto al prezzo delle ultime ventiquattro ore. Triade Usdc-Usdt-Busd



Per quanto riguarda il comportamento delle valute considerate in termini di volatilità, questo è perfettamente conforme alle caratteristiche già viste delle stablecoin. L'ampiezza massima delle oscillazioni registrate è decisamente minima, con un range dei valori tutto sommato non superiore al 0,2%. Un picco di volatilità appare in corrispondenza del tempo 240.000 per quanto riguarda il primo e il secondo rapporto di cambio e potrebbe costituire l'origine dei profitti negativi estremamente elevati che appaiono nella medesima zona del grafico numero 25.

3.3. Analisi complessiva e indici di correlazione

I tre esperimenti appena analizzati sembrano tutti avere qualcosa in comune, nonostante le differenze specifiche di ciascuna criptovaluta. Anche se la prima triade EASY-BTC-ETH è stata l'unica a riportare innumerevoli occasioni di arbitraggio triangolare, è stata osservata una certa consistenza nei risultati relativamente al legame tra volatilità e formazione di inefficienze di mercato. In tal senso, la relazione in questione è suggerita dal fatto che nessuna delle triadi di stablecoin considerate abbia mai generato divergenze di prezzo di entità tale da consentire arbitraggio. Ebbene, essendo queste criptovalute caratterizzate per definizione da una bassa volatilità dei prezzi, il loro comportamento nei risultati ottenuti potrebbe effettivamente derivare da questo. Ad ogni modo, seppure i dati ottenuti suggeriscano l'importanza di questo fattore, è necessario riconoscere che non è possibile affermare con certezza le modalità attraverso cui esso contribuisce alla formazione di inefficienze e conseguenti arbitraggi possibili. Ad esempio, considerando gli esperimenti eseguiti aventi ad oggetto le criptovalute a più alta volatilità, vi è stata decisamente un'alta variabilità dei risultati tra il primo e gli altri esperimenti. Tutte le triadi hanno riportato almeno una occasione profittevole di arbitraggio, ma l'entità e il numero di queste è stato decisamente superiore durante l'esecuzione del primo test. La diversità dei risultati ottenuti, quindi, suggerisce a sua volta che la volatilità non sia l'unico fattore a ricoprire un ruolo significativo nella possibilità di eseguire o meno arbitraggio triangolare: la liquidità dei mercati anche potrebbe costituire una componente importante. Quest'ultima misura potrebbe infatti influenzare il tempo di risposta dei mercati nell'esecuzione di correzioni di prezzo o incidere in altri modi in maniera rilevante nella quotazione dei prezzi.

L'analisi finora condotta può essere ulteriormente estesa considerando e rapportando tra loro le diverse serie di dati ottenute nel corso dei tre esperimenti eseguiti. A riguardo, è possibile fare riferimento a misure come l'indice di correlazione di Pearson al fine di rilevare come alcune proprietà dei rapporti di cambio, ad esempio il movimento dei prezzi, possano avere relazioni lineari tra essi. In particolare, tale misura è applicata rispettivamente alle due triadi di criptovalute considerate nel corso di ciascun esperimento e l'esito è presentato nella tabella sottostante:

27. Coefficiente di correlazione di Pearson. Triadi ad alta volatilità e triadi di stablecoin.

		Indice di correlazione
Primo esperimento	Primo rapporto di cambio	0,031
	Prodotto tra secondo e terzo rapporto di cambio	-0,124
	Primo rapporto di cambio	-0,167

Secondo esperimento	Prodotto tra secondo e terzo rapporto di cambio	-0,172
Terzo esperimento	Primo rapporto di cambio	-0,258
	Prodotto tra secondo e terzo rapporto di cambio	-0,310

Ricordando che ciascuna misura è applicata a una coppia di triadi, di cui una ad alta volatilità e un'altra formata da stablecoin, è interessante rilevare come quasi tutti gli indici di correlazione calcolati abbiano segno negativo. Nonostante i primi rapporti di cambio tra le triadi del primo esperimento sembrino essere non correlati, tutti gli altri valori suggeriscono una leggera correlazione negativa tra gli altri rapporti di cambio. Tale risultato è di fatto consistente con quanto abbiamo finora ottenuto e dedotto, in quanto ancora una volta le correlazioni suggeriscono che stablecoin e criptovalute ad alta volatilità tendono a muoversi in direzioni opposte e manifestano comportamenti ben differenti tra loro, privilegiando la scelta di quest'ultime nell'applicazione di tecniche di arbitraggio triangolare.

Conclusione, limiti e sviluppi futuri

Alla luce di quanto emerge dall'analisi dei dati ottenuti nel corso degli esperimenti e dal calcolo degli indici di correlazione di Pearson, possiamo affermare che la formazione di opportunità di arbitraggio triangolare nei mercati delle criptovalute è un fenomeno reale e rilevabile anche senza l'applicazione di mezzi particolarmente potenti. In particolare, le considerazioni più dettagliate effettuate sui comportamenti dimostrati dalle criptovalute suggeriscono che le stablecoin sono caratterizzate da un'efficienza di mercato elevata e non si prestano all'applicazione di tecniche di investimento basate su arbitraggio. Inoltre, tutte le misure analizzate sono apparse rilevanti nell'analisi, anche se con effetti differenti: al riguardo, la volatilità dei prezzi sembra essere la componente maggiormente coinvolta nella formazione di questi fenomeni. In tutte le triadi ad alta volatilità, infatti, sono state rilevate opportunità profittevoli di arbitraggio e ciò potrebbe essere sintomatico dell'esistenza di un nesso tra i due elementi. La liquidità dei mercati, considerata attraverso il "proxy" della misura *bid-ask spread*, anche potrebbe ricoprire un ruolo rilevante nella possibilità di eseguire arbitraggio triangolare sulle criptovalute. In tal senso, questo indice ha mostrato valori interessanti nel corso del secondo esperimento e ci ha consentito di motivare potenzialmente le differenze rilevate rispetto all'esperimento precedente. L'analisi condotta ha quindi avuto esito positivo e rappresenta un ottimo punto di partenza per la prosecuzione della stessa in futuro, in prospettiva del superamento dei limiti che la caratterizzano al momento. Il sistema informatico ideato nel corso di questa tesi è stato infatti volto esclusivamente alla rilevazione delle opportunità di arbitraggio triangolare, ma non all'esecuzione di queste. È quindi fondamentale riconoscere i limiti che derivano da questa circostanza, in quanto l'effettiva esecuzione di un ciclo di arbitraggio triangolare potrebbe introdurre altre problematiche nel corretto svolgimento dello stesso. Ad esempio, l'esistenza della latenza di rete costituisce un ulteriore fattore da tenere in considerazione al fine di calcolare le reali probabilità di successo che si hanno: un'opportunità appena rilevata potrebbe cessare di esistere prima che gli ordini necessari ad ottenere un profitto siano completamente eseguiti. Ulteriori complicazioni sono poi introdotte dalle stesse piattaforme di scambio, che guardano con sospetto all'idea che i loro utenti possano ottenere profitti privi di rischio mediante l'applicazione di tecniche simili. Binance, ad esempio, ha introdotto specifiche regole di trading all'interno di ciascun mercato, fissando in particolare un limite al numero di cifre decimali dell'ammontare di criptovaluta che si desidera acquistare o vendere. Ebbene, la presenza di regole di trading differenti tra i rapporti di cambio coinvolti nell'esecuzione di arbitraggio triangolare determina la rimanenza di uno "scarto" di criptovaluta in portafoglio, che non sarà convertito nella criptovaluta iniziale al termine del processo. Volendo rendere più chiaro quanto appena esposto, si ipotizzi di investire secondo la tecnica dell'arbitraggio triangolare sulle tre criptovalute Bitcoin, Ethereum e Binance coin. Dopo il primo trade, proseguendo con l'esempio e partendo da Bitcoin, si è spesa una determinata quantità di BTC per ottenere un certo ammontare di Ethereum e fin qui il processo non riporta problemi particolari. Tuttavia, nel

momento in cui è necessario convertire Ethereum nella terza criptovaluta, il diverso numero di decimali ammessi per specificare la quantità di Binance coin che si desidera acquistare renderà difficile spendere completamente l'importo di Ethereum che si possiede in portafoglio, creando quindi uno "scarto" dal processo di arbitraggio. La presenza di questo fattore potrebbe precludere la corretta esecuzione dell'arbitraggio, esponendo di fatto l'investitore a ulteriori rischi. Tutte le considerazioni fatte finora saranno inglobate in un futuro lavoro di ricerca specificamente volto allo sfruttamento reale di tali opportunità, nel tentativo di dimostrare in modo pratico la fattibilità di questa tecnica di investimento applicata ai mercati delle criptovalute.

Bibliografia e Sitografia

Francesco Ciclosi, Paolo Gaspari. *Bitcoin. Genesi e funzionamento di una criptovaluta*, Capitolo 1. Simple Editore, 2017.

Egor Zmaznev. *Bitcoin and Ethereum evolution*. Bachelor thesis, Centria University of Applied Sciences, 2017. Disponibile on-line: <https://core.ac.uk/download/pdf/161423052.pdf>.

Spade, Aleksander Bjørnå. *The impact of inflation, credit risk and corruption on local bitcoin prices: A panel data analysis*. Master thesis, University of Oslo, 2018. Disponibile on-line: <https://www.duo.uio.no/handle/10852/63156>.

Gina Pieters, Sofia Vivanco. *Financial regulations and price inconsistencies across Bitcoin markets*. Information Economics and Policy, Volume 39, 2017. Disponibile on-line: <https://doi.org/10.1016/j.infoecopol.2017.02.002>.

Vu Le Tran, Thomas Leirvik. *Efficiency in the markets of crypto-currencies*. Finance Research Letters, Volume 35, 2020. Disponibile on-line: <https://doi.org/10.1016/j.frl.2019.101382>.

Arjun Singh. *Are crypto-currency markets, efficient markets?* Health Economics eJournal, 2020. Disponibile on-line: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3670733>.

Konstantin Sokolov. *Ransomware activity and blockchain congestion*. Journal of Financial Economics, 2021. Disponibile on-line: <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2021.04.015>.

Robert Kissell. *Algorithmic Trading Methods 2nd Edition*, Chapter 2. Elsevier Science Publishing, 2020.

Binance Exchange. *Cos'è un algoritmo di consenso?* <https://academy.binance.com/it/articles/what-is-a-blockchain-consensus-algorithm>. Consultato il 06/05/2021.

European Central Bank. *Virtual currency schemes – a further analysis*. <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/virtualcurrencyschemesen.pdf>. Consultato il 06/05/2021.

Coingeek. *Tether is still lying to you*. <https://coingeek.com/tether-is-still-lying-to-you/>. Consultato il 12/05/2021.

Cryptoslate. *Coinbase delays Ethereum classic transactions after two 51 attacks.* <https://cryptoslate.com/coinbase-delays-ethereum-classic-transactions-after-two-51-attacks/>. Consultato il 16/05/2021.

CoinMarketCap. *Top crypto-currency spot exchanges.* <https://coinmarketcap.com/rankings/exchanges/>. Consultato il 18/05/2021.

CoinArbitrageBot. *Software on-line in grado di rilevare opportunità di arbitraggio tradizionale tra exchange di criptovalute.* <https://coinarbitragebot.com>. Consultato il 13/05/2021.