



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI ROMA TRE

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

Tesi Di Laurea Magistrale

**Progettazione di una blockchain scalabile
senza impatto su decentralizzazione e
sicurezza**

Laureando
Gianmaria Del Monte
Matricola 499829

Relatore
Prof. Maurizio Pizzonia

Anno Accademico 2019/2020

qui la dedica

Elenco delle cose da fare

■ inserire immagine di come un indirizzo bitcoin deriva da una chiave pubblica	2
■ cambiare stile tabella	3
■ fare figura blockchain bitcoin	9
■ definire blockchain pubbliche e private nell'introduzione a blockchain	9
■ forse definire hash power	9
■ inserire citazioni agli attacchi	9
■ fare sybil attack	9
■ immagine eclipse attack - tipo http://cs-people.bu.edu/heilman/eclipse/eclipseicon1.png	10
■ inserire riferimenti a trilemma	11
■ immagine trilemma	11
■ citazione pdf visa	12
■ citazione EOS	12
■ inserire figura mht	13
■ Inserire citazione: https://www.buybitcoinworldwide.com/mining/pools/	16
■ citazioni a pbft e altri...	17
■ inserire citazioni proof of stake	17
■ inserire immagine come https://miro.medium.com/max/1400/1*qKFBhPqJQpDBGGdiP39U3 in cui si inserisce una freccia rappresentate $\text{hash} / 2^{**}\text{hashlen}$ per far vedere la selezione di j	19
■ mettere titolo più evocativo	21
■ forse definire fork resolution quando si parla della fork nel capitolo 1	22
■ fare figura contenuto blocco	22
■ citare sistemi sharded con beacon per generazione numeri random .	25
■ da rivedere la frase, forse non si capisce bene	26
■ inserire immagine protocollo atomix	26
■ trovare citazione per l'1 attack	27

Introduzione

Introduzione

Indice

Introduzione	iv
1 Background	1
1.1 Bitcoin e Blockchain	1
1.2 Blockchain Trilemma	11
1.3 Strutture dati autenticate	12
1.4 Distributed Hash Table	15
2 Stato dell'arte	16
2.1 Algorand	16
2.2 Bernardini	21
2.3 Sharding	23
3 Una soluzione scalabile	28
3.1 Architettura	28
3.2 Analisi Multicast	28
3.3 Teoremi	28
Conclusione	29
Ringraziamenti	30
Bibliografia	31

Capitolo 1

Background

1.1 Bitcoin e Blockchain

Bitcoin è una tecnologia open-source per lo scambio di valute, denominate *bitcoin*, decentralizzato, presentato nel 2008 da una persona anonima, con lo pseudonimo di Satoshi Nakamoto [24]. A differenza di valute tradizionali che esistono fisicamente sotto forma di banconote, i bitcoin sono monete virtuali. Esse vengono scambiate tra i partecipanti alla rete Bitcoin che comunicano mediante il protocollo Bitcoin. Quindi con il termine Bitcoin, si indicano vari aspetti: la tecnologia in sé, lo stack protocollare di comunicazione adottato tra i partecipanti alla rete e la valuta scambiata. Bitcoin è una rete P2P, a cui partecipano nodi chiamati *peer*, in cui non esistono nodi speciali o più importanti di altri, come nei sistemi di pagamento elettronici tradizionali, in cui c'è un server centrale che gestisce tutti i pagamenti.

Il concetto fondamentale di Bitcoin è quello di *transazione*: una transazione trasferisce dei bitcoin da un conto sorgente ad un conto destinazione. Le transazioni possono essere create da qualsiasi peer della rete, che dimostri essere proprietario del conto sorgente e vengono inviate a tutti i nodi della rete. A differenza di pagamenti elettronici tradizionali, in cui un server centrale accetta o rifiuta le transazioni generate dai propri clienti, le transazioni sono accettate o rifiutate dalla rete Bitcoin secondo un meccanismo di *consenso distribuito*, utilizzando un approccio denominato *Proof-of-work*. Le transazioni accettate vengono quindi raggruppate in blocchi di transazioni, secondo un processo che richiede un'enorme quantità di potenza computazionale, che vengono aggiunti ai blocchi della *blockchain*. Questo processo è definito *mining* ed è svolto dai peer che ricoprono il ruolo di *miners*. Il mining ha due obiettivi:

1. creazione di bitcoin: ogni nodo che aggiunge un blocco alla blockchain

viene ricompensato dalla rete con una quantità di bitcoin fissata per ogni blocco e che decresce nel tempo;

2. validazione delle transazioni secondo le regole di consenso, assicurando che le transazioni siano non valide e non corrette.

Inizialmente il mining veniva effettuato da personal computer potenti. Man mano che i miner si aggiungevano alla rete Bitcoin, per cui diveniva sempre più difficile *minare* un blocco, si utilizzarono delle Graphical Processing Units, o GPU, come quelle utilizzate nei videogiochi. Tuttavia negli ultimi anni, a causa dell'elevato numero di miner presenti sulla rete, si utilizzano sistemi Application Specific Integrated Circuit, o ASIC, che implementano in hardware gli algoritmi di mining impiegati in Bitcoin per aumentare le performance. Sono state create anche soluzioni che hanno l'obiettivo di condividere la propria potenza computazionale in mining farm, o mining pool, con diversi partecipanti, in cui si suddividono i bitcoin guadagnati.

1.1.1 Wallet e indirizzi digitali

Un nodo per partecipare alla rete e scambiare i propri bitcoin, ha bisogno di una *chiave digitale* e di un *bitcoin address*. Un utente può generare un numero qualsiasi di chiavi digitali, che vengono memorizzate in un database locale, denominato *wallet*. La possibilità di generate autonomamente delle chiavi evidenzia la caratteristica fondamentale di Bitcoin, ovvero quella della decentralizzazione del controllo e del consenso, basate su prove crittografiche. In particolare, il modello di riferimento è quello della crittografia a chiave asimmetrica, in cui le chiavi digitali sono sottoforma di una coppia di chiavi, una *privata*, segreta, ed una *pubblica*, che deriva dalla chiave privata. È importante specificare che l'uso della crittografia non ha uno scopo di *confidenzialità*, d'altronde tutto in Bitcoin viaggia in chiaro, ma per *autenticità*, per dimostrare quindi chi si dice di essere, ovvero possessori di un certo conto. Secondo una relazione matematica, la chiave privata può essere usata per firmare un messaggio, o in questo caso una transazione, e la chiave pubblica, conosciuta da tutti i nodi della rete, per validare la firma del messaggio. Infatti, semplicisticamente, la chiave pubblica è usata per ricevere i bitcoin, mentre la chiave privata per spenderli, secondo delle modalità che saranno note nel proseguimento della lettura dei prossimi paragrafi, in cui si mostra la creazione di una transazione da parte di un client, e quindi le prove crittografiche che deve mostrare in modo da poter spendere i suoi bitcoin. In una transazione, l'indirizzo di destinazione è indicato da un *bitcoin address*, che deriva dalla chiave privata del client, mediante una serie di funzioni hash, come illustrato nella Figura ??.

inserire immagine di come un indirizzo bitcoin deriva da una chiave pubblica

associati al bitcoin address del nodo stesso, presenta la sua chiave pubblica e la firma di una certa stringa che dimostra che effettivamente lui è il proprietario di quella somma. In questo modo, chiunque nella rete, con queste due informazioni, può verificare che il nodo è realmente il proprietario di una certa quantità di bitcoin spesi in una transazione. È chiaro che chiunque in possesso della chiave privata di un nodo, può spendere a suo piacimento i bitcoin associati al relativo bitcoin address. Per questo, e anche per anonimizzare i creatori delle transazioni, un wallet genera ad ogni transazione una nuova coppia di chiavi.

Un wallet, come si già è detto in precedenza, è un client che memorizza le chiavi digitali di un nodo. Può essere: (1) *non-deterministico* e generare chiavi private in modo totalmente randomico, per cui il wallet è un database che memorizza queste chiavi private, e (2) *deterministico* e generare delle chiavi private a partire da un unico *seed*, che può essere anche una password digitata da un utente, per cui non ha bisogno di memorizzare alcuna chiave.

1.1.2 Transazioni

Le transazioni ricoprono un ruolo fondamentale in Bitcoin e nelle tecnologie di blockchain in generale. Le transazioni sono delle strutture dati che codificano un trasferimento di bitcoin da una o più sorgenti, denominate *input*, ad una o più destinazioni, denominate *output*. I campi di una transazione sono riportati nella Tabella 1.1.

cambiare
stile
tabella

Vediamo ora il ciclo di vita di una transazione. Ogni nodo nella rete può generare una transazione. Il nodo durante la creazione può essere online o offline. La transazione contiene una firma che dimostra che il nodo possiede i bitcoin specificati nell'input. La transazione viene quindi inviata in broadcast, raggiungendo tutti i nodi della rete. Questa viene messa nella lista delle transazioni in attesa, *pending transactions*, verificata da ogni nodo, e se è valida, ovvero è conforme alle regole di consenso, viene inclusa all'interno di un blocco insieme ad altre transazioni e aggiunta in coda alla blockchain.

Non esiste il concetto di conto relativo ad un account Bitcoin, per cui le transazioni formalmente non spostano valuta da un conto all'altro. In altre parole non esiste un database o una DHT come si vedrà in altre tecnologie blockchain presentate nei prossimi paragrafi, ma i bitcoin posseduti da un certo indirizzo derivano scandendo tutta la blockchain dal blocco iniziale al blocco attuale, considerando le *unspent transactions output*, o UTXO. Le UTXO sono i mattoncini con cui vengono generate le transazioni e sono quelle transazioni, registrate nella blockchain, a cui è associato un valore espresso in *satoshi*, dove 1 satoshi è equivalente a 10^{-8} bitcoin, e bloccate da un segreto di cui è a conoscenza solo il possessore. I satoshi corrispondono

Dimensione	Campo	Descrizione
4 byte	Versione	Specifica la versione del protocollo
1-9 byte variabile	Contatore input Input	Indica quanti input sono inclusi Lista di uno o più input
1-9 byte variabile	Contatore output Output	Indica quanti output sono inclusi Lista di uno o più output
4 byte	Time	Timestamp Unix

Tabella 1.1: I campi di una transazione.

ai centesimi presenti nelle valute tradizionali, come l'Euro o il Dollaro, solo che, a differenza di queste ultime in cui l'unità di base può essere suddivisa massimo in 100 parti, il bitcoin, può essere suddiviso fino a 100 milioni di parti.

Le UTXO sono generate a partire dall'output di una transazione, aggiunta in un blocco della blockchain, che non è stata ancora spesa in un'altra transazione. Gli output di una transazione consistono in due parti:

1. il valore espresso in satoshi da trasferire;
2. un *locking script*, che specifica il modo in cui i bitcoin possono essere sbloccati.

Per semplicità un locking script può essere pensato come l'indirizzo della destinazione, che diventerà, una volta che la transazione è stata accettata e quindi aggiunta in un blocco della blockchain, il proprietario della quantità di bitcoin indicati nella transazione stessa.

Gli input in una transazione sono riferimenti ad UTXO. In particolare specificano l'UTXO da utilizzare come sorgente tramite l'hash della transazione e l'indice dell'UTXO nella transazione considerata. Il creatore della transazione deve includere un *unlocking script* per ogni UTXO, contenente una firma che dimostri che il peer che ha creato la transazione è proprietario di quei bitcoin.

Molte transazioni includono delle *tasse*. Esse hanno un triplice scopo. Il primo è incentivare i miner a scegliere la propria transazione. I miner, oltre a ricevere un compenso per la creazione del blocco, ricevono le tasse di tutte le transazioni presenti nel blocco creato. Infatti, quando i miner provano a generare un blocco, scelgono dal proprio pool di transazioni in attesa quelle con le tasse più alte. Il secondo è quello di incentivare un peer ad essere un miner, in modo tale che la rete sia più sicura. Come si vedrà successivamente la sicurezza dell'intero sistema aumenta con l'aumentare dei

nodi che partecipano alla rete. L'ultimo, disincentiva nodi malevoli a *spam* di transazioni, perchè questi si troverebbero a spendere una piccola quota in tasse per ogni transazione generata. La quantità di tasse da pagare per una transazione normalmente dipende dalla dimensione in byte delle transazioni, in genere sui 370 byte, ma molto dipende dalle richieste di mercato. Al momento di scrittura di questa tesi, per una transazione di circa 370 byte composta da 2 input e 2 output, affinché sia accettata entro 2 blocchi, quindi entro 20 minuti, sono necessari 34k satoshi, pari a 3.20 USD (fonte [1]).

Come si è visto, nella struttura dati di una transazione non è presente un campo tasse esplicito. Le tasse sono infatti implicite e sono calcolate da ogni miner come la differenza tra la somma degli input e la somma degli output. In formule,

$$Tasse = \sum T_{in} - \sum T_{out}$$

dove T_{in} e T_{out} indicano l'input e l'output di una transazione T , rispettivamente.

Gli script sono il sistema con cui i peer Bitcoin validano le transazioni. Come si è detto in precedenza, ad ogni UTXO è associato un locking script, che rappresenta le condizioni che un nodo deve soddisfare per usare i bitcoin contenuti in esso. L'input di una transazione, riferito ad uno specifico UTXO, deve fornire un unlocking script, che contiene solitamente una firma che sblocca i fondi. Durante la validazione di una transazione, il peer esegue prima l'unlocking script e usa il suo output come input per il locking script. Se non ci sono errori e le condizioni nel locking script sono soddisfatte, ovvero l'intera operazione restituisce *true*, allora la transazione è considerata valida. Gli script sono scritti in un linguaggio stack-based, in cui sono presenti istruzioni aritmetico-logiche, istruzioni per il calcolo di hash, di verifiche di chiavi pubbliche, condizioni, ma non loop, il che lo rendono un linguaggio *Turing incompleto*. Questo fa sì che non è possibile creare un loop infinito e causare quindi un *Denial-of-Service*. Grazie ad un linguaggio di scripting è possibile scrivere un'infinità di script che danno modo di esprimere qualsiasi condizione. La più usata è certamente la *Pay to public key hash*, nota anche con P2PKH, che consente di specificare l'indirizzo Bitcoin a cui trasferire una certa somma di bitcoin. Ma è possibile creare fondi sbloccabili solo da più utenti insieme, o combinazioni più bizzarre o anche da una certa data in poi. Questi sono solo alcuni degli esempi che è possibile creare.

1.1.3 Mining

Il mining ha lo scopo principale di confermare le transazioni in attesa, generando un nuovo blocco da aggiungere alla blockchain, con un mecca-

nismo completamente decentralizzato, dove ogni nodo della rete, chiamati *miner*, possono contribuire al processo, senza che ci sia un'autorità centrale o un comitato speciale che gestisca tutta l'operazione. Circa ogni 10 minuti viene creato un nuovo blocco contenente le transazioni confermate da aggiungere in coda alla blockchain. Il mining ha anche lo scopo di generare dal nulla nuovi bitcoin, da qui il termine mining, che allude all'estrazione di pietre preziose dalle miniere, con una decrescita esponenziale nel tempo di creazione di valuta. Ogni nodo che riesce ad inserire un nuovo blocco alla blockchain, viene ricompensato con una quantità fissa di bitcoin, dimezzata ogni 210.000 blocchi (circa ogni 4 anni), partendo dalla quantità di 50 bitcoin a gennaio 2009. Dall'11 maggio 2020, infatti, la quantità di bitcoin ricevuta da ogni miner che riesce ad aggiungere un nuovo blocco alla blockchain è di 6,25 bitcoin. Usando questa formula, la ricompensa decresce esponenzialmente fino al 2140, quando circa 21 milioni di bitcoin (per l'esattezza 2.099.999.997.690.000 satoshi) saranno generati, approssimativamente dopo 13.44 milioni di blocchi. Un miner riceve come ricompensa anche le tasse delle transazioni che ha inserito nel nuovo blocco. Per cui dopo il 2140, i miner riceveranno come ricompensa solo le tasse presenti nelle transazioni. Quello della ricompensa è ovviamente un meccanismo atto ad incentivare la presenza di più miner in rete, che concorrono alla conferma di nuove transazioni, aumentando in questo modo la sicurezza dell'intera rete.

Finora si è parlato dei miner che cercano di creare un nuovo blocco da aggiungere alla blockchain, senza specificare il come. Vediamo quindi come i miner creano i nuovi blocchi della blockchain, secondo un meccanismo di consenso decentralizzato, che rappresenta il vero contributo di Satoshi Nakamoto alle reti P2P, secondo cui tutti i nodi presenti nella rete concordano su un certo stato della blockchain, senza un'autorità centrale che governi tutto. Il consenso è infatti raggiunto in maniera asincrona su tutta la rete, per cui ogni nodo può vedere lo stesso stato della blockchain. Quando una transazione viene generata da un qualsiasi peer della rete, essa viene inviata in broadcast a tutti i nodi della rete. Ogni nodo che riceve una transazione, prima di inviarla ai peer successivi, effettua numerosi controlli di validità, come la conformità alle regole sintattiche e regole di consenso, come verificare che la transazione non faccia *double spending*, ovvero la transazione spende più di una volta lo stesso UTXO, confrontando quindi gli input della transazione con gli output delle transazioni nei blocchi della blockchain e con quelle del pool delle transazioni, verificare che la somma degli input sia maggiore della somma degli output, verificare che l'output dell'unlocking script di ogni input sblocchi il locking script dell'UTXO a cui l'input si riferisce. Se una transazione passa tutti questi controlli, viene inserita nel pool delle transazioni del peer, uno spazio di memoria temporaneo in cui risiedono le transazioni

valide in attesa di essere inserite in un blocco, per poi essere inviata in broadcast ad ogni peer vicino. Ogni peer effettua tutti questi controlli. A questo punto, ogni miner sceglie le transazioni che formeranno il prossimo blocco, denominato *candidate block*, dal pool delle transazioni. I primi 50 kilobyte di un blocco sono formati da quelle transazioni ad *alta priorità*: la priorità viene calcolata in base all'età dell'UTXO che dovrà essere speso, ovvero in base alla profondità a cui si trova nella blockchain la transazione contenente l'UTXO rispetto al blocco corrente. La formula per il calcolo della priorità è la seguente:

$$Priorità = \frac{\sum_i value(T_i) * age(T_i)}{size(T)}$$

dove $value(T_i)$ è il valore dell'input i della transazione T espresso in satoshi, $age(T_i)$ è la profondità dell'UTXO a cui si riferisce l'input i della transazione nella blockchain, e $size(T)$ è la dimensione della transazione espressa in byte. Questo consente alle transazioni di essere inserite anche se non hanno alcuna tassa. Il resto del blocco, che ha una dimensione massima di 4 megabyte, viene riempito dalle transazioni presenti nel pool che hanno una tassa maggiore. Questo perché tutte le tasse presenti nelle transazioni vengono ricevute dal nodo miner che ha creato il blocco. Infine, la prima transazione che viene inserita nel blocco è quella denominata *coinbase*, una transazione speciale che non contiene alcun input, il cui output contiene come valore la somma delle tasse presenti nelle altre transazioni del blocco e la ricompensa per il blocco creato e avete come indirizzo destinazione quello del nodo miner. La *coinbase* rappresenta quindi la transazione tramite la quale il nodo miner riceve la sua ricompensa per il lavoro svolto.

Vediamo ora come funziona il consenso decentralizzato creato da Satoshi Nakamoto, che rappresenta il suo più grande contributo alle reti P2P. Una volta costruito il blocco, esso deve essere *minato*, ovvero si deve trovare la soluzione all'algoritmo *Proof-of-work* che rende valido il blocco, in altre parole tutti i nodi della rete lo riconoscono come valido. Esso si basa sugli *hash crittografici*, denominati in seguito più semplicemente con hash. Un'hash è una funzione che dato un input di una qualsiasi dimensione, produce una stringa di output di dimensioni fisse. Essa è semplice da calcolare, ma difficile da un punto di vista computazionale invertire, ovvero dato un hash h , calcolare l'input S tale che $h = hash(S)$. Ad esempio, la funzione SHA256, utilizzata in Bitcoin, produce un output di 256 bit. Inoltre, un'altra proprietà fondamentale è che a fronte dello stesso input si produce lo stesso output, perciò l'hash è una funzione deterministica. Secondo Proof-of-work un miner deve trovare un blocco, tale che l'hash del suo header sia minore di una certa soglia, denominata *target*. Questo è trovato variando una parte

dell'header del blocco denominato *nounce*, e viene inserito nell'header del blocco come prova del lavoro svolto. Poiché gli hash non seguono un certo pattern, l'unico modo di trovare un nounce che faccia assumere all'header del blocco un valore minore del target è quello di tentare tutte le combinazioni. Essendo l'hash facile da calcolare, verificare il lavoro svolto da un miner è un compito semplice. Il primo nodo miner che riesce a trovare una soluzione a questo puzzle crittografico, è il vincitore di questa competizione ed invia in broadcast il blocco minato come prova del lavoro svolto. Il target determina la difficoltà nel trovare un blocco che soddisfi le condizioni di consenso, in quanto questo determina un aumento esponenziale del numero di tentativi da fare per risolvere il problema. Poiché la potenza computazionale aumenta nel tempo, e quindi il numero di hash calcolabili nell'unità di tempo, c'è un meccanismo che reimposta il target ogni 2016 blocchi, circa ogni 2 settimane, in modo tale che in media un blocco sia minato in 10 minuti. Il miner che mina il blocco k tale che k sia divisibile per 2016, determina il nuovo target sulla base del tempo impiegato a trovare gli ultimi 2016 blocchi: se il tempo è maggiore di 20160 minuti aumenta il target, diminuendo quindi la complessità, se è minore diminuisce il target, aumentando la complessità del problema. Quando gli altri miner ricevono il blocco minato da un altro miner, smettono di minare il proprio blocco e cominciano a lavorare sul successivo, utilizzando lo stesso approccio appena descritto.

Può capitare che due miner nella rete trovino riescano a minare quasi contemporaneamente un blocco, per cui i vicini potrebbero lavorare a loro volta su viste della blockchain differenti. Questo genera nella blockchain delle *fork*, per cui i nodi nella rete hanno visioni differenti della blockchain stessa. Questo problema viene risolto da ogni nodo scegliendo il ramo più lungo, in questo modo si converge ad una visione comune della blockchain.

1.1.4 Blockchain

La blockchain è il registro contenente tutte le transazioni accettate, condivisa da tutti i nodi della rete. Essa è una lista semplicemente collegata i cui nodi sono i blocchi. I blocchi sono connessi al contrario, per cui ogni blocco punta al nodo precedente. Ogni blocco è identificato da un hash crittografico, calcolato con l'algoritmo SHA256 sull'header del blocco stesso. Ogni blocco punta al nodo precedente specificandone l'hash. La sequenza di blocchi crea quindi una catena, fino ad arrivare al primo blocco creato, denominato *genesis block*, creato nel 2009, e direttamente codificato nel client software di Bitcoin, per cui conosciuto da tutti i nodi della rete.

Un blocco è un contenitore formato da una sezione metadati, composto dalla dimensione del blocco stesso, da un block header di 80 byte e dalla lista

di transazioni validate. Il block header è composto dall'hash del precedente blocco, dal *root-hash* del Merkle Tree formato dalle transazioni contenute nel blocco, un *timestamp*, ovvero il tempo di creazione approssimato del blocco, un *difficulty target* e un *nounce*, utilizzati nella fase di mining. La figura ?? mostra un esempio di blockchain.

1.1.5 Attacchi noti

51% attack Qualsiasi tecnologia di blockchain per sua natura si basa su un meccanismo di consenso distribuito che garantisce una mutua fiducia. Se nelle blockchain basate su Proof-of-work un miner possiede più del 50% dell'hash power, può sfruttare l'attacco 51% per ottenere il 100% delle ricompense dal mining, poichè riuscirebbe a creare catene di blocchi sicuramente più lunghe di qualsiasi altro miner, per fare un attacco *double spending*, in cui si utilizza più volte lo stesso importo per i pagamenti, eliminare dalla blockchain gli ultimi blocchi confermati ed eventualmente corrompere la blockchain stessa. In una tecnologia come Bitcoin che incentiva economicamente i nodi a diventare miner e che ha raggiunto nel tempo un numero di nodi elevato, e quindi un grande hash power, un simile attacco è molto improbabile. Sicuramente non sono escluse da questo attacco le blockchain di piccole dimensioni, che hanno un hash power di gran lunga più piccolo di quello di Bitcoin: esempi di crypto-valute che sono state vittime del 51% attack sono Monacoin, Bitcoin Gold e ZenCash. In realtà l'avvento delle mining pool in Bitcoin, in cui più miner mettono a disposizione la propria potenza computazionale al servizio di un gruppo di più miner che divide il compenso in modo proporzionale all'hash power condiviso, apre la possibilità ad un'organizzazione del genere ad un 51% attack se la somma totale dell'hash power di tutti i nodi iscritti supera il 50% dell'intero hash power della rete. È stato il caso di *ghash.io*, in cui, dopo aver raggiunto nel gennaio del 2014 il 42% dell'intera potenza computazionale della rete Bitcoin, molti miner si sono disiscritti dal pool e il pool stesso rilasciò una dichiarazione in cui rassicurava la comunità Bitcoin di evitare di raggiungere la soglia del 51% [12].

fare figura blockchain bitcoin

definire blockchain pubbliche e private nell'introduzione a blockchain

forse definire hash power

inserire citazioni agli attacchi

Sybil attack

fare sybil attack

Eclipse attack L'eclipse attack è un attacco perpetrato ai danni di una singola vittima. Un attaccante, che controlla un gran numero di nodi, ad esempio una botnet, può isolare un nodo del resto della blockchain. Questo gli consente di mostrare una blockchain differente da quella che è in realtà e di sfruttare la potenza computazionale della vittima per i suoi comportamenti

malevoli. Heilman et al. [13], mostrano che è possibile utilizzare un attacco eclipse come base per altri attacchi:

- **Engineering block races:** Quando due miner riescono a minare un blocco nello stesso momento, solo uno entra a far parte della blockchain, mentre l'altro diventa un blocco *orfano*, e il miner che ha minato questo blocco non riceve alcuna ricompensa. Un attaccante che eclissa più di un miner, accumula i blocchi scoperti dai miner attaccati, per poi rilasciarli alla rete solo quando un miner non attaccato scopre un blocco. In questo modo i blocchi minati dalle vittime diventano orfani, e come risultato sia ha uno spreco delle risorse degli attaccati.
- **Splitting mining power:** Si eclissa un certo numero di miner in modo da eliminare dalla rete dell'hash power e consentire più facilmente un 51% attack.
- **Selfish mining:** Questo attacco consente ad un attaccante di sprecare risorse a miner vittime o di ottenere una ricompensa maggiore. L'attaccante mantiene private una lista di blocchi che ha minato ed elimina i blocchi minati dai miner eclissati che competono con i blocchi che lui ha minato. Nello stesso tempo sfrutta la potenza computazionale dei nodi vittime tentando di creare un fork più grande rispetto alla catena di blocchi della vera blockchain.
- **0-confirmation double spend:** Si ha nel caso di *0-confirmation transaction*, dove un venditore spedisce, nel caso di vendita online, o rilascia, nel caso di vendita in un negozio fisico, un bene ad un cliente prima che questa sia confermata in un blocco. Questo accade quando non si vuole attendere i circa 10 minuti di conferma di una transazione. L'attaccante effettua un eclipse attack al venditore, inviandogli una transazione T per comprare i beni ed una transazione T' al resto della rete, facendo un *double spending*. Il mercante rilascia il prodotto al cliente malevolo e poiché è eclissato non può inviare T al resto della rete. Quindi l'attaccante ottiene un prodotto senza aver pagato.
- **N-confirmation double spend:** In questo caso, a differenza del precedente, un mercante rilascia un bene al suo cliente solo se la transazione si trova almeno a profondità $N - 1$ nella blockchain. L'attaccante invia la transazione ai nodi eclissati, che la inglobano in una vista *vecchia* della blockchain, tra cui è presente anche il commerciante. L'attaccante, dopo aver ricevuto il prodotto, mostra alle vittime eclissate la vera blockchain, aggiornata nel frattempo dai nodi non eclissati. La

immagine
eclipse
attack
- tipo
<http://cs-people.bu.edu/heilman/eclipse>

blockchain vista dai nodi eclissati diventa orfana, poichè è un fork più corto rispetto alla vista della blockchain del resto della rete, e la transazione creata dall'attaccante viene quindi eliminata. Anche in questo caso, l'attaccante ottiene un prodotto senza aver pagato.

1.2 Blockchain Trilemma

Sebbene il *blockchain trilemma* influisca sull'analisi e progettazione di tecnologie di blockchain, non è presente una definizione formale in letteratura, anche se è citato in numerosi lavori, come ??? . Il termine [35] fu coniato da Vitalik Buterin, creatore di *Ethereum*, una blockchain basata su Proof-of-work, individuando le tre caratteristiche che una blockchain deve avere per allargare i propri confini a livello globale: *decentralizzazione*, *sicurezza* e *scalabilità*. Il *trilemma* afferma che bisogna rinunciare ad almeno un'alternativa. Il blockchain trilemma si può rappresentare con un triangolo, come in Figura ??, ai cui vertici ci sono le tre proprietà e in cui l'ottimo è il centro.

inserire
riferi-
menti a
trilem-
ma

Vediamo in dettaglio i tre elementi fondamentali del trilemma.

immagine
trilem-
ma

Decentralizzazione Per decentralizzazione si intende il fatto che le transazioni siano validate e confermate da un gruppo di nodi e non da un'autorità centrale o un comitato speciale, come accade in sistemi tradizionali, per cui le decisioni sono ottenute da un consenso distribuito. Quindi non è necessario riporre fiducia su una terza parte durante una qualsiasi operazione. In altre parole, le decisioni sono ottenute democraticamente da tutti i partecipanti alla rete, ed ogni proposta di cambiamento nel protocollo può essere accettata se più del 50% dei partecipanti è favorevole. Un esempio è Bitcoin Cash, un fork di Bitcoin avvenuto il 1 agosto 2017 [14], in cui si portò ad 8 MB la dimensione massima di un blocco, in modo da consentire un numero maggiore di transazioni accettate. È chiaro che una decentralizzazione ha come conseguenza una *qualità* di decisione più alta rispetto ad una presa da un'autorità centrale, poiché la conferma prima di raggiungere il consenso è ottenuta da più nodi. Il trade-off è quindi la velocità di conferma: se una transazioni richiede una conferma da più partecipanti la velocità è minore di una decisione presa da un'autorità centrale.

Scalabilità La scalabilità è la proprietà che consente realmente un'adozione a livello globale. Essa si riferisce al fatto che un sistema possa adattarsi ad un incremento di carico. Ad esempio, le due tecnologie di blockchain ad oggi più utilizzate, Bitcoin e Ethereum, possono gestire un carico massimo di

7 e 12 TPS¹ al contrario di Visa, che può arrivare a 65.000 TPS. EOS, una blockchain progettata per essere scalabile, ha un throughput dichiarato di circa 2000 TPS, ma promette di poter processare milioni di transazioni in futuro, tuttavia ad un prezzo: la decentralizzazione.

citazione
pdf visacitazione
EOS

Sicurezza La sicurezza deve essere il requisito fondamentale in una blockchain. Se la sicurezza è povera o del tutto assente, un attaccante può spendere più volte la stessa quantità di denaro, *double spending*, arricchendo se stesso a scapito di altri ed arrivare a modificare lo stato della blockchain, che per sua natura è immutabile. Questo può succedere ad esempio nel 51% attack, presentato nel Paragrafo 1.1.5.

È importante notare che il blockchain trilemma non è un teorema, come lo è il CAP theorem, un teorema fondamentale nell'ambito dei sistemi distribuiti. Esso sottolinea la difficoltà nel creare un sistema decentralizzato, sicuro e scalabile. Le blockchain sono ancora tecnologie giovani, poco mature per cui c'è ancora tanta strada da fare, in grado di migliorare ciò che già è stato fatto. Bitcoin, ad esempio, è una blockchain altamente sicura e decentralizzata, ma non scalabile: il numero di transazioni massime supportate è infatti di 7 TPS. Sebbene, non sarà utilizzabile a livello globale come unica valuta, rappresenta sicuramente un punto di svolta, dimostrando che una criptovaluta digitale in un sistema P2P, in cui non è necessario riporre la fiducia su un'autorità centrale o si è soggetti a regole imposte dalla medesima, è possibile e attuabile in pratica.

1.3 Strutture dati autenticate

Come si è visto nella Paragrafo 1.1.4, ogni block header della blockchain contiene un riassunto di tutte le transazioni presenti nel blocco, denominato *root-hash*, ed ottenuto da un Merkle Tree (MHT). Esso fa parte della famiglia delle *strutture dati autenticate*.

Una struttura dati autenticata (ADS) è una struttura dati contenente valori che permette una verifica di integrità, ovvero un client fidato può verificare l'autenticità di una risposta ottenuta da un server non fidato mediante una prova, denominata *proof*. In altre parole, le operazioni effettuate da una parte esterna non fidata, denominato *prover*, possono essere verificate efficientemente da un client, il *verifier*.

¹TPS = transazioni al secondo

Supponiamo di trovarci nel seguente scenario. Un client ha bisogno di memorizzare una certa quantità di dati che eccede le sue disponibilità di memorizzazione fisica. Può memorizzare i suoi dati su un server esterno che ha una grande capacità di memorizzazione, come ad esempio un servizio di cloud storage. Il client vuole essere sicuro che la versione dei file che memorizza in cloud sia l'ultima e che nessuno possa modificare il contenuto dei suoi file. Questo problema può essere risolto mediante le strutture dati autenticate, senza che il client memorizzi l'intera struttura dati e senza memorizzare l'hash di ogni singolo file. In quest'ultimo caso infatti dovrebbe memorizzare un numero di hash lineare con il numero di file che ha memorizzato in cloud. Applicazioni del genere sono molto frequenti, anche nel caso di Bitcoin, in cui esistono client *leggeri*, i cosiddetti *thin client*, che memorizzano solo l'header dei blocchi della blockchain, mentre tutte le transazioni contenute nei blocchi sono memorizzati su un server esterno. Una realizzazione di un protocollo efficiente che fa uso di ADS si può trovare in [26] e [9].

Un'implementazione efficiente di un'ADS è il Merkle Tree, utilizzato per la realizzazione di dizionari autenticati. Dato un insieme di elementi V , il Merkle Tree T è un albero binario completo bilanciato avente come foglie gli hash degli elementi in V , mentre i nodi intermedi sono il risultato dell'hash della concatenazione dei nodi figli. Il root di T contiene il *root-hash* di T . La Figura ?? mostra un esempio di Merkle Tree. Come ogni ADS, ad una richiesta $T.get(k)$, dove si richiede il valore v associato alla chiave k , si ottiene anche una *proof* associata a v . La proof è una struttura dati utile a verificare l'integrità del valore a cui è associata. In particolare, in un Merkle Tree la proof si ottiene dall'Algoritmo 1.1.

inserire
figura
mht

La Figura ?? mostra un esempio di proof, rappresentata con linee tratteggiate per il valore ???. Considerato il cammino p da ??? al root, rappresentato in figura con una linea punteggiata, si selezionano i nodi ???, fratelli dei nodi percorsi in p . La proof risultante è quindi la lista di coppie $[(???, ???)]$.

Un Merkle Tree utilizza uno spazio $O(|V|)$ e una dimensione della proof, un tempo per una query ed un tempo di verifica pari a $O(\log |V|)$.

Un client possiede solo una copia locale del root-hash, mentre i dati sono su un server non fidato, ad esempio su cloud. Per verificare la veridicità del valore v associato alla chiave k ottenuto a seguito di una richiesta di $get(k)$ al server, il client calcola il root-hash dalla proof associata a v e da v stesso, con l'Algoritmo 1.2.

La tecnica della *potatura* [27], o *pruning*, consente di ridurre lo spazio occupato da un Merkle Tree, qualora non sia necessario rispondere a query su un certo insieme di chiavi, preservando la capacità di generare proof per le chiavi necessarie. Si ottiene rimuovendo le foglie non necessarie e lasciando

Algoritmo 1.1 Calcolo della proof in un MHT T associata alla chiave k

```

procedure GET_PROOF( $k$ )
  Sia  $n$  la foglia di  $T$  associato a  $k$ 
  Sia  $p$  il cammino da  $v$  al root
   $P \leftarrow []$ 
  while  $n.parent \neq T.root$  do
    if  $n.parent.right = n$  then                                      $\triangleright n$  è un figlio destro
       $Tag \leftarrow R$ 
       $h_f \leftarrow n.parent.left.value$ 
    else                                                              $\triangleright n$  è un figlio sinistro
       $Tag \leftarrow L$ 
       $h_f \leftarrow n.parent.right.value$ 
     $P.APPEND((Tag, h_f))$ 
     $n \leftarrow n.parent$ 
  return  $P$ 

```

Algoritmo 1.2 Calcolo del root hash dalla proof

```

procedure ROTHASH_FROM_PROOF( $p, v$ )
   $h_1 = hash(v)$ 
   $L = len(p)$ 
  for  $i \leftarrow 1$  to  $L$  do
     $Tag, h_{p_i} \leftarrow p[i]$ 
    if  $Tag = R$  then
       $h_{i+1} \leftarrow hash(h_{p_i} \oplus h_i)$             $\triangleright \oplus$ : concatenazione degli hash
    else
       $h_{i+1} \leftarrow hash(h_i \oplus h_{p_i})$ 
  return  $h_L$ 

```

gli hash delle radici dei sotto alberi al posto di esse. La Figura ?? mostra un esempio di MHT potato.

1.4 Distributed Hash Table

Una Distributed Hash Table (DHT) è un sistema di storage distribuito in grado di memorizzare dati sotto forma di coppie chiave-valore, in modo simile alle *hash table*. Sono costruite su un *keyspace*, ovvero l'insieme di tutte le chiavi, distribuite tra i nodi partecipanti. Se un nodo n memorizza il valore v associato alla chiave k , si dice che n è *autorità* per k . Molte implementazioni di DHT [20, 28, 29, 38] permettono di effettuare un *lookup*, l'operazione che consente di individuare il peer che detiene una certa risorsa, in modo efficiente, con un numero di scambi di messaggi e memoria dei peer sublineare, spesso $O(\log N)$, con N il numero totale dei nodi della DHT.

Una DHT presenta le seguenti proprietà:

- ✓ **Decentralizzazione:** il sistema non ha alcun autorità centrale, ma ogni nodo è in grado di effettuare il lookup di una risorsa;
- ✓ **Scalabilità:** l'overhead di comunicazione e memoria dei peer pari a $O(\log N)$;
- ✓ **Tolleranza ai guasti:** il sistema è sempre disponibile anche se molti nodi si sconnettono o si guastano;
- ✓ **Efficacia:** una risorsa è sempre reperita se presente nel sistema.
- ✗ **Correttezza:** non esiste alcun modo per verificare che il dato ottenuto sia l'ultima versione memorizzata, o sia stata modificata dal peer autorità.

Per garantire la correttezza, si utilizzano le DHT *autenticate* [32, 3], in cui ogni nodo n memorizza anche un'ADS potato, avente come foglie solo quelle per cui n è autorità.

Capitolo 2

Stato dell'arte

2.1 Algorand

Algorand [11, 7] è una nuova criptovaluta, progettata da Silvio Micali, professore del MIT e vincitore del premio Turing nel 2012, che possiede le tre proprietà di decentralizzazione, sicurezza e scalabilità descritte nel blockchain trilemma: è infatti in grado di confermare le nuove transazioni nell'ordine di un minuto scalando su numerosi utenti. Algorand, a differenza di Bitcoin e tecnologie che ereditando le sue caratteristiche, non usa Proof-of-Work. In Bitcoin ogni blocco viene aggiunto alla blockchain ogni 10 minuti, tramite una gara crittografica molto costosa in termini di potenza computazionale, e di conseguenza di costo di elettricità, il che si traduce in uno spreco di risorse per quasi tutti i nodi della rete che non hanno trovato la soluzione al puzzle crittografico. Questa soluzione chiaramente non scala: un blocco ogni 10 minuti a livello globale non è sufficiente per gestire il gran numero di transazioni che verrebbero generate. Proof-of-Work, l'algoritmo progettato per essere decentralizzato, a causa della sua natura dispendiosa, si sta trasformando in un meccanismo centralizzato: i miner oggi sono dei professionisti, che investono una grande quantità di denaro in hardware specializzato, e si riuniscono in pool di grandi dimensioni, in modo tale da dividere il lavoro e l'eventuale ricompensa ottenuta. Perciò qualsiasi utente con il suo pc domestico, entrando nella rete Bitcoin (o simili), spreca solamente una grande quantità di energia elettrica senza alcun ritorno economico. Si stima infatti, che l'81% del hash power sia detenuto dalle mining pool della Cina: se queste si unissero potrebbero modificare completamente il contenuto della blockchain e prendere qualsiasi decisione nella conferma di transazioni, proprio come un sistema centralizzato. Infine, un altro svantaggio di Proof-of-Work è l'esistenza inevitabile di fork. Infatti, poiché due o più miner possono risolvere nello stesso

Inserire
cita-
zione:
<https://www.buybitcoinworld.com>

<https://www.buybitcoinworld.com>

momento il puzzle crittografico, il prossimo blocco candidato non unico. I miner cominceranno a minare il blocco successivo sulla base di uno dei due precedenti blocchi, in base a ciò che vedono per primo a causa della latenza su rete. Questo porta alla creazione di catene alternative, che prima o poi verranno risolte, causando una dissoluzione dei blocchi delle catene eliminate e di conseguenza un annullamento delle transazioni, generando continuamente incertezza. Bitcoin, infatti, considera confermata una transazione quando si trova ad almeno a profondità 6. È chiaro che il tempo di conferma di una transazione non è più di soli 10 minuti, ma di un'ora. Quindi Proof-of-Work può essere riassunto in tre parole: dispendioso, incerto ed incredibilmente lento.

Algorand utilizza un protocollo per il problema dei generali bizantini denominato BA^* , in grado di scalare a molti utenti, raggiungendo il consenso su un blocco con una bassa latenza e senza fork, evitando attacchi Sybil, che influenza qualsiasi altro protocollo di consenso bizantino, come ???, e resiliente ad attacchi di tipo denial-of-service, continuando ad operare anche se alcuni utenti sono stati disconnessi da un attaccante.

citazioni
a pbft e
altri...

Algorand affronta questi obiettivi usando numerose tecniche:

- **Utenti pesati:** ad ogni utente è assegnato un peso in base ai soldi che possiede, per prevenire attacchi Sybil, ispirandosi agli approcci Proof-of-Stake, un'alternativa all'approccio Proof-of-Work. La differenza fondamentale tra le criptovalute basate su Proof-of-Stake ed Algorand è che, mentre nel primo chi tenta di creare un fork viene punito perdendo dei soldi che aveva bloccato precedentemente su un fondo, nel secondo i pesi sono solo utilizzati per prevenire attacchi Sybil. BA^* garantisce un funzionamento corretto se il totale dei soldi posseduti dagli utenti onesti è maggiore dei $2/3$ dei soldi totali.
- **Comitati:** il consenso è ottenuto in maniera scalabile da BA^* tramite dei comitati, un sottoinsieme degli utenti selezionato ad ogni round in modo randomico ed in base al proprio peso.
- **Lotteria crittografica:** per prevenire tentativi di corruzione o attacchi DoS ai membri di un comitato, questi vengono selezionati in modo privato e senza alcun scambio di messaggio tra i partecipanti alla rete. Ogni utente è in grado di sapere se fa parte di un comitato, utilizzando una funzione, la Verifiable Random Function (VRF) [23]. In questo modo un attaccante non può conoscere chi farà parte del prossimo comitato.
- **Rotazione dei membri:** Un attaccante può attaccare un membro di un comitato quando questo comunica con gli altri membri. Tuttavia

inserire
citazioni
proof of
stake

$BA\star$ non ha bisogno di alcun stato per funzionare, se non della chiave privata degli utenti, per cui qualsiasi altro utente può essere selezionato e partecipare in ogni passo del protocollo.

In Algorand ogni utente deve possedere una chiave privata e la corrispondente chiave pubblica. La blockchain mantiene le transazioni confermate racchiuse in blocchi semplicemente connessi, con un riferimento all'hash del blocco precedente. Le transazioni sono dei trasferimenti di denaro, espressi in unità di Algorand, da un utente all'altro, ma possono contenere anche *smart contract* nelle versioni più recenti [21, 22]. Inoltre, tutte le operazioni sono svolte dai client presenti sulla rete in modo asincrono con una suddivisione del tempo in round, al termine del quale si aggiunge un nuovo blocco alla blockchain. La comunicazione è basata sul protocollo *gossip* [15], un protocollo di comunicazione usato nelle reti P2P, simile al broadcast, in cui ogni utente seleziona randomicamente i peer vicini a cui inviare un messaggio. Ogni peer effettua la validazione del messaggio che ha ricevuto, verificandone la firma prima di inoltrarlo nuovamente. Ogni utente che genera una nuova transazione, la invia alla rete mediante il protocollo gossip, ed ogni peer che la riceve, la valida e se è ben formata la aggiunge alla lista delle transazioni in attesa. Mediante $BA\star$, Algorand conferma le transazioni in attesa.

Ogni round è diviso in due fasi: (1) proposta del nuovo blocco e (2) conferma del blocco mediante $BA\star$. In ogni fase viene eseguita una *lotteria crittografica* in cui si selezionano i peer, in modo randomico e sulla base dei loro pesi, che si occuperanno di uno specifico compito all'interno della fase stessa. Ad ogni utente i è infatti assegnato un peso w_i sulla base dei soldi che possiede nel proprio conto. Se $W = \sum_i w_i$ è la somma di tutti i pesi dell'utente, la probabilità che il peer i è selezionato è proporzionale ad w_i/W . La selezione è basata sulle Verifiable Random Function (VRF) [23], una funzione che genera un *hash* ed una *proof*. L'*hash* è un numero pseudo-randomico basato su un *seed*, conosciuto da tutta la rete, e su una chiave privata sk , mentre la *proof* permette di verificare l'hash data la chiave pubblica pk associata ad sk . Il sorteggio crittografico è basato sull'Algoritmo 2.1. La selezione di ogni utente è basata sul suo peso w , e per questo un utente può essere selezionato più di una volta: infatti la variabile j restituita dalla funzione indica quanti *sotto-utenti* l'utente rappresenta. Ogni unità di Algorand rappresenta un differente *sotto-utente*. Se un utente i possiede w_i unità di Algorand, i possiede w_i *sotto-utenti* ognuno avente probabilità $p = \frac{\tau}{W}$ di essere selezionato. τ rappresenta il numero atteso di utenti selezionati per un certo ruolo *role*, facenti parte dello stesso comitato. Il ruolo può essere ad esempio quello di proposta del prossimo blocco, oppure di un

Algoritmo 2.1 L'algoritmo utilizzato per la lotteria crittografica in Algorand

```

procedure SORTITION( $sk, seed, \tau, role, w, W$ )
   $\langle hash, \pi \rangle \leftarrow \text{VRF}_{sk}(seed \oplus role)$ 
   $p \leftarrow \frac{\tau}{W}$ 
   $j \leftarrow 0$ 
  while  $\frac{hash}{2^{hashlen}} \notin [\sum_{k=0}^j B(k; w, p), \sum_{k=0}^{j+1} B(k; w, p)]$  do
     $j \leftarrow j + 1$ 
  return  $\langle hash, \pi, j \rangle$ 

```

comitato di conferma di un blocco. La probabilità che esattamente k degli w *sotto-utenti* vengano selezionati è data dalla distribuzione binomiale, $B(k; w, p) = \binom{w}{k} p^k (1-p)^{w-k}$, dove $\sum_{k=0}^w B(k; w, p) = 1$. L'*hash* determina (grazie al ciclo *while*) il numero di *sotto-utenti* j selezionati per un utente i : infatti nel ciclo *while* si seleziona il segmento di lunghezza $B(j; w, p)$ (a cui corrispondono esattamente j *sotto-utenti* selezionati tra i w disponibili) in cui ricade il valore $\frac{hash}{2^{hashlen}}$, compreso tra 0 e 1, in cui *hashlen* è la lunghezza in bit dell'*hash*. La Figura ?? visualizza la selezione di j . Poiché $B(k_1; n_1, p) + B(k_2; n_2, p) = B(k_1 + k_2; n_1 + n_2, p)$, un attacco in cui si divide una somma di denaro tra più Sybil non ha alcun effetto. Un attaccante per avere il massimo numero j di *sotto-utenti* che rappresenta, deve sperare di ottenere un *hash* elevato, che non può però decidere arbitrariamente poiché deve dimostrare di averlo ottenuto. L'unico modo è quello di tentare con più chiavi private sk , ma il protocollo prevede che sk sia generata prima della generazione del *seed*. Il seed per il round r viene generato da ogni utente u selezionato per la proposta del blocco, come $\langle seed_r, \pi \rangle \leftarrow \text{VRF}_{sk_u}(seed_{r-1} \oplus r)$, ed incluso nella proposta di blocco. In questo modo quando al termine del round $r - 1$ il blocco viene accettato, tutta la rete conosce il nuovo seed. Se il seed non è valido, o si raggiunge il consenso sul blocco vuoto (ovvero non si raggiunge il consenso su un blocco nel round attuale), si seleziona come seed per il round r il valore $H(seed_{r-1} \oplus r)$, dove H è una funzione hash crittografica.

inserire immagine come <https://miro.medium.com/m...> in cui si inserisce una freccia rappresentate hash / 2**hashlen per far vedere la selezione di j

Fase 1: proposta del blocco Ogni utente esegue il sorteggio crittografico in privato e senza scambio di messaggi per determinare se è stato selezionato per proporre il prossimo blocco da aggiungere alla blockchain. Poiché il sorteggio è randomico, gli utenti selezionati saranno più di uno. Ogni utente propone come blocco, quello contenente tutte le transazioni in attesa. Ad ogni blocco è assegnata una priorità in modo da limitare il costo di comunicazione per la trasmissione di blocchi, che potrebbero essere di grandi dimensioni

(ad esempio 1 MB). La priorità viene calcolata nel seguente modo: per ogni *sotto-utente* $1, \dots, j$ di un utente i , la priorità del blocco è il massimo hash ottenuto applicando una funzione hash crittografica all'*hash* di output della VRF per i concatenato all'indice del *sotto-utente*. In questo modo un utente che possiede più soldi ha più probabilità di avere una priorità maggiore degli altri. Ogni utente (che ha il ruolo di proporre il nuovo blocco per il round attuale) invia in rete, mediante il protocollo gossip, un messaggio contenente il blocco proposto, la priorità e la proof ottenuta dalla VRF, per dimostrare il proprio ruolo e la priorità ottenuta. Ogni altro utente smette di ritrasmettere il blocco se questo ha una priorità più bassa rispetto a quelli che ha ricevuto precedentemente all'interno del round. Infine, ogni utente deve attendere un certo periodo di tempo in cui riceve le proposte di blocco: è chiaro che attendere meno tempo di quello che servirebbe significherebbe o non ricevere alcun blocco, o ricevere un blocco che potrebbe non essere quello a più alta priorità. Nel primo caso la fase 2 sarebbe inizializzata con un blocco vuoto. Se invece si attenderebbe più tempo di quello che effettivamente possa servire, si avrebbe solo un degradamento delle performance. Il team di Algorand assicura che in entrambi i casi il consenso si possa raggiungere, e che questo impatti solo sulle performance. Risultati sperimentali, indicano che il tempo di attesa migliore sia di circa 5 secondi.

Fase 2: consenso mediante BA^\star La seconda fase è quella in cui si raggiunge il consenso su un singolo blocco da aggiungere alla blockchain, mediante BA^\star . Questa fase è divisa in step: ogni step viene selezionato un nuovo comitato tramite sorteggio crittografico. Per raggiungere il consenso, infatti, non è necessario alcun stato, se non una chiave privata, per cui è possibile creare un comitato ad ogni step, per evitare attacchi da utenti malevoli, che scoprono l'identità dei membri del comitato. Ogni membro, in ogni step, propone il blocco (inviando oltre il blocco, anche la proof di selezione nel comitato), inizializzato con quello a priorità massima, e si contano i voti ottenuti per ogni proposta, finché non si raggiunge una certa soglia, e quindi un consenso. In particolare BA^\star raggiunge due tipi di consenso: *final*, in cui ogni altro utente che ha raggiunto un consenso *final* o *tentative*, lo ha raggiunto su uno stesso blocco, e *tentative*, in cui tutti gli altri utenti hanno raggiunto un consenso *tentative* su blocchi differenti. Quest'ultimo caso si può verificare quando ci sono partizionamenti su rete. Tutte le transazioni in un blocco *final* sono confermate, mentre le transazioni in un blocco *tentative* sono confermate solo se uno dei blocchi successivi è *final*. Se tutti gli utenti onesti propongono lo stesso blocco iniziale, BA^\star raggiunge un consenso in soli 4 step, mentre nel caso in cui un utente malevolo sia particolarmente

fortunato, il consenso si raggiunge in non più di 13 step [7].

2.2 Bernardini

In *Bernardini et al.* [3] viene affrontato un aspetto pratico in ambito blockchain: indipendentemente dal tipo di tecnologia e algoritmo di consenso utilizzato, quando un nuovo nodo entra a far parte della rete, il tempo speso per la prima sincronizzazione è molto elevato, e dipende dalla banda della rete e dalla velocità di scrittura dei dispositivi di storage. Ad esempio, in Bitcoin [24] ed Ethereum [36], le tecnologie di blockchain più utilizzate ad oggi, richiedono un download iniziale di 200 [33] e 280 GB [10], rispettivamente, equivalenti ad un tempo che varia tra un giorno e una settimana. Il lavoro mostra come ogni nodo con il ruolo di validazione, sia in grado di svolgere il proprio lavoro mantenendo memoria solo degli ultimi blocchi, senza alcun impatto sulla sicurezza della blockchain. È quindi compito del creatore della transazione fornire i dati utili alla validazione, ottenuti da uno storage *non-fidato*, corredati da una proof ottenuta dalla struttura dati autenticata. In particolare, lo storage è realizzato mediante una Distributed Hash Table (DHT), in cui ogni nodo è responsabile solo di una parte dell'intero stato memorizzato dalla blockchain. Questo porta ad un disaccoppiamento tra il ruolo di storage e quello di validazione; in altre parole, non è più necessario che un nodo con il ruolo di validazione debba memorizzare l'intero stato. In questo modo, da una parte qualunque nodo può svolgere il ruolo di validazione senza dover attendere il download di una grande quantità di dati, e dall'altra è possibile mettere a disposizione della DHT, e quindi per il ruolo di storage, uno spazio di qualsiasi dimensione a discrezione del nodo.

Ogni nodo può avere i seguenti ruoli: *storage* e *validazione*.

Ruolo di storage Un nodo con il ruolo di storage è sostanzialmente un nodo di una DHT. L'intera DHT memorizza l'intero stato della blockchain, e risponde all'elemento di stato e con il valore v . Ogni nodo della DHT memorizza solo una parte dello stato: se un nodo N memorizza il valore v associato ad e , si dice che N è *autorità* di e . Poiché lo storage è parte *non-fidata*, viene aggiunto un Merkle Tree (vedi Paragrafo 1.3). Un Merkle Tree per tutti gli elementi di stato e , esiste solo da un punto di vista logico: ogni nodo nella DHT, infatti, memorizza un ADS *potato*, comprendente solo gli elementi di stato per cui è autorità, denominata *pADS*. Il pADS è relativo allo stato ottenuto applicando le transazioni contenute in un blocco b_i , denominato *blocco pivot*, della blockchain. Alla ricezione di una query su un elemento di stato e , risponde il nodo N autorità di e , con il valore

mettere
titolo
più evo-
cativo

v corrispondente ad e , la proof p ottenuta dalla pADS e l'indice del blocco pivot di N_e . In uno scenario reale, a causa del ritardo di propagazione dei messaggi su rete, in uno stesso momento ogni nodo può avere una visione dello stato differente. Di conseguenza, un nodo che crea una transazione che coinvolge diversi elementi di stato e , può ricevere dei valori v associati ad e non allineati allo stesso blocco pivot, in altre parole con un indice differente.

Creazione di una transazione Durante la creazione di una transazione da parte di un nodo N_c della rete, è responsabilità di N_c fornire tutti i dati necessari affinché la transazione possa essere validata. Una transazione coinvolge degli elementi di stato, il cui insieme è denominato E . Per ogni $e \in E$, N_c effettua una query alla DHT, ottenendo dal nodo N_a autorità di e la tupla $\delta_i(e) = \langle v, p, i \rangle$, dove v è il valore associato ad e , p la proof associata ad e ottenuta dalla pADS di N_a e i l'indice del blocco pivot di N_a .

Ruolo di validazione Un nodo con il ruolo di validazione valida le nuove transazioni e genera il prossimo blocco da inserire in blockchain. Le transazioni generate con riferimento al paragrafo precedente, vengono ricevute e memorizzate in un pool di transazioni in attesa. Ogni nodo memorizza solamente gli ultimi $d + f$ blocchi che riceve, formando una *blockchain troncata* Λ_N . A causa dei ritardi di propagazione, Λ_N è in generale diversa per i nodi della rete, ma si suppone che ogni fork sia al massimo lungo f , per cui i blocchi a profondità maggiore di f non vengono sicuramente eliminati durante una fork resolution. In questo caso si sceglie come blocco pivot b_{l-f} , dove l è l'indice dell'ultimo blocco in Λ_N . Ogni blocco $b_i \in \Lambda_N$ oltre a contenere le transazioni confermate, in una struttura dati autenticata come le altre blockchain (ad esempio Bitcoin), include anche il pADS τ_i , che rappresenta lo stato prima dell'applicazione delle transazioni in b_i , che coinvolge solo gli elementi di stato E_i modificati dalle transazioni in b_i , il resto è potato, come rappresentato in Figura ??. Si denota inoltre π_i il pADS ottenuto da τ_i applicando le transazioni in b_i : π_i non necessita di essere memorizzato e può essere calcolato *al volo* quando è necessario.

forse definire fork resolution quando si parla della fork nel capitolo 1

fare figura contenuto blocco

Per la creazione del prossimo blocco b_{l+1} da inserire in blockchain, vengono selezionate tutte le transazioni in attesa dal pool di transazioni. Per ogni elemento di stato $e \in E_{l+1}$, si verifica l'integrità di $\delta_i(e) = \langle v, p, i \rangle$, imponendo $i \geq l - f - d + 1$ (in caso contrario la transazione sarebbe troppo vecchia), e comparando il root-hash calcolato da p e da v , secondo quanto descritto nel Paragrafo 1.3, con il root-hash di τ_i contenuto nel blocco i . Se una delle due condizioni non è valida, le transazioni che coinvolgono quell'elemento di stato vengono scartate. Per il calcolo di $\tau = \tau_{l+1}$, rappresentante

lo stato prima dell'applicazione delle transazioni nel futuro blocco b_{l+1} si procede secondo l'Algoritmo 2.2. Sia δ la lista contenente tutte le $\delta_i(e)$ per ogni $e \in E_{l+1}$. Inizialmente si effettua un merge delle proof contenute in P , ottenuta estraendole da δ , considerando solo la topologia e non gli hash. Poi si itera partendo da $x = l$ decrementandola fino all'indice del blocco più vecchio, eseguendo per ogni iterazione le seguenti operazioni: (1) si riempiono i nodi di τ ancora vuoti con π_x , e (2) la stessa cosa con δ_x , mediante la procedura *fillEmpty*. La procedura si ripete finché τ non è pieno. La correttezza di *computeState* è data dal fatto che si dà precedenza ai nodi più aggiornati nel tempo, mentre gli hash non presenti in π_x , poiché gli elementi di stato relativi non sono stati modificati nelle transazioni contenute nel blocco b_x , sono ottenuti da δ_x . A questo punto, dopo aver ottenuto lo stato attuale τ_{l+1} si verifica che ogni transazione t da includere nel blocco rispetta le regole di consenso (ad esempio, non effettua double spending) e la inserisce in b_{l+1} . Si esegue l'algoritmo di consenso distribuito e si invia in broadcast il nuovo blocco.

Algoritmo 2.2 Calcolo di τ

```

procedure COMPUTESTATE( $\delta$ )
   $P \leftarrow \text{MAP}(\text{snd}, \delta)$ 
   $\tau \leftarrow \text{TOPOLOGICALMERGE}(P)$ 
  for  $x \leftarrow l$  down to  $l - f - d + 1$  do
    FILLEEMPTY( $\tau, \pi_x$ )
    FILLEEMPTY( $\tau, \delta_x$ )
    if ISFULL( $\tau$ ) then
      break
  return  $\tau$ 

```

Alla ricezione del nuovo blocco b_{l+1} un nodo confronta il root-hash ottenuto da π_l con il root-hash di τ_{l+1} . Ogni transazione $t \in b_{l+1}$ viene validata secondo le regole di consenso, utilizzando τ_{l+1} . Se tutte le regole di consenso sono rispettate, b_{l+1} viene inserito, mentre $b_{l-d-f+1}$ viene rimosso da Λ_N . Il nuovo pivot diventa b_{l-f+1} ed i nodi di storage applicano le transazioni contenute in b_{l-f+1} a τ_{l-f+1} , aggiornando autonomamente le proprie pADS.

2.3 Sharding

Un'altra proposta in letteratura per risolvere il blockchain trilemma è lo *sharding*, una tecnica impiegata nei database distribuiti, che consiste nel partizionare lo stato della blockchain in molteplici *shard*, gestite in parallelo

da differenti sottoinsiemi di nodi, in modo da ridurre l'overhead dei protocolli di consenso e consentire un processamento delle transazioni parallelo tra i vari shard, aumentando il throughput complessivo del sistema e diminuendo il tempo di conferma di una transazione. Esempi di blockchain che utilizzano questa tecnica sono Elastico [19], OmniLedger [16] e RapidChain [37].

I protocolli che fanno uso dello sharding in ambito database hanno l'obiettivo di migliorare le performance in ambiente distribuito [4, 8]. Tuttavia essi non possono essere estesi alle blockchain, poiché gli ambiti di impiego sono opposti: mentre nei database, si assume come modello di fallimento quello secondo cui un nodo può non rispondere a richieste o per un problema hardware (come ad esempio, assenza di corrente elettrica, problemi di rete, danneggiamento di hard disk) o per un problema software (ad esempio per un crash del programma), in ambito blockchain l'ambiente di esecuzione è più ostile. Infatti i nodi, oltre che danneggiarsi, possono adoperare comportamenti malevoli.

Gli aspetti fondamentali di una blockchain sharded che ne garantiscono correttezza e sicurezza sono: (1) selezione periodica e randomica dei nodi che compongono una shard con metodologie resilienti ad attacchi di tipo Sybil, e (2) gestione delle transazioni *cross-shard*, in cui gli input ed output riguardano due o più shard.

Modello di riferimento In OmniLedger, la rete è composta da n *validatori*, con il compito di processare le transazioni generate dagli utenti del sistema. Gli n validatori sono uniformemente distribuiti tra m shard, i quali processano solo una parte delle nuove transazioni. Denotato s_i ed s_j le transazioni processate dagli shard i e j rispettivamente, con $i, j \in \{1, \dots, m\}$, e $i \neq j$, s_i ed s_j sono due insiemi disgiunti. Ogni validatore i ha una coppia chiave pubblica pk_i e privata sk_i . Il tempo è suddiviso in intervalli di tempo fissi tra i quali avvengono delle riconfigurazioni degli shard, denominati *epoche*. Ogni epoca è composta da un certo numero di *round* nei quali ogni shard processa le transazioni di cui è responsabile. Per partecipare all'epoca e , un validatore deve registrarsi entro la fine dell'epoca $e - 1$, secondo un procedimento che stabilisca la sua identità resiliente ad attacchi Sybil. Esiste infatti una blockchain che contiene le identità di tutti i validatori registrati. Infine si denota con f il numero di validatori Bizantini, tale che $n = 4f$, ovvero al massimo il 25% dei validatori è malevolo. Il modello di RapidChain è simile, con $f \leq 33\%$.

Formazione di uno shard La formazione degli shard di cui è composta la rete, affinché sia sicura, viene effettuata randomicamente, sulla base di un

numero random senza alcun bias e imprevedibile. Mentre alcuni sistemi utilizzano un *beacon* fidato per la generazione di numeri random, altri, come OmniLedger e RapidChain, si basano su un generatore di numeri casuali distribuito. Il primo si basa sulla combinazione del protocollo RandHound [30] e VRF [23], mentre il secondo si basa su Verifiable Secret Sharing (VSS) [25]. RandHound si affida ad un leader per l'orchestrazione del protocollo: se la sua elezione fosse deterministica, un utente malevolo può sfruttare la situazione a proprio vantaggio e portare fino a fn fallimenti. La selezione è quindi randomica, mediante l'uso della VRF. Ogni validatore i genera un valore $t_{i,e,v} = \text{VRF}_{sk_i}(\text{"leader"} || \text{config}_e || v)$, dove config_e è la lista contenente tutti i validatori registrati per l'epoca e e v è un contatore. Ogni validatore invia il proprio $t_{i,e,v}$, selezionando il minore che riceve e accettando il corrispondente come leader. Se il leader fallisce nell'iniziare la procedura di RandHound, v viene incrementato e riparte la selezione. Il leader genera mediante RandHound ed invia in broadcast a tutti i validatori un numero random rnd_e insieme alla sua prova di correttezza. rnd_e verrà utilizzato da ogni validatore per determinare lo shard a cui è stato assegnato. Dal punto di vista della sicurezza, un utente malevolo può essere selezionato come leader. Egli può scegliere di cooperare al protocollo, oppure di fallire, venendo escluso per tutta l'epoca e . Si noti che non può generare più numeri casuali e proporre quello che più lo soddisfa (ad esempio, un numero tale che porti ad una permutazione in cui tutti i nodi malevoli sono in uno shard), poiché questo dipende da v . Infine, la probabilità che un utente onesto sia selezionato dopo che un utente malevolo abbia vinto la lotteria, è molto alta, poiché la probabilità che l'utente malevolo sia selezionato a volte di fila, decresce esponenzialmente con a , secondo $(f/n)^a$. Per diminuire l'impatto di attacchi del tipo *join-leave*, in cui un utente malevolo che entra a far parte di uno shard si disconnette durante l'epoca e , viene effettuato uno swap periodico dei nodi tra uno shard e l'altro, spostando solamente $k = \log \frac{n}{m}$ nodi alla volta, per diminuire l'overhead necessario alla risincronizzazione dei nodi che cambiano shard. La risincronizzazione consiste nel download della blockchain dello shard. Per ridurre la dimensione si può attuare un meccanismo di potatura/checkpoint come in [3, 16, 17]. In RapidChain, un nodo scarica solo l'insieme delle *unspent transaction* (UTXO) di uno shard, sufficienti a verificare le future transazioni.

citare sistemi sharded con beacon per generazione numeri random

Comunicazione cross-shard Lo sharding permette di ridurre lo spazio richiesto dalla blockchain, ma allo stesso tempo aumenta la difficoltà della verifica delle transazioni, perché gli input e gli output possono risiedere su shard differenti. Sia t la transazione generata da un utente. t ha un numero

N di input I_1, \dots, I_N e un output O . Senza perdita di generalità, si può considerare che ad ogni input corrisponda un unico shard. Quindi, si denotano gli shard di input ed output con C_{in}^j , tale che $j \in \{1, \dots, N\}$, e con C_{out} , rispettivamente. In OmniLedger, per processare ogni transazione t in modo atomico tra shard, si utilizza un protocollo denominato *Byzantine Shard Atomic Commit*, al cui termine t è o confermata o abortita. Il protocollo è formato da 3 step:

da rivedere la frase, forse non si capisce bene

inserire immagine protocollo atomix

1. **Inizializzazione:** il client c invia t a tutte i C_{in}^j per ogni input j I_j in t .
2. **Lock:** Ogni leader di C_{in}^i verifica la validità della transazione, ovvero se l'input di cui è responsabile C_{in}^i è spendibile. Se la transazione è valida, il leader imposta la UTXO associata come spesa (quindi bloccata), ed invia a c una *proof-of-acceptance*, ovvero una proof di un Merkle Tree del blocco in cui la transazione è stata inserita. Se non è valida, c riceve una *proof-of-rejection*.
3. **Unlock:** in base alla precedente fase il client può confermare o abortire la transazione:
 - (a) **Unlock to commit:** se tutti i C_{in}^i rispondono con una *proof-of-acceptance*, c può confermare la transazione. Crea quindi una transazione *unlock-to-commit* destinata a C_{out} contenente tutte le *proof-of-acceptance* per ogni input e C_{out} crea una nuova UTXO destinata all'output di t ;
 - (b) **Unlock to abort:** se riceve almeno una *proof-of-rejection*, c può richiedere di sbloccare le UTXO per gli input I_j' per i quali ha ricevuto una *proof-of-acceptance*. c crea quindi una transazione *unlock-to-abort* dove inserisce almeno una *proof-of-rejection* per un input in modo tale da sbloccare la UTXO associata.

Questa soluzione non richiede una comunicazione inter-sharding, ma genera un grande overhead di comunicazione dovuta ad ogni proof generata per ogni input della transazione t . Inoltre, un altro aspetto negativo è che richiede del lavoro aggiuntivo, rispetto alla semplice e sola creazione di una transazione, al client, rendendolo più difficile da utilizzare per dispositivi semplici, come quelli IoT.

RapidChain risolve questo problema nel modo seguente. L'utente che crea t , invia t a C_{out} ¹. Il leader di C_{out} per ogni input I_j di t , genera una

¹secondo un meccanismo di *inter-committee routing* molto efficiente basato sull'algoritmo di routing di Kademlia [20]

transazione t_i con input I_j ed output I'_j , con $|I_j| = |I'_j|$ (con lo stesso valore) e I'_j è diretta sul conto di C_{out} . Infine genera la transazione t_{N+1} , avente input I'_j , con $j \in \{1, \dots, N\}$ e output O . Il leader invia t_i ad ogni C_{in}^i e se t_i è confermata, C_{in}^i invia I'_i a C_{out} . Se tutte le transazioni t_i , con $i \in \{1, \dots, N\}$ sono confermate, allora C_{out} inserisce t_{N+1} nella propria blockchain.

Sebbene lo sharding possa rappresentare una soluzione alla scalabilità, in modo da migliorare l'utilizzo dell'hash power complessivo della rete e ridurre l'overhead di storage per la memorizzazione dell'intero stato della blockchain, la sicurezza può essere un problema: è più facile per un attaccante prendere il controllo di una singola shard, a causa del ridotto numero di partecipanti presenti nello shard stesso, secondo l'attacco noto in letteratura come *1% attack*, o *single-shard takeover attack* [6]. Secondo questo attacco, per una rete composta da $m = 100$ shard, ad un attaccante è necessario solo l'1% dell'hash power totale per attuare i suoi comportamenti malevoli, come quelli descritti nel Paragrafo 1.1.5.

trovare
citazione
per l'1
attack

Capitolo 3

Una soluzione scalabile

3.1 Architettura

3.2 Analisi Multicast

3.3 Teoremi

Conclusione

conclusione

Ringraziamenti

Ringrazio tutti

Bibliografia

- [1] Buy bitcoin worldwide. <https://www.buybitcoinworldwide.com/fee-calculator/>.
- [2] Andreas M Antonopoulos. *Mastering Bitcoin: unlocking digital cryptocurrencies*. " O'Reilly Media, Inc.", 2014.
- [3] Matteo Bernardini, Diego Pennino, and Maurizio Pizzonia. Blockchains meet distributed hash tables: Decoupling validation from state storage. *arXiv preprint arXiv:1904.01935*, 2019.
- [4] Rick Cattell. Scalable sql and nosql data stores. *Acm Sigmod Record*, 39(4):12–27, 2011.
- [5] CertiK. The blockchain trilemma: Decentralized, scalable, and secure? <https://medium.com/certik/the-blockchain-trilemma-decentralized-scalable-and-secure-e9d8c41a87b3>, 2019.
- [6] Anamika Chauhan, Om Prakash Malviya, Madhav Verma, and Tejinder Singh Mor. Blockchain and scalability. In *2018 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)*, pages 122–128. IEEE, 2018.
- [7] Jing Chen and Silvio Micali. Algorand: A secure and efficient distributed ledger. *Theoretical Computer Science*, 777:155–183, 2019.
- [8] James C Corbett, Jeffrey Dean, Michael Epstein, Andrew Fikes, Christopher Frost, Jeffrey John Furman, Sanjay Ghemawat, Andrey Gurbarev, Christopher Heiser, Peter Hochschild, et al. Spanner: Google’s globally distributed database. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, 31(3):1–22, 2013.
- [9] Gianmaria Del Monte. *Studio e realizzazione di un protocollo efficiente per l’integrità dei dati su Cloud*. 2018. Tesi di laurea triennale, Università degli studi Roma Tre.

- [10] Etherscan. Ethereum full node sync (default) chart. <https://etherscan.io/chartsync/chaindefault>, 2020.
- [11] Yossi Gilad, Rotem Hemo, Silvio Micali, Georgios Vlachos, and Nickolai Zeldovich. Algorand: Scaling byzantine agreements for cryptocurrencies. In *Proceedings of the 26th Symposium on Operating Systems Principles*, pages 51–68, 2017.
- [12] Nermin Hajdarbegovic. Bitcoin miners ditch ghash.io pool over fears of 51 <https://www.coindesk.com/bitcoin-miners-ditch-ghash-io-pool-51-attack>, 2014.
- [13] Ethan Heilman, Alison Kendler, Aviv Zohar, and Sharon Goldberg. Eclipse attacks on bitcoin’s peer-to-peer network. In *24th {USENIX} Security Symposium ({USENIX} Security 15)*, pages 129–144, 2015.
- [14] Alyssa Hertig. Bitcoin cash: Why it’s forking the blockchain and what that means. <https://www.coindesk.com/coindesk-explainer-bitcoin-cash-forking-blockchain>, 2017.
- [15] Anne-Marie Kermarrec and Maarten Van Steen. Gossiping in distributed systems. *ACM SIGOPS operating systems review*, 41(5):2–7, 2007.
- [16] Eleftherios Kokoris-Kogias, Philipp Jovanovic, Linus Gasser, Nicolas Gailly, Ewa Syta, and Bryan Ford. Omniledger: A secure, scale-out, decentralized ledger via sharding. In *2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, pages 583–598. IEEE, 2018.
- [17] Derek Leung, Adam Suhl, Yossi Gilad, and Nickolai Zeldovich. Vault: Fast bootstrapping for the algorand cryptocurrency. In *NDSS*, 2019.
- [18] Xiaoqi Li, Peng Jiang, Ting Chen, Xiapu Luo, and Qiaoyan Wen. A survey on the security of blockchain systems. *Future Generation Computer Systems*, 2017.
- [19] Loi Luu, Viswesh Narayanan, Chaodong Zheng, Kunal Baweja, Seth Gilbert, and Prateek Saxena. A secure sharding protocol for open blockchains. In *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, pages 17–30, 2016.
- [20] Petar Maymounkov and David Mazieres. Kademlia: A peer-to-peer information system based on the xor metric. In *International Workshop on Peer-to-Peer Systems*, pages 53–65. Springer, 2002.

- [21] Silvio Micali. Algorand smart contracts at layer 1. <https://www.algorand.com/resources/blog/algorand-smart-contracts>, 2019, 31 Ottobre.
- [22] Silvio Micali. Algorand’s smart contract architecture. <https://www.algorand.com/resources/blog/algorand-smart-contract-architecture>, 2020, 27 Maggio.
- [23] Silvio Micali, Michael Rabin, and Salil Vadhan. Verifiable random functions. In *40th annual symposium on foundations of computer science (cat. No. 99CB37039)*, pages 120–130. IEEE, 1999.
- [24] Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Technical report, 2008.
- [25] Torben Pryds Pedersen. Non-interactive and information-theoretic secure verifiable secret sharing. In *Annual international cryptology conference*, pages 129–140. Springer, 1991.
- [26] Diego Pennino, Maurizio Pizzonia, and Federico Griscioli. Pipeline-integrity: Scaling the use of authenticated data structures up to the cloud. *Future Generation Computer Systems*, 100:618–647, 2019.
- [27] Soujanya Ponnappalli, Aashaka Shah, Amy Tai, Souvik Banerjee, Vijay Chidambaram, Dahlia Malkhi, and Michael Wei. Scalable and efficient data authentication for decentralized systems. *arXiv preprint arXiv:1909.11590*, 2019.
- [28] Sylvia Ratnasamy, Paul Francis, Mark Handley, Richard Karp, and Scott Shenker. A scalable content-addressable network. In *Proceedings of the 2001 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 161–172, 2001.
- [29] Ion Stoica, Robert Morris, David Karger, M Frans Kaashoek, and Hari Balakrishnan. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 31(4):149–160, 2001.
- [30] Ewa Syta, Philipp Jovanovic, Eleftherios Kogias, Nicolas Gailly, Linus Gasser, Ismail Khoffi, Michael J Fischer, and Bryan Ford. Scalable bias-resistant distributed randomness. In *2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, pages 444–460. Ieee, 2017.

- [31] Roberto Tamassia. Authenticated data structures. In *European symposium on algorithms*, pages 2–5. Springer, 2003.
- [32] Roberto Tamassia and Nikolaos Triandopoulos. Efficient content authentication in peer-to-peer networks, July 5 2011. US Patent 7,974,221.
- [33] Bitcoin Wiki. Full node. https://en.bitcoin.it/wiki/Full_node, 2020.
- [34] Ethereum Wiki. Sharding-faqs. <https://eth.wiki/sharding/Sharding-FAQs>, 2020.
- [35] Ethereum wiki project. On sharding blockchains. <https://github.com/ethereum/wiki/wiki/Sharding-FAQ>.
- [36] Gavin Wood. Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. *Ethereum project yellow paper*, 151:1–32, 2014.
- [37] Mahdi Zamani, Mahnush Movahedi, and Mariana Raykova. Rapidchain: Scaling blockchain via full sharding. In *Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, pages 931–948, 2018.
- [38] Ben Y Zhao, Ling Huang, Jeremy Stribling, Sean C Rhea, Anthony D Joseph, and John D Kubiatowicz. Tapestry: A resilient global-scale overlay for service deployment. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 22(1):41–53, 2004.