



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**

Relatore

Prof. Maurizio Pizzonia

Correlatore

Diego Pennino

Laureando

Gianmaria Del Monte

Matricola 499829

Anno Accademico 2019/2020

a Clara,
a Silvia,
ai miei genitori

Introduzione

Le blockchain permettono di realizzare applicazioni che garantiscono integrità dei dati, trasparenza ed immutabilità, senza alcuna autorità centrale che regoli le transazioni. La decentralizzazione ha aperto nuove strade in molti campi, ad esempio quello finanziario, ma pone importanti sfide per assicurare la consistenza su tutti i nodi della rete. Una blockchain pubblica, affinché sia adottata a livello globale, deve essere decentralizzata, sicura e scalabile. I tre requisiti, certamente contrastanti, determinano una difficoltà in fase di progettazione di una blockchain che li contempli tutti e tre. Vitalik Buterin, fondatore di Ethereum, ha espresso questa difficoltà nel celebre *blockchain scalability trilemma*. Secondo il trilemma una blockchain può massimizzare solo due delle tre proprietà a scapito della terza.

Negli attuali sistemi di blockchain, ogni nodo riceve e processa tutte le transazioni generate nella rete. Questo è evidentemente un problema per la scalabilità, poiché ogni nodo rappresenta un collo di bottiglia per la sua banda e potenza computazionale limitata. In letteratura sono stati proposti sia approcci focalizzati sulla scalabilità del consenso, come Algorand [20], sia da un punto di vista architetturale, mediante lo *sharding* (adottato anche nei sistemi di database distribuiti). Lo sharding consiste nel partizionare l'intera rete in tante sottoreti di piccole dimensioni, denominate *shard*, in cui ognuna è responsabile di un sottoinsieme dello stato memorizzato in blockchain. Benché sia una soluzione alla scalabilità, lo sharding penalizza la sicurezza, poiché gli shard sono composti da pochi nodi rispetto a quelli presenti su tutta la rete. Inoltre, rende difficile la gestione di transazioni *cross-shard*.

In questo lavoro di tesi, si introduce da un punto di vista teorico un'architettura in grado di scalare proporzionalmente il numero dei nodi con il throughput delle transazioni. La soluzione è architetturale e tiene conto di tutti i suoi aspetti (consenso, comunicazione e storage). In questa nuova proposta, nessun nodo invia in broadcast le transazioni che genera e non è obbligato a ricevere e processare tutte le transazioni create in un round. La scalabilità in questo caso non ha impatto né su decentralizzazione, né sulla sicurezza. Infatti, ogni nodo contribuisce alla conferma delle transazioni con

un ruolo scelto in modo efficiente mediante una selezione randomica, basata sulle *Verifiable Random Function*. Inoltre, l'incremento del throughput delle transazioni non necessita di una diminuzione del numero di nodi aventi lo stesso ruolo, come avviene in approcci sharded. Il contributo di questa tesi è quello di dimostrare, da un punto di vista formale, che è possibile risolvere il blockchain scalability trilemma.

La presente tesi è suddivisa in tre capitoli. Il primo capitolo presenta un'introduzione al tema delle blockchain, presentando la sua prima realizzazione, ovvero Bitcoin, per poi passare alle strutture dati autenticate e alle Distributed Hash Table, che saranno utili per la definizione dell'architettura proposta. Il secondo capitolo è dedicato allo stato dell'arte presentando Algorand [20] come soluzione ai problemi di scalabilità degli algoritmi di consenso in approcci basati su Bitcoin e ponendo attenzione ad un approccio strutturale [3] che consente ai nodi della rete di non dover memorizzare l'intero stato della blockchain, pur rimanendo in grado di validare le nuove transazioni ed infine, un'analisi sulle architetture basate sullo sharding. Nel terzo capitolo sono analizzate le problematiche delle soluzioni correnti ed è presentata la nuova architettura proposta con questo lavoro di tesi, con i relativi teoremi di correttezza e scalabilità.

Indice

Introduzione	iii
1 Background	1
1.1 DLT e Blockchain	1
1.2 Bitcoin	2
1.3 Blockchain Scalability Trilemma	14
1.4 Strutture dati autenticate	16
1.5 Distributed Hash Table	18
2 Stato dell'arte	22
2.1 Algorand	22
2.2 Disaccoppiamento della validazione dallo storage	27
2.3 Sharding	30
3 Una soluzione scalabile	35
3.1 Problematiche in approcci correnti	35
3.2 Aspetti centrali e definizioni di base	36
3.3 Architettura e ruolo dei comitati	38
3.4 Teorema di correttezza	42
3.5 Teorema di scalabilità	43
3.6 Comunicazione inter-committee	45
3.7 Discussione	46
Conclusioni e Sviluppi Futuri	49
Bibliografia	50

Capitolo 1

Background

Questo capitolo intende esporre i concetti principali per una corretta comprensione della presente tesi, introducendo dapprima le blockchain, mostrando la prima realizzazione di blockchain, ovvero Bitcoin, ed infine introducendo le strutture dati autenticate e le Distributed Hash Table.

1.1 DLT e Blockchain

Un *Distributed Ledger Technology*, o *DLT*, è un registro distribuito, la cui copia è presente su tutti i partecipanti (o nodi) della rete, in cui ogni nodo in maniera indipendente dagli altri può apportare delle modifiche sotto il consenso di tutti gli altri. Ogni nodo della rete è in grado di creare una transazione che modifica lo stato del registro, ma questa non è accettata da un'autorità centralizzata come in sistemi tradizionali, bensì dalla maggioranza dei partecipanti. Infatti, ogni nodo può partecipare alla validazione e alla conferma di tutte le nuove transazioni.

Il concetto fondamentale che regola una DLT è quello del *consenso*. Il consenso specifica come i partecipanti si accordano sullo stato del registro. Quest'ultimo, oltre ad essere distribuito, è anche *immutabile*. Infatti, una volta raggiunto il consenso su una transazione, questa non può essere annullata ed il suo effetto rimane indelebile.

Le DLT si dividono in due categorie: *permissioned* (o *private*) e *unpermissioned* (o *pubbliche*). Nelle prime l'accesso è controllato da un'autorità che verifica l'autenticità del partecipante, il registro è quindi proprietà di un insieme di attori, ed il sistema è composto da nodi fidati (*trusted*). Le seconde, argomento della presente tesi, permettono a chiunque di partecipare, non sono quindi proprietà di nessuna organizzazione e consentono a tutti di proporre delle modifiche. Il campo di applicazione è quello di database su scala

globale, ad esempio per un sistema di cripto-valute, le cui informazioni hanno bisogno di essere immutabili (le transazioni confermate o il saldo associato ai conti degli utenti). Esse sono però soggette ad attacchi Sybil [16], di cui si parlerà in seguito. In genere le prestazioni delle DLT permissioned sono maggiori delle DLT unpermissioned. Nel resto della tesi si farà riferimento solamente alle DLT unpermissioned.

Poiché i database tradizionali hanno un failure model nettamente differente da quello delle DLT, i protocolli di consenso utilizzati nei primi in ambiente distribuito, come [4, 40], non possono essere impiegati. Infatti, mentre nei database il fallimento di un nodo corrisponde ad un suo crash, software o hardware, che non gli permette di rispondere alle richieste, nelle seconde l'ambiente di esecuzione è più ostile. I nodi, denominati *bizantini*, oltre ad avere dei crash, possono comportarsi in modo malevolo, rispondendo in modo errato e corrompendo altri nodi. Le DLT devono quindi adottare un protocollo di consenso che sia *Byzantine Fault Tollerant (BFT)*, il cui nome deriva dal *problema dei generali bizantini*. *Proof-of-Work* [34], in cui si seleziona randomicamente un leader la cui probabilità dipende dalla sua potenza computazionale, *Proof-of-Stake* [25], *Proof-of-Personhood* [5], sono esempi di protocolli BFT resistenti ad attacchi Sybil.

Una *blockchain* fa parte della classe delle DLT ed è una lista di blocchi semplicemente collegata, il cui inserimento è solo in modalità *append*. Ogni blocco è identificato da un hash crittografico, calcolato sull'header del blocco stesso. Ogni blocco punta al nodo precedente specificandone l'hash. La sequenza di blocchi crea quindi una catena, in cui il primo è denominato *genesis block* ed è specificato nell'algoritmo di consenso.

In Bitcoin [34], un blocco è un contenitore formato da una sezione *meta-dati*, 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 del blocco, un *difficulty target* e un *nounce*, utilizzati nella fase di mining. La figura 1.1 mostra un esempio di blockchain.

1.2 Bitcoin

Bitcoin [34] è una tecnologia open-source di cripto-valute basata su blockchain, presentato nel 2008 da Satoshi Nakamoto, la cui identità è ancora un mistero. A differenza di valute tradizionali che esistono fisicamente sotto forma di banconote, il *bitcoin*, la valuta dell'omonima tecnologia, è virtuale. Con il termine Bitcoin, si indicano vari aspetti: la tecnologia, lo stack pro-

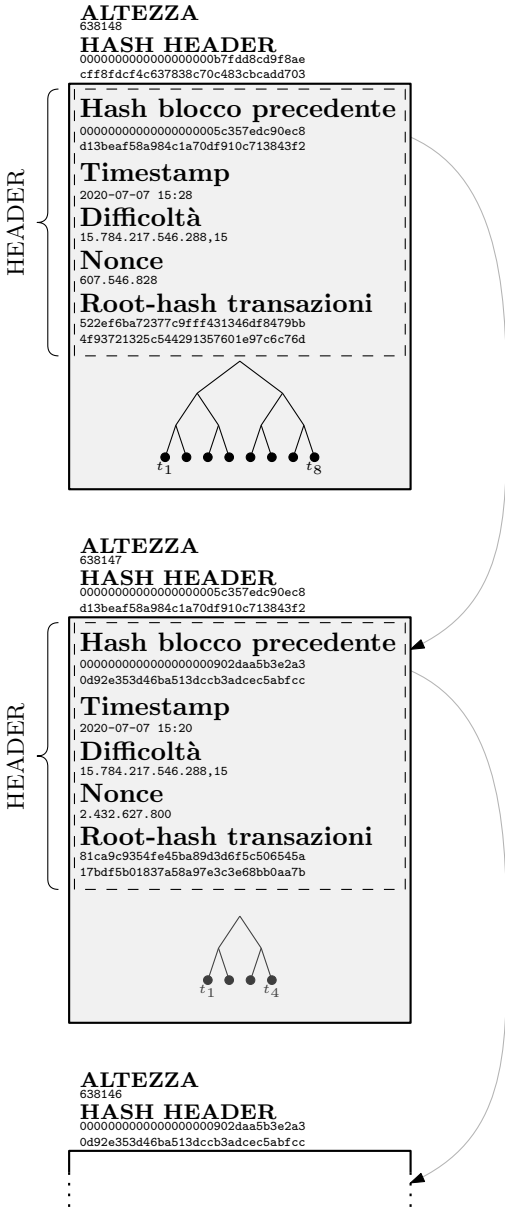


Figura 1.1: Esempio di blockchain in Bitcoin. Ogni blocco punta al blocco precedente specificandone l'hash dell'header.

tocollare di comunicazione adottato tra i partecipanti alla rete e la valuta scambiata. Bitcoin è una rete P2P, a cui partecipano nodi denominati *peer*, in cui non esistono nodi speciali o più importanti di altri, come nei sistemi di pagamento elettronici tradizionali. Non è presente quindi 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. Ogni *peer* può creare una transazione, dimostrando di essere il proprietario del conto sorgente. Dopo la creazione, questa viene inviata in broadcast a tutti i nodi della rete, per essere validata. A differenza dei sistemi di pagamento 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 raggruppate in blocchi di transazioni, secondo un processo che richiede un'enorme quantità di potenza computazionale. Al termine di questa fase il blocco viene aggiunto in *blockchain*. Questo processo è denominato *mining* ed è svolto dai *peer* che ricoprono il ruolo di *miner*. 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 esse siano valide.

Una transazione è valida se è corretta sintatticamente e non fa *double-spending*, ovvero spende due o più volte lo stesso importo.

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 pool*, composte da diversi partecipanti, che dividono equamente, sulla base delle risorse condivise, i bitcoin guadagnati.

1.2.1 Wallet e indirizzi digitali

Un nodo, per poter partecipare alla rete ed effettuare un pagamento, 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 generare autonomamente delle chiavi evidenzia la caratteristica fondamentale di Bitcoin, ovvero la decentralizzazione del controllo e del consenso, basate sulla crittografia. In particolare, il modello di riferimento è quello della crittografia asimmetrica, in cui le chiavi digitali sono sotto forma di una coppia di chiavi, una *privata* (e 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 di essere possessori di un certo conto. In crittografia, una chiave privata è usata per firmare un messaggio, o in questo caso una transazione, mentre la chiave pubblica, conosciuta da tutti i nodi della rete, per validare la firma del messaggio. Infatti, semplificando, 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 peer, 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 pubblica del peer, mediante una serie di funzioni hash, come illustrato nella Figura 1.2.

Quando un nodo crea una transazione, presenta la sua chiave pubblica e firma la transazione per dimostrare di essere il proprietario di quel conto. 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 *seed*, che può essere anche una password digitata da un utente, per cui non ha bisogno di memorizzare alcuna chiave.

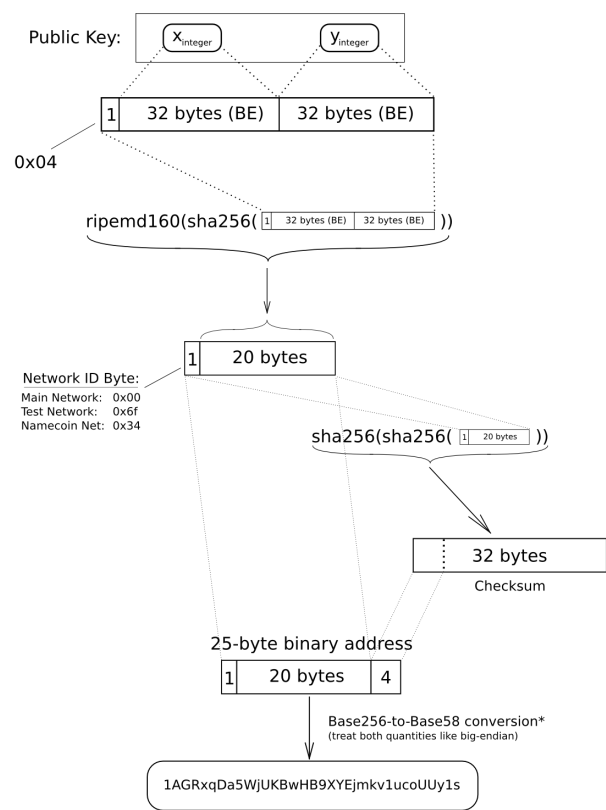


Figura 1.2: Creazione di un indirizzo Bitcoin a partire dalla chiave pubblica [51].

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.

1.2.2 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.

Vediamo ora il ciclo di vita di una transazione. Ogni nodo nella rete può generare una transazione. La transazione contiene una firma che dimostra che il nodo possiede i bitcoin specificati nell'input. Essa viene quindi inviata in broadcast, raggiungendo tutti i nodi della rete. Questa viene messa nella lista delle transazioni in attesa, o *pending transaction*, verificata da ogni nodo, e se valida, ovvero conforme alle regole di consenso, è inclusa all'interno di un blocco insieme ad altre transazioni. Se sul blocco viene risolto un puzzle crittografico, esso viene aggiunto in coda alla blockchain. Una transazione può essere creata da un nodo anche se questo è offline. Una volta tornato online può inviare la nuova transazione al resto della rete.

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 che memorizza i conti degli utenti, come in altre tecnologie blockchain presentate nei prossimi paragrafi, ma i bitcoin posseduti da un certo indirizzo sono calcolati 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. Ad ogni UTXO è associato un valore espresso in *satoshi*, dove 1 satoshi è equivalente a 10^{-8} bitcoin, e sono bloccate da un segreto di cui è a conoscenza solo il possessore. I satoshi corrispondono 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 in massimo 100 parti, il bitcoin, può essere suddiviso fino a 100 milioni di parti.

Le UTXO corrispondono agli output di una transazione, facente parte di un blocco della blockchain, che non è stata ancora spesa da 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 blockchain, il proprietario della quantità di bitcoin indicati nella transazione stessa.

Ogni input in una transazione è un riferimento ad una UTXO. In particolare si indica l'UTXO da utilizzare come sorgente specificando l'hash della transazione e l'indice dell'output 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, perché 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 sua dimensione in byte, in genere sui 370 byte, ma dipende anche 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.

$\underbrace{\langle \text{Firma } A \rangle \langle \text{Chiave pubblica } A \rangle}_{\text{unlocking script}} \underbrace{\text{OP_DUP OP_HASH160 } \langle \text{Hash chiave pubblica } A \rangle \text{ OP_EQUAL OP_CHECKSIG}}_{\text{locking script}}$

Figura 1.3: Esempio di locking ed unlocking script per una transazione P2PKH. La transazione è generata dall'utente A che deve dimostrare nell'unlocking script la propria identità.

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 poter utilizzare i bitcoin contenuti in essa. 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, istruzione condizionale, ma non loop, il che lo rende *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. La Figura 1.3 mostra un esempio di locking e unlocking script per una transazione P2PKH. È possibile creare anche fondi sbloccabili solo da più utenti insieme o anche da una certa data in poi. Questi sono solo alcuni degli esempi che è possibile creare.

1.2.3 Mining

Il mining ha lo scopo principale di confermare le transazioni in attesa, generando un nuovo blocco da aggiungere alla blockchain, con un meccanismo completamente decentralizzato, dove ogni nodo della rete, o *miner*, può contribuire al processo. Non è necessario nessun comitato speciale o un'autorità centrale 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 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 da 50 bitcoin da gennaio 2009. Dall'11 maggio 2020, infatti, la ricompensa per i miner è di 6.25 bitcoin. Quindi, 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, 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, ed 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 (1) verificare che la transazione non faccia *double spending*, ovvero si utilizza più di una volta la stessa UTXO, confrontando gli input della transazione con gli output delle transazioni nei blocchi della blockchain e con quelle del pool delle transazioni, (2) verificare che la somma degli input sia maggiore della somma degli output, e (3) 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 soddisfa tutti questi requisiti, 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 spesa, 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:

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

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 la ricompensa al miner per il lavoro svolto.

Vediamo ora come funziona l'algoritmo di consenso. 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. 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 viene svolto 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. Proof-of-Work, in altre parole, consente di eleggere un leader randomicamente con una probabilità dipendente dalla sua potenza computazionale in rapporto a quella della rete (denominata *hash power*), che propone il nuovo blocco da inserire in bloc-

kchain. Il target definisce la difficoltà nel trovare un blocco che soddisfi le condizioni di consenso, in quanto questo determina un aumento esponenziale del numero di tentativi da svolgere per risolvere il problema crittografico. 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, cessano di minare il proprio blocco ed iniziano a lavorare sul successivo, utilizzando lo stesso approccio appena descritto.

Può capitare che due miner nella rete 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*. In questo caso alcuni nodi della rete possiedono una vista differente della blockchain. Il problema viene risolto da ogni nodo scegliendo il ramo più lungo, in modo da convergere allo stesso stato della blockchain. Il processo è denominato *fork resolution*. A causa della possibilità di fork, una transazione è considerata confermata quando raggiunge una profondità maggiore di sei blocchi (quindi, in media dopo un'ora).

1.2.4 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 mettere in atto l'*attacco 51%* (o *attacco Sybil* [16]). Questo gli consente di ottenere il 100% delle ricompense dal mining, poichè riuscirebbe a creare catene di blocchi sicuramente più lunghe di qualsiasi altro miner. Inoltre può fare un *double spending*, in cui si utilizza la stessa UTXO come input alle transazioni, 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 minore di quello di Bitcoin: esempi di cripto-valute che sono state vittime del 51% attack sono Monacoin [21], Bitcoin Gold [41] e

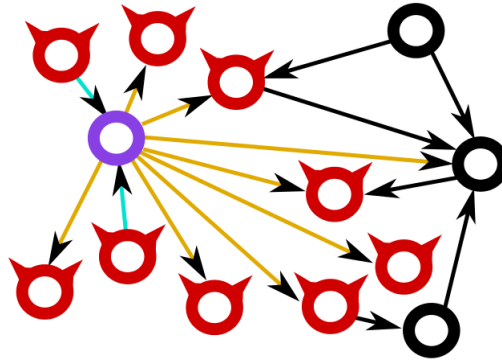


Figura 1.4: Rappresentazione di un attacco eclipse in cui un nodo è isolato dal resto della rete. Fonte [22]

ZenCash [46]. 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.

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 dal 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. La Figura 1.4 mostra una rappresentazione di un attacco Eclipse. Heilman et al. [22], 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* ed il miner che ha minato questo blocco non riceve alcuna ricompensa. Un attaccante che eclissa più di un miner, accumula i blocchi minati 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. Questo porta quindi ad uno spreco delle risorse degli attaccati.
- **Splitting mining power:** Si eclissa un certo numero di miner in modo da ridurre l'hash power della rete 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 privati i blocchi che ha minato ed elimina quelli minati dai miner eclissati che competono con i suoi blocchi. 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 vogliono 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 blockchain vista dai nodi eclissati diventa orfana, poiché è un fork più corto rispetto alla vista della blockchain del resto della rete. La transazione creata dall'attaccante viene quindi eliminata. Anche in questo caso, l'attaccante ottiene un prodotto senza aver pagato.

1.3 Blockchain Scalability Trilemma

Sebbene il *blockchain scalability trilemma* [8] 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 [54, 58]. Il termine [52] fu coniato da Vitalik Buterin, creatore di *Ethereum*, una blockchain basata su Proof-of-Work, individuando le tre caratteristiche che una blockchain deve possedere per allargare i propri confini a livello globale: *decentralizzazione*, *sicurezza* e *scalabilità*. Il *trilemma* afferma che una blockchain può possederne solo due sulle tre disponibili. Il blockchain scalability trilemma si può

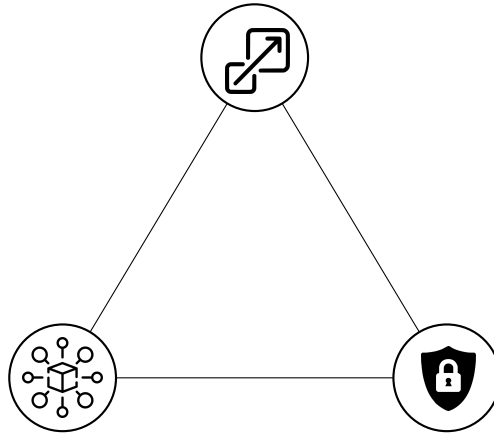


Figura 1.5: Rappresentazione del blockchain scalability trilemma. Secondo il trilemma una blockchain può trovarsi su uno dei lati del triangolo e non nel centro, rappresentante l'ottimo.

rappresentare con un triangolo, come in Figura 1.5, ai cui vertici ci sono le tre proprietà e in cui l'ottimo è al centro.

Vediamo in dettaglio i tre elementi fondamentali del trilemma.

Decentralizzazione Per decentralizzazione si intende il fatto che le transazioni sono 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 [23], 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 la decentralizzazione ha come conseguenza una *qualità* di decisione più alta rispetto ad una presa da un'autorità centrale, poiché la conferma è ottenuta da più nodi. Il trade-off è però 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, posso gestire un carico massimo di 7 e 12 TPS¹ al contrario di Visa, che può raggiungere le 65.000 TPS [49]. EOS [55], 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.

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 1.2.4.

È importante notare che il blockchain scalability 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 nella storia dell'informatica un punto di svolta, dimostrando che una cripto-valuta 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.

1.4 Strutture dati autenticate

Come si è visto nella Paragrafo 1.1, 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 che permette una verifica di integrità dei dati memorizzati. Permettono ad un client di verificare l'autenticità e l'integrità 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

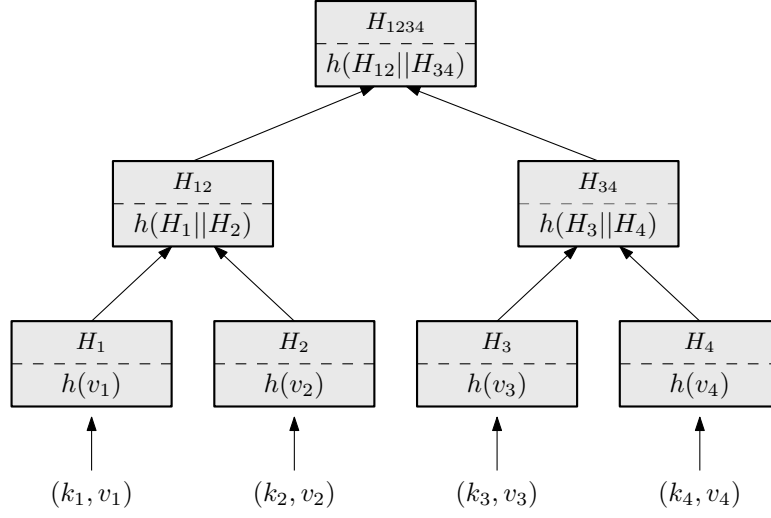


Figura 1.6: Un esempio di Merkle Tree. h è la funzione di hash.

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 [36] e [14].

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 1.6 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.

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  $k$ 
   $P \leftarrow []$ 
  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  $P$ 

```

La Figura 1.7 mostra un esempio di proof, rappresentata dalla lista composta dai nodi grigi per il valore v_5 . Considerato il cammino p da v_5 al root, rappresentato in figura con una linea tratteggiata, si selezionano i nodi H_6 , H_{78} e H_{1234} , fratelli dei nodi percorsi in p . La proof risultante è quindi la lista di coppie $[(H_6, L), (H_{78}, L), (H_{1234}, R)]$.

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* [37], 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 gli hash delle radici dei sottoalberi al posto di esse. La Figura 1.8 mostra un esempio di MHT potato.

1.5 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

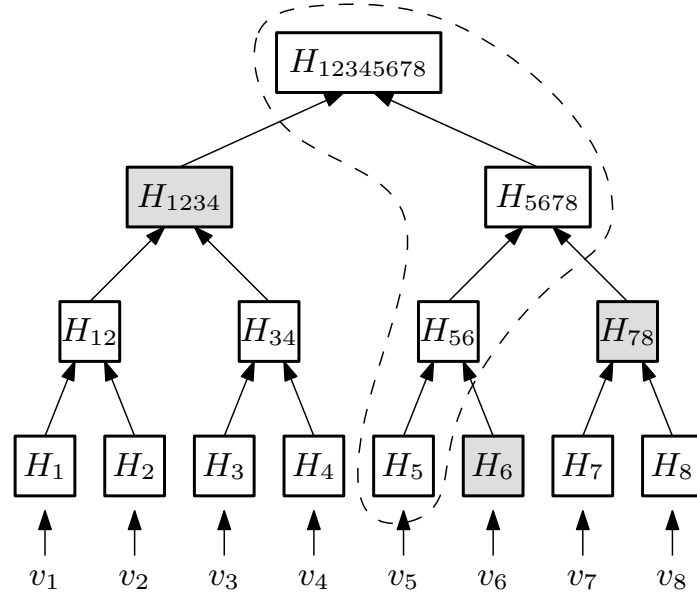


Figura 1.7: Proof di v_5 in un Merkle Tree. Essa è la lista composta dai nodi in grigio.

Algoritmo 1.2 Calcolo del root hash dalla proof

```

procedure ROOTHASH_FROM_PROOF( $p, v$ )
   $h_1 = \text{hash}(v)$ 
   $L = \text{len}(p)$ 
  for  $i \leftarrow 1$  to  $L$  do
     $\text{Tag}, h_{p_i} \leftarrow p[i]$ 
    if  $\text{Tag} = R$  then
       $h_{i+1} \leftarrow \text{hash}(h_{p_i} || h_i)$ 
    else
       $h_{i+1} \leftarrow \text{hash}(h_i || h_{p_i})$ 
  return  $h_L$ 

```

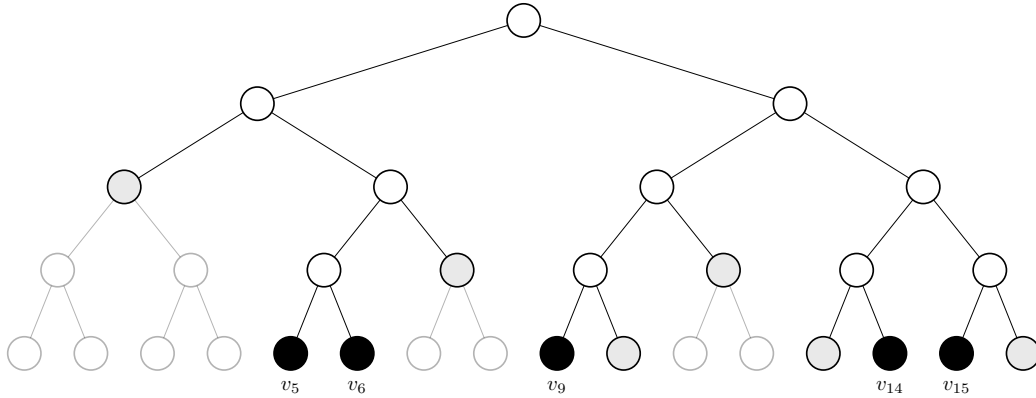


Figura 1.8: Esempio di Merkle Tree potato. Un nodo memorizza solo una parte dei valori ed i corrispettivi hash (nodi in nero), e le radici dei sottoalberi dei valori che non memorizza (nodi in grigio).

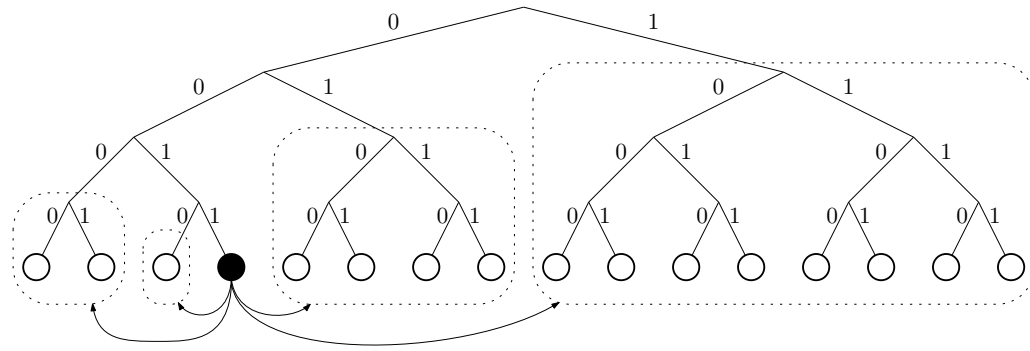


Figura 1.9: Rappresentazione della tabella di lookup di dimensione logaritmica rispetto al numero dei nodi in Kademia.

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 [30, 39, 42, 57] 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 (vedi Figura 1.9).

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 *authenticate* [45, 3], in cui ogni nodo n memorizza anche un'ADS potata, avente come foglie solo quelle per cui n è autorità.

Capitolo 2

Stato dell'arte

In questo capitolo si presenta una panoramica riguardo i risultati più significativi in tema scalabilità della blockchain. Si descrive il nuovo algoritmo di consenso proposto da Algorand, per poi introdurre un approccio che consente ai nodi che si occupano di validazione delle transazioni di non dover memorizzare l'intero stato della blockchain, che verrà ripreso nel prossimo capitolo in fase di definizione dell'architettura proposta nella presente tesi. Infine si mostra un approccio architetturale alla scalabilità basato sullo sharding, effettuando un'analisi sull'impatto che la scalabilità ha sulla sicurezza.

2.1 Algorand

Algorand [20, 10] è un nuovo sistema di blockchain, progettato da Silvio Micali, professore del MIT e vincitore del premio Turing nel 2012. Algorand è infatti in grado di confermare le nuove transazioni nell'ordine di un minuto scalando su numerosi utenti. A differenza di Bitcoin e altre blockchain simili, Algorand non usa per raggiungere il consenso Proof-of-Work. In Bitcoin ogni blocco viene aggiunto alla blockchain ogni 10 minuti, tramite una gara crittografica costosa in termini di potenza computazionale, e di conseguenza di costo di elettricità, il che si traduce in uno spreco di risorse per 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 [47]: 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), utilizza una grande quantità di energia elettrica senza alcun ritorno economico. Si stima infatti, che l'81% dell'hash power sia detenuto dalle mining pool della Cina [48]: 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, due o più miner possono risolvere nello stesso momento il puzzle crittografico. Quindi il prossimo blocco candidato non unico. I miner inizieranno a minare il blocco successivo scegliendo quello che viene ricevuto prima 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 in un blocco a profondità almeno 6. È chiaro che il tempo di conferma di una transazione non è più di soli 10 minuti, ma di un'ora. Concludendo, Proof-of-Work è dispendioso, incerto ed incredibilmente lento.

Algorand utilizza un protocollo BFT denominato $BA\star$, in grado di scalare a molti utenti, raggiungendo il consenso su un blocco con una bassa latenza e senza possibilità di fork, progettare per evitare attacchi Sybil, e resiliente ad attacchi di tipo Denial-of-Service, continuando ad operare anche in presenza di utenti malevoli.

Algorand affronta questi obiettivi usando numerose tecniche:

- **Utenti pesati:** ad ogni utente è assegnato un peso in base alla quantità di denaro che possiede, in modo da prevenire attacchi Sybil, ispirandosi all'approccio *Proof-of-Stake* [25], un'alternativa a Proof-of-Work. La differenza fondamentale tra le blockchain 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 solamente utilizzati per una selezione randomica dei nodi che si occupano della validazione, in modo da prevenire attacchi Sybil. $BA\star$ garantisce un funzionamento corretto se il totale dei soldi posseduti dagli utenti onesti è maggiore dei $2/3$ dei soldi totali presenti all'interno del sistema.
- **Comitati:** il consenso è ottenuto in maniera scalabile da $BA\star$ tramite la formazione di 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 è stato selezionato in un comitato, utilizzando una funzione, denominata *Verifiable Random Function* (VRF) [33]. In questo modo un attaccante non può conoscere chi farà parte del prossimo comitato, rendendo più difficile un eventuale attacco.
- **Rotazione dei membri:** Un utente malevolo può attaccare un membro di un comitato quando questo comunica con gli altri membri. Tuttavia $BA\star$ 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 una 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* dalle versioni più recenti [31, 32]. 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* [24], un protocollo 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 degli utenti del sistema, la probabilità che il peer i sia selezionato è proporzionale a w_i/W . La selezione è basata sulle Verifiable Random Function (VRF) [33], una funziona 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

Algoritmo 2.1 Selezione dei comitati in Algorand.

```

procedure SORTITION( $sk, seed, \tau, role, w, W$ )
   $\langle hash, \pi \rangle \leftarrow \text{VRF}_{sk}(seed || role)$ 
   $p \leftarrow \frac{\tau}{W}$ 
   $j \leftarrow 0$ 
  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  $\langle hash, \pi, j \rangle$ 

```

questo un utente può essere selezionato più di una volta: infatti la variabile j restituita dall'algoritmo 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 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 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*. 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 creata prima della generazione del *seed*. Il seed per il round r viene generato da ogni utente u selezionato per la proposta del blocco, come $\langle seed_r, \pi \rangle \leftarrow \text{VRF}_{sk_u}(seed_{r-1} || r)$, 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 $h(seed_{r-1} || r)$, dove h è una funzione hash crittografica.

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 serve, 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 attendesse 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^* La seconda fase è quella in cui si raggiunge il consenso su un singolo blocco da aggiungere alla blockchain, mediante BA^* . 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), 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^* 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 [10].

2.2 Disaccoppiamento della validazione dallo storage

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 [34] ed Ethereum [53], le tecnologie di blockchain più utilizzate ad oggi, richiedono un download iniziale di 200 [50] e 280 GB [17], rispettivamente, equivalenti ad un tempo che varia tra un giorno e una settimana. La proposta 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 da una 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 1.4). 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 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 verifica la validità delle nuove transazioni e genera il prossimo blocco da inserire in blockchain. Le nuove transazioni vengono ricevute e memorizzate in un pool di transazioni in attesa. Ogni nodo memorizza solamente gli ultimi $d + f$ blocchi che riceve (vedi Figura 2.1), 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 2.2. Si denota inoltre π_i il pADS ottenuto da τ_i applicando le tran-

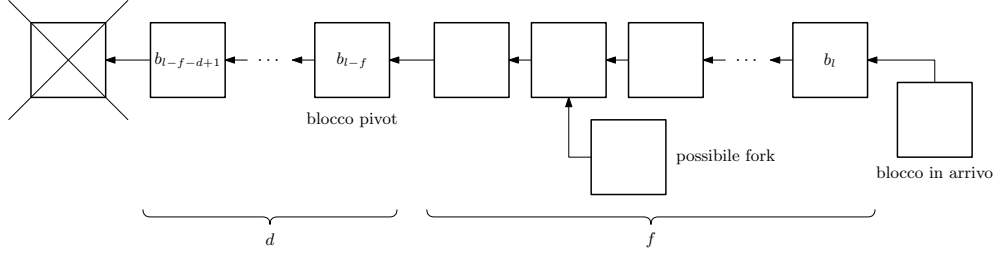


Figura 2.1: Blockchain troncata: un nodo memorizza solo gli ultimi $d+f$ blocchi. Fonte [3]

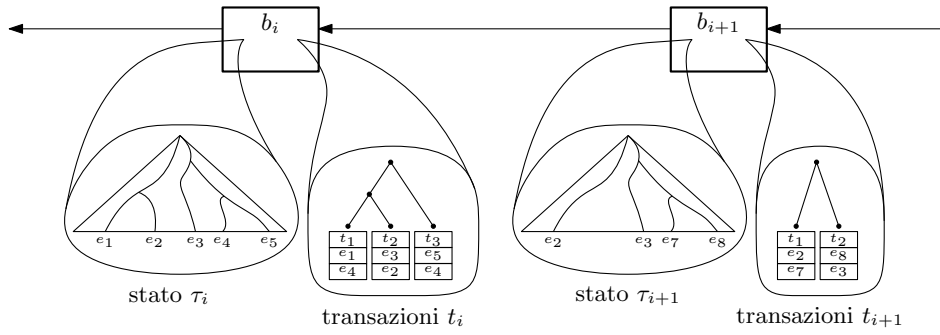


Figura 2.2: Contenuto di un blocco. Ognuno blocco b_i contiene le transazioni confermate t_i e il Merkle Tree potato τ_i contenente solo le foglie degli elementi di stato modificati in t_i . Fonte [3]

sazioni in b_i : π_i non necessita di essere memorizzato e può essere calcolato *al volo* quando è necessario.

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 1.4, 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*. *fillEmpty* riempie solo i nodi dell'albero corrispondenti a quelli di π_x e δ_x che sono ancora vuoti. La procedura si ripete finché tutti i nodi di τ non sono stati riempiti. 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
    FILLEMPTY( $\tau, \pi_x$ )
    FILLEMPTY( $\tau, \delta_x$ )
    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 scalability trilemma da un punto di vista architetturale è lo *sharding*, una tecnica impiegata nei database distribuiti, che consiste nel partizionare lo stato della blockchain in molteplici *shard*. Gli shard sono gestiti in parallelo da differenti sottoinsiemi di nodi, in modo da ridurre l'overhead dei protocolli di consenso. Consentono 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 Elastic [29], OmniLedger [26] e RapidChain [56].

I protocolli che fanno uso dello sharding in ambito database hanno l'obiettivo di migliorare le performance in ambiente distribuito [7, 11]. 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 e 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 ed imprevedibile. Mentre alcuni sistemi utilizzano un *beacon* fidato per la generazione di numeri random [12, 13], altri, come OmniLedger e RapidChain, si basano su un generatore di numeri pseudocasuali distribuito. Il primo si basa sulla combinazione del protocollo RandHound [43] e VRF [33], mentre il secondo si basa su *Verifiable Secret*

Sharing [35]. RandHound si affida ad un leader per l'orchestrazione del protocollo: se la sua elezione fosse deterministica, un utente malevolo potrebbe sfruttare la situazione a proprio vantaggio e causare fino a fn fallimenti. La selezione è quindi randomica, mediante l'uso della VRF [33]. 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 ed 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 viene infine utilizzato da ogni validatore per determinare lo shard a cui è stato assegnato. Da un punto di vista della sicurezza, un utente malevolo può essere selezionato come leader. Egli può scegliere di cooperare al protocollo, oppure fallire, venendo escluso per tutta l'epoca e . Si noti che non può generare un maggior numero di valori 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 , che è conosciuto da tutti gli altri nodi della rete. 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 delle blockchain, si può attuare un meccanismo di potatura/checkpoint come in [3, 26, 27]. In RapidChain, un nodo scarica solo l'insieme delle *unspent transaction* (UTXO) di uno shard, sufficienti a verificare le future transazioni.

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 ed un output O . Senza perdita di generalità, si può considerare che ad ogni input corrisponda uno 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

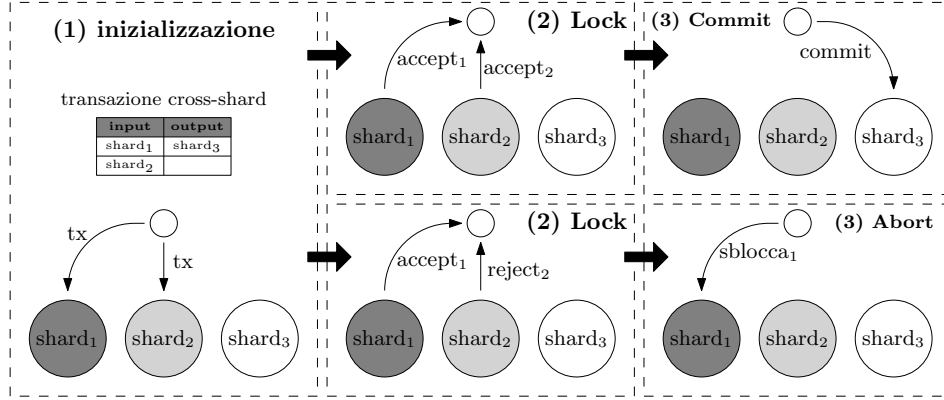


Figura 2.3: Processamento di una transazione cross-shard in Omniledger. Fonte [26]

atomico tra più 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 (vedi Figura 2.3):

1. **Inizializzazione:** il client c invia t a tutte i C_{in}^j per ogni input 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 le UTXO bloccate.

Questa soluzione non richiede una comunicazione inter-sharding, ma genera un grande overhead di comunicazione dovuto 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 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 un singolo 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* [9]. 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 1.2.4.

¹secondo un meccanismo di *inter-committee routing* molto efficiente basato sull'algoritmo di routing di Kademlia [30]

Capitolo 3

Una soluzione scalabile

In questo capitolo viene presentata da un punto di vista teorico, l'architettura progettata ed analizzata in questo lavoro di tesi, in grado di risolvere il blockchain scalability trilemma. In particolare, inizialmente si analizzeranno le problematiche negli approcci correnti, per poi descrivere l'architettura, mostrando il ruolo di ciascun nodo e descrivendo il flusso di informazioni scambiato tra i nodi della rete. Infine si dimostrerà la correttezza dell'architettura e la sua scalabilità, con gli omonimi teoremi. L'architettura è stata proposta in letteratura nell'articolo *Scaling Blockchains Without Giving up Decentralization and Security (A solution to the Blockchain Scalability Trilemma)* [15].

3.1 Problematiche in approcci correnti

I sistemi correnti presentano aspetti che rendono le blockchain non scalabili. In particolare le tre criticità individuate sono:

1. le nuove transazioni vengono inviate in broadcast a tutti i nodi della rete;
2. ogni nuovo blocco è ricevuto da tutti i nodi;
3. esiste un insieme dei nodi che processano tutte le nuove transazioni da includere nel prossimo blocco.

Questi aspetti implicano che per poter processare un quantitativo di transazioni maggiori, si deve aumentare proporzionalmente la capacità computazionale e la banda dei singoli nodi (scalabilità *verticale*). É preferibile invece una scalabilità *orizzontale*, secondo cui per far fronte all'aumento di transazioni da processare si aggiungono nuovi nodi alla rete.

Nella presente tesi, l'obiettivo è quello di progettare un'architettura che affronti i tre problemi prima menzionati, tralasciando gli aspetti legati alla scalabilità del protocollo di consenso distribuito. Infatti i tre aspetti sono del tutto indipendenti da quest'ultimo e sono rilevanti anche per protocolli di consenso *light* [38]. Si tralasciano gli aspetti legati allo storage dello stato della blockchain, poiché affrontato in altri lavori, come presentato nel Paragrafo 2.2.

In letteratura, alcune proposte di architettura scalabile introducono lo *sharding*, descritto nel Paragrafo 2.3. Tuttavia, come si è visto, assicurare l'atomicità delle transazioni è impegnativo in contesti in cui queste riguardano più shard (transazioni *cross-shard*), che richiedono tecniche simili al 2PC o creazione di ulteriori transazioni per ogni input presente in quella originaria. Altra criticità, più importante, riguarda la sicurezza: gli shard piccoli permettono all'architettura di scalare, ma sono meno sicure rispetto ad una blockchain formata da tutti i nodi della rete.

3.2 Aspetti centrali e definizioni di base

Per semplicità si assume che la blockchain realizzi un sistema di criptovalute, in cui ad ogni *indirizzo* (o *conto*) è associato un saldo non negativo e le transazioni spostano del valore monetario da un conto all'altro, modificando di conseguenza il saldo su entrambi gli indirizzi.

Si definiscono *transazioni candidate*, le transazioni generate dagli utenti ma ancora non processate dalla blockchain. Una transazione è *confermata*, o *accettata* se è stata processata dalla blockchain ed è inclusa in un blocco.

L'insieme delle transazioni candidate rappresenta il carico della blockchain, identificato dalla frequenza misurata in transazioni al secondo. Si assume che, il carico delle transazioni candidate sia distribuito uniformemente sullo spazio degli indirizzi. Il tempo impiegato a confermare una transazione candidata è denominato *latenza*. Si definisce *throughput massimo* della blockchain la massima frequenza delle transazioni candidate che è possibile confermare con latenza limitata. Quando il carico è minore del *massimo throughput* si dice che il sistema è *well-provisioned*. Si dice che un'architettura blockchain *scala* se, partendo da una blockchain *well-provisioned*, la blockchain rimane *well-provisioned* incrementando proporzionalmente carico e nodi nella rete.

Per i problemi presentati precedentemente, il *blocco* dell'architettura proposta non è come quello delle soluzioni comuni, in cui sono memorizzate le transazioni confermate dai miner. Infatti in quest'ultimo caso la dimensione del blocco dipende dal numero di transazioni confermate e quindi dal carico

generato dalla rete. Questo ovviamente è un problema di scalabilità, per cui la dimensione del blocco è costante e contiene solamente l'hash del blocco precedente e l'hash dello stato della blockchain dopo l'applicazione delle transazioni del blocco. Per cui, il blocco può esser visto come l'header del blocco delle soluzioni tradizionali. L'hash dello stato è ottenuto dal root-hash del Merkle Tree dello stato, per cui è chiamato *state root-hash*.

L'intera architettura, per ragioni di scalabilità, è organizzata secondo una *pipeline*, in cui ogni operazione è eseguita in diversi *stage*. Il tempo è inoltre suddiviso in *round*, numerati sequenzialmente. In ogni round ogni nodo può partecipare alla conferma delle nuove transazioni oppure alla creazione del nuovo blocco. L'ultimo stage della pipeline corrisponde alla creazione del nuovo blocco, inviato in broadcast a tutti i nodi della rete.

Le operazioni vengono eseguite da un certo numero di *comitati*, che lavorano insieme per la validazione e conferma delle nuove transazioni e per la creazione del corrispettivo blocco per ogni round. Ogni comitato è formato da un numero di *membri*, che è costante, come si vedrà in seguito, anche all'aumentare dei nodi sulla rete. È importante, per problemi di sicurezza, che i membri di ogni comitato, come nell'approccio sharded (vedi Paragrafo 2.3), siano selezionati in modo randomico e cambiati regolarmente, per esempio ad ogni round. Un approccio può essere quello proposto da Algorand [20], in cui si utilizzano le VRF [33]. I comitati cooperano quindi alla conferma e creazione del nuovo blocco, comunicando mediante un meccanismo di comunicazione *inter-committee*, discusso in seguito. Ogni comitato svolge il proprio ruolo durante uno stadio e invia il risultato del lavoro ai membri dei comitati dei successivi round/stadi.

Si denota con B_i il blocco prodotto come output dell'ultimo stadio nel round i , mentre con B^i il blocco che contiene le transazioni che entrano nella pipeline nel round i . Se la pipeline ha q stadi, le transazioni che entrano nella pipeline al round i , e che sono accettate, faranno parte del blocco prodotto dal comitato dell'ultimo stadio al round $i + q - 1$. Quindi, $B^i = B_{i+q-1}$. Le transazioni confermate in B^i saranno visibili a tutti i nodi della rete a partire dall'inizio del round $i + q$.

Differentemente da altre sistemi presentati nei precedenti paragrafi, l'intero stato della blockchain non viene memorizzato da ogni nodo, non solo per le eccessive dimensioni richieste che aumentano nel tempo, ma anche perché richiede un processamento da parte di ogni nodo proporzionale al carico. Come è stato descritto nel Paragrafo 2.2, un nodo può creare e partecipare alla conferma di un insieme di transazioni anche senza dover memorizzare l'intero stato. Infatti, esso è memorizzato in una DHT, dove ogni nodo, denominato *storage node*, ne memorizza solo una parte, quello per cui è *autorità*. Sulla DHT è costruito un Merkle Tree W *virtuale* sull'intero spazio degli indirizzi,

in cui ogni foglia è un indirizzo. Gli storage node memorizzando solo una parte dello stato, ovvero un sottoinsieme degli indirizzi, posseggono solo una parte di W (pADS), che è potato e ha per foglie gli indirizzi per cui esso è *autorità*.

Come descritto nel Paragrafo 2.2, un nodo n che crea una transazione ha la responsabilità di fornire le prove crittografiche dei conti associati agli indirizzi che sono coinvolti nella transazione e che la stessa modifica. Il nodo n ottiene le prove crittografiche dagli storage node autorità per gli indirizzi coinvolti nella nuova transazione. Poiché ogni storage node possiede una versione potato del Merkle Tree W , può fornire tali prove per gli indirizzi che memorizza. Tuttavia i conti e le rispettive prove sono indietro nel tempo rispetto a quando verranno confermate dagli opportuni comitati. Si dice quindi che una proof p è *relativa* ad uno stato della blockchain ottenuto applicando le transazioni nel blocco B , intendendo che è valida rispetto allo state root-hash contenuto nel blocco B . In modo più semplice, si può dire che p è relativa a B . Ogni nodo della rete, memorizza solo gli ultimi d blocchi che ha ricevuto, per cui possiede i blocchi $B_{i-1} = B^{i-q}, \dots, B_{i-d} = B^{i-q-d+1}$. Quindi, una proof p relativa a B_j è considerata *scaduta* al round i , se $i > j+d$.

Poiché nel round i l'ultimo blocco disponibile è B_{i-1} , uno storage node per ogni indirizzo richiesto, risponde con uno stato ed una proof relativa a B_{i-1} . Inoltre, visto che nel modello, senza perdere di generalità, un nodo impiega un round per ottenere tutte le proof relative agli elementi di stato coinvolti in una nuova transazione, affinché i comitati del primo stadio della pipeline possano validare le proof relative ai conti coinvolti nelle transazioni, $d \geq 2$.

Infine si assume che non ci siano problemi di rete, per cui ogni nodo riceve tutti i messaggi inviati da un nodo sorgente.

3.3 Architettura e ruolo dei comitati

In questo paragrafo è descritta l'architettura e il ruolo di ogni comitato dal momento in cui un nodo crea una transazione, fino alla sua conferma. La Figura 3.1 mostra l'architettura e il flusso di informazioni scambiate tra i comitati.

Ogni nodo può creare una transazione. Come descritto nel paragrafo precedente, una nuova transazione deve contenere il saldo dei conti associati e le proof di integrità relative, ottenute durante il round precedente dagli storage node autorità per gli elementi di stato coinvolti nella transazione. Le nuove transazioni (candidate) non sono inviate in broadcast come nelle soluzioni tradizionali, ma ad un ristretto numero di nodi.

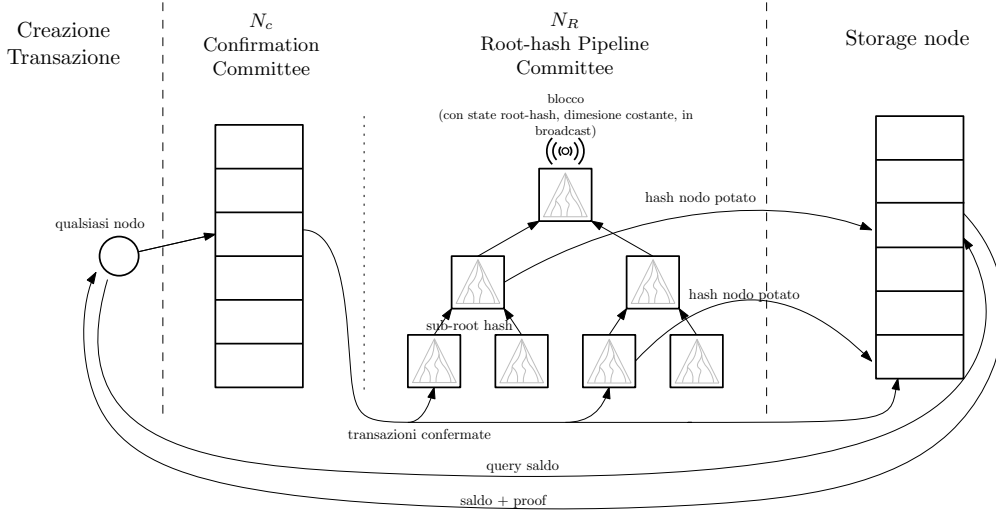


Figura 3.1: Flusso delle informazioni dell'architettura proposta.

Il ruolo di validazione e conferma delle nuove transazioni è eseguito dai *Confirmation Committee* (CC). Ogni Confirmation Committee è denotato con C_k , con $k = 1, \dots, N_C$, dove N_C è il numero di CC. Quando è importante, si denota con C_k^i il k -esimo Confirmation Committee relativo al round i . Come detto prima, per motivi di sicurezza, ogni Confirmation Committee tra un round e l'altro è formato da membri differenti. Il nodo che crea la transazione t , la invia a C_k^i tale che $k = \text{hash}(t_s) \bmod N_C$, dove t_s è la sorgente della transazione t , e si dice che C_k^i è *responsabile* per t . Ogni nuova transazione t è ricevuta da C_k^i prima dell'inizio del round i , in modo tale che C_k^i possa processare t durante il round i . L'insieme di transazioni per cui C_k^i è responsabile è denotato $P(C_k^i)$. Si denota con $P^i = \bigcup_k P(C_k^i)$ l'insieme di tutte le transazioni processate da tutti i Confirmation Committee nel round i . Il risultato di un C_k^i è una lista di transazioni valide e confermate denotato A_k^i , con $A_k^i \subseteq P(C_k^i)$.

C_k^i , affinché possa validare correttamente le transazioni, per ogni transazione t ottiene il saldo associato a B^{i-1} , in modo da verificare che t_s non diventi negativo applicando la transazione t . Poiché le proof fornite in t sono relative a $B_{i-2} = B^{i-q-1}$, esse sono troppo vecchie. Infatti, i conti associati potrebbero essere stati modificati negli ultimi q round, i cui blocchi non sono ancora disponibili (perché la loro creazione è ancora in corso dalla pipeline). Quindi, ogni C_k^i deve conoscere le transazioni confermate, e quindi i cambiamenti allo stato, dai Confirmation Committee dei round precedenti $C_k^{i-q}, \dots, C_k^{i-1}$, ovvero $A_k^{i-q}, \dots, A_k^{i-1}$. Queste transazioni devono essere utilizzate per aggiornare tutti i conti associati alle transazioni in $P(C_k^i)$ per

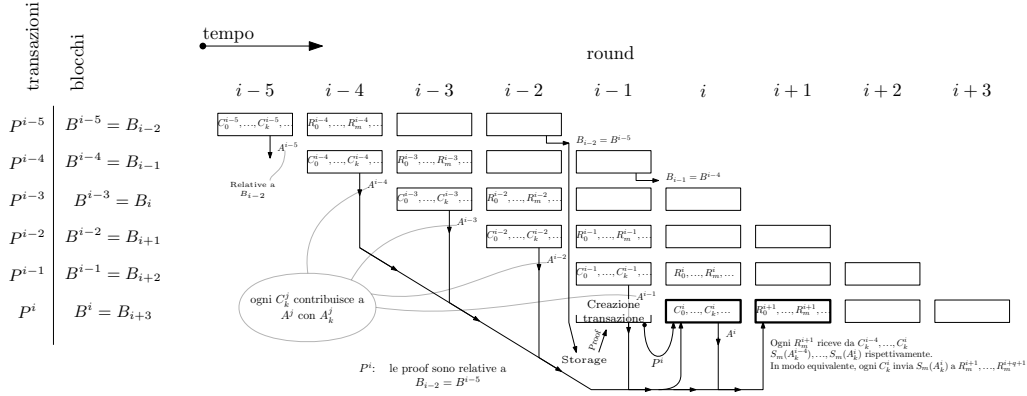


Figura 3.2: Un esempio di esecuzione della pipeline con quattro stage. Nell'immagine sono evidenziate gli input per C_k^i e R_m^{i+1} .

ottenere lo stato di B^{i-1} . Questo processo è chiamato *time-updating*. La Figura 3.2 mostra la pipeline e riporta gli input forniti ad un generico C_k^i .

Ogni C_k^i esegue il seguente algoritmo, tramite un protocollo di consenso:

Algoritmo 1. (*Comportamento dei Confirmation Committee*)

1. Verifica che ogni transazione in $P(C_k^i)$ rispetti le regole sintattiche e le proof non sono scadute. Elimina le transazioni che non passano queste verifiche, generando $P'(C_k^i) \subseteq P(C_k^i)$.
2. Seleziona una permutazione \bar{T} di $P'(C_k^i)$.
3. Sia \tilde{T} la concatenazione di $A_k^{i-q}, \dots, A_k^{i-1}$. Per ogni sorgente nelle transazioni in \bar{T} , considera l'ultimo saldo tra i conti delle transazioni in \tilde{T} e i conti forniti dalle proof delle transazioni in \bar{T} .
4. Esegui le transazioni in \bar{T} e verifica che il saldo risultante di ogni transazione non diventi negativo. Le transazioni che non rispettano questa regola sono scartate. Il risultato è la lista A_k^i ottenuto da \bar{T} dove le transazioni scartate sono omesse.

Le transazioni in A_k^i si considerano *confermate* e saranno inserite nel blocco B_i . Per permettere ai Confirmation Committee dei round successivi di effettuare il time-updating, C_k^i invia A_k^i a $C_k^{i+1}, \dots, C_k^{i+q}$ ed anche ad altri comitati, come mostrato in seguito.

La lista delle transazioni confermate nel round i è denotato $A^i = \bigcup_k A_k^i$, e rispetta lo stesso ordine delle transazioni in ogni A_k^i . Le transazioni in A_k^i sono inviate anche agli storage node, anche se il blocco B^i non è stato ancora creato.

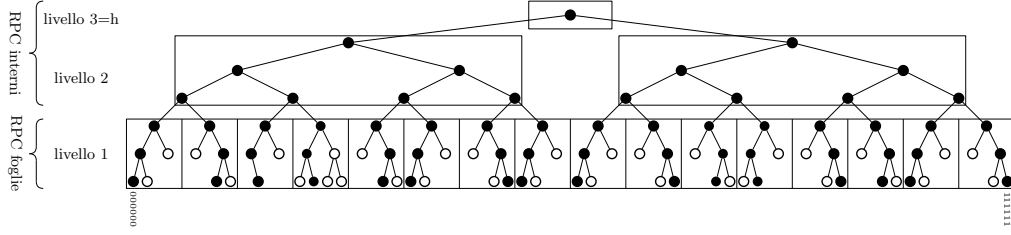


Figura 3.3: Merkle Tree W dello stato diviso tra gli RPC. I nodi bianchi sono potati.

La creazione del blocco $B^i = B_{i+q-1}$ richiede il calcolo dello state root-hash. Esso si ottiene dal root-hash del Merkle Tree W relativo all'intero spazio dello stato, che richiede il calcolo di tutti gli hash dei nodi di W . Questo è eseguito da N_R comitati, denominati *Root-hash Pipeline Committee*, o *RPC*. Ad ogni RPC è associato una parte di W , denominato *albero sotteso* all'RPC. Gli RPC sono disposti ad albero, denominato *albero degli RPC*, come rappresentato nella Figura 3.3.

Ogni RPC ha il compito di calcolare gli hash del proprio albero sotteso durante il proprio round. Esistono due tipi di RPC: (1) gli RPC *foglie*, che sono gli RPC disposti come foglie nell'albero degli RPC, e (2) gli RPC *interni*, ovvero tutti gli altri. Ogni RPC foglia è responsabile di un intervallo contiguo dello spazio degli indirizzi che rappresenta le foglie di W . Si dice che un RPC è autorità per questo intervallo di indirizzi. Poiché solo una parte dello stato è modificato dalle nuove transazione, gli RPC foglie operano su un albero sotteso che è potato. Questo albero ha per foglie solo gli elementi di stato per cui l'RPC è autorità e che sono stati modificati dalle transazioni nel round corrente. Gli alberi sottesi degli RPC interni sono invece alberi binari completi. Gli RPC sono divisi in *livelli*, numerati da 1 ad h . Gli RPC foglie si trovano al livello 1, mentre a livello h è presente un unico RPC, radice dell'albero degli RPC. Ad ogni livello corrisponde uno stadio della pipeline. Quindi il numero totale di stadi è $q = h + 1$. Ogni albero sotteso ad un RPC ha per radice un nodo, denominato *sub root-hash*. Tutti gli RPC a livello $i < h$ calcolano il proprio *sub root-hash* e lo inviano ai propri genitori nell'albero degli RPC. L'RPC radice dell'albero degli RPC crea il blocco contenente lo state root-hash per il round corrente e lo invia in broadcast a tutti i nodi della rete.

Il generico RPC foglia del round $i + 1$ ed autorità dell' m -esima porzione dello spazio degli indirizzi è denotato con R_m^{i+1} . Gli RPC foglie si trovano al secondo stadio della pipeline, per cui ricevono come input A^i , che è l'output dei Confirmation Committee del primo stadio. Tuttavia ogni RPC foglia non ha bisogno di tutte le transazioni in A^i , ma solo quelle che coinvolgono gli

indirizzi per cui l'RPC è autorità. Se t è una transazione in A_k^i , C_k^i invia la transazione ad R_m^{i+1} solo se la sorgente o la destinazione di t è un indirizzo per cui R_m^{i+1} è autorità. Ogni Confirmation Committee invia ogni transazione a due RPC foglie. Si denota con $S_m(A^i) \subseteq A^i$ l'insieme di transazioni che coinvolgono indirizzi che ricadono nell'intervallo m e che sono ricevuti da R_m^{i+1} . Ogni R_m^{i+1} ha il compito di calcolare il sub root-hash del proprio albero sotteso relativo al blocco B^i . Per questo è necessario lo stato dell'albero sotteso relativo al blocco B^{i-1} . Poiché le proof fornite in $S_m(A^i)$ sono relative al blocco $B_{i-2} = B^{i-q-1}$, non possono essere utilizzate da sole per il calcolo degli hash dell'albero sotteso relativo a B^{i-1} . Infatti gli indirizzi associati potrebbero esser stati aggiornati dalle transazioni in A^{i-q}, \dots, A^{i-1} per i quali i blocchi corrispondenti non sono ancora disponibili. Quindi, ogni R_m^{i+1} deve conoscere $S_m(A^{i-q}), \dots, S_m(A^{i-1})$. R_m^{i+1} utilizza tutte le proof in $S_m(A^{i-q}), \dots, S_m(A^{i-1}), A^i$. R_m^{i+1} per calcolare gli hash del proprio albero sotteso, come descritto nel Paragrafo 2.2. Questo processo è chiamato *time-shifting*. Per permettere agli RPC foglie dei successivi round di svolgere il proprio compito, ogni C_k^i invia $S_m(A_k^i)$ a $R_m^{i+1}, \dots, R_m^{i+q+1}$.

Mentre gli RPC foglie hanno bisogno di uno stato per poter effettuare il time-shifting, gli RPC interni sono stateless. Essendo l'albero sotteso completo, hanno bisogno solamente dei sub root-hash calcolati dagli RPC figli nell'albero degli RPC, che corrispondono agli hash delle foglie dell'albero sotteso dell'RPC interno.

Ogni storage node n che memorizza la potatura di W , le cui foglie sono gli indirizzi per cui n è autorità, non può calcolarsi direttamente gli hash del proprio pADS. Quindi, durante il calcolo di W relativo al blocco B^i , gli RPC inviano questi hash ai nodi che ne hanno bisogno. Questo può essere realizzato in maniera del tutto trasparente agli RPC, creando un canale *publish/subscribe* [18], a cui gli storage node interessati per un sottoinsieme di nodi potati si iscrivono.

3.4 Teorema di correttezza

In questo paragrafo si dimostra formalmente la correttezza dell'architettura riportata nel Paragrafo 3.3.

Lemma 1. (*Correttezza dell'algoritmo di conferma*). *L'Algoritmo 1 non restituisce mai una sequenza le cui transazioni comportano una violazione del vincolo del saldo non-negativo.*

Dimostrazione. Per costruzione dello step 4 dell'Algoritmo 1. □

Teorema 1. (*Correttezza*). *Sia P^i un insieme di transazioni processate, nel round i , dai Confirmation Committee C_k^i e sia A_k^i la lista delle transazioni confermate da ogni C_k^i . Le seguenti affermazioni sono vere.*

1. *In ogni lista $A^i = \bigcup_k A_k^i$ tale che A^i preserva l'ordine delle transazioni contenute in ogni A_k^i , il vincolo del saldo non-negativo è rispettato.*
2. *Lo state root-hash di $B^i = B_{i+q-1}$ è il root-hash del nuovo stato ottenuto dopo l'applicazione delle transazioni in A^i .*
3. *Gli storage node conoscono le proof degli indirizzi per cui sono autorità.*

Dimostrazione. Riguardo l'affermazione 1, per il Lemma 1, A_k^i soddisfa il vincolo del saldo non-negativo e per ipotesi l'ordine delle transazioni in A^i è preservato. Poiché per ogni k gli indirizzi modificati in A_k^i non sono modificati in nessun A_j^i con $j \neq k$, segue l'affermazione.

Riguardo l'affermazione 2, si noti che ogni RPC foglia R_m^{i+1} considera tutte le transazioni in $S_m(A^{i-q}), \dots, S_m(A^{i-1})$, che riguardano gli indirizzi per cui R_m^{i+1} è responsabile, rispettando il loro ordine. Ogni R_m^{i+1} può calcolare correttamente il proprio sub root-hash e passarlo al proprio RPC genitore. Infatti, se un nodo interno nell'albero sotteso è coinvolto in una transazione, R_m^{i+1} riceve le proof della transazione stessa. Se un nodo interno dell'albero sotteso non è coinvolto in alcuna transazione o è potato o è la radice di un sottoalbero potato. Nel primo caso, R_m^{i+1} non ne ha bisogno. Nel secondo, R_m^{i+1} riceve l'hash da una delle proof presenti in $S_m(A^{i-q}), \dots, S_m(A^{i-1})$. Infine, ogni RPC interno, riceve dai propri RPC figli, gli hash delle foglie del proprio albero sotteso, per cui il calcolo del sub root-hash è banale. Segue quindi l'affermazione.

Riguardo l'affermazione 3, si noti che gli RPC calcolano il root-hash della versione potato W' di W , in cui le foglie di W' sono tutti gli indirizzi U . Ogni storage node n memorizza una versione potato W_n di W , in cui le foglie di W_n sono tutti gli indirizzi U_n che n memorizza. Poiché $U_n \subseteq U$, anche $W_n \subseteq W'$. Quindi, tutti i sub root-hash dei sottoalberi potati di W_n sono conosciuti da uno degli RPC, il quale può inviarlo ad n . \square

3.5 Teorema di scalabilità

In questo paragrafo, si dimostra formalmente la scalabilità dell'architettura. Si assume, per semplicità, che i saldi modificati durante un round siano uniformemente distribuiti sullo spazio degli indirizzi. Sia f la frequenza delle transazioni che arrivano alla blockchain. Sia Δ la durata di un round. Sia

$m = 2f\Delta$ il numero di indirizzi il cui saldo viene modificato in un round, assumendo che le transazioni coinvolgano indirizzi distinti. Sia \tilde{W} la versione di W potata che ha solo m foglie, quelle il cui saldo è modificato in un round. Esiste un livello l di \tilde{W} al disopra del quale \tilde{W} è un albero binario completo. Più m è grande, più la parte potata diventa piccola ed l si avvicina alle foglie.

Sia j il massimo numero di hash che un RPC può calcolare in un round. Si noti che j è costante, poiché dipende dalla capacità computazionale dei nodi di un comitato. Sia e il massimo numero di indirizzi il cui saldo viene modificato che un RPC foglia R sia in grado di processare in un round. Ovviamente e dipende da j e come sono distribuiti gli indirizzi nello spazio degli indirizzi di cui R è autorità. Tuttavia, per ipotesi gli indirizzi modificati sono uniformemente distribuiti, per cui e è uguale per tutti gli RPC foglia. Si assume che j sia grande abbastanza in modo che la radice dell'albero sotteso ad un RPC foglia sia sopra il livello l . Quindi, l'albero sottostante U di un RPC interno R è binario e completo. Sia k l'altezza di U . Il numero di nodi di U è $2^k - 1$. Gli RPC figli di R sono 2^{k-1} . In ogni round, ogni RPC deve calcolare un hash per ogni nodo del proprio albero sottostante U . Il massimo numero di nodi in un albero sottostante ad un RPC interno è $\hat{j} = 2^{\hat{k}} - 1$, dove \hat{k} è il più grande numero intero tale che $\hat{j} \leq j$, o in maniera equivalente $\hat{k} = \lfloor \log_2(j+1) \rfloor$. L'altezza massima di un di un albero sottostante ad un RPC è \hat{k} .

Sia $S(N, f)$ un sistema di blockchain, avente un'architettura descritta nel Paragrafo 3.3, con N nodi ed un carico di frequenza f .

Lemma 2. *Sia $S(N, f)$ una blockchain, composta da N nodi con un carico di frequenza f . Sia e il massimo numero di indirizzi il cui saldo è stato modificato che un RPC foglia può processare in un round, e \hat{j} il massimo numero di hash che un RPC interno può calcolare in un round. Se S è ben dimensionato, il numero di RPC foglie è almeno $2^{\lceil \log_2(m/e) \rceil}$ ed il numero di RPC interni è almeno $\left\lceil \frac{2^{\lceil \log_2(m/e) \rceil - 1}}{\hat{j}} \right\rceil$, in cui $m = 2f\Delta$ e Δ è la durata di un round.*

Dimostrazione. Gli RPC foglie sono almeno $\lceil m/e \rceil$ e poiché sono le foglie di un albero completo, il loro numero è una potenza di 2. Quindi devono essere 2^g con $g = \lceil \log_e(m/e) \rceil$.

Quando m aumenta, il numero di risorse usate in ogni RPC foglia aumenta. Quando le risorse di un RPC foglia sono sature, il loro numero raddoppia. Immediatamente dopo un raddoppio, le loro risorse sono utilizzate a metà. Aumentando m , le risorse utilizzate vanno da m alla massima capacità computazionale, che si ha subito prima di un raddoppio.

Si consideri l'albero composto dagli RPC interni W_I , la sua altezza è g . Poiché gli RPC foglia sono 2^g , i nodi di W_I sono $2^g - 1$. Quindi il numero di

RPC interni è $\left\lceil \frac{2^g-1}{\hat{j}} \right\rceil$. Da notare che sia il numeratore che il denominatore rappresentano la dimensione di un albero binario completo, con altezza g e \hat{k} , rispettivamente. La parte intera del risultato della divisione rappresenta il numero di RPC interni con una dimensione dell'albero sottostante pari a \hat{j} . Il resto è la dimensione della radice dell'albero degli RPC che è più piccolo di \hat{j} . \square

Teorema 2. (*Scalabilità*). *Sia $S(N, f)$ una blockchain well-provisioned composta da N nodi ed un carico di frequenza f . Per ogni $\alpha > 1$ tale che αN è intero, la blockchain $\bar{S}(\alpha N, \alpha f)$ è well-provisioned, supponendo un carico uniformemente distribuito sullo spazio degli indirizzi.*

Dimostrazione. Sia $S(N, f)$ un sistema well-provisioned immediatamente dopo un raddoppio, ovvero con gli RPC foglie al minimo delle risorse computazionali utilizzate. In S e in \bar{S} i comitati hanno la stessa potenza computazionale. Si vuole mostrare che αN nodi sono sufficienti per formare dei comitati in grado di processare in carico αf .

Un carico di frequenza f , genera un numero di transazioni $f\Delta$ per round. Sia N_C il numero di Confirmation Committee in S . Poiché, per ipotesi, S è well-provisioned, ogni CC è in grado di processare $f\Delta/N_C$ transazioni per round. In \bar{S} il carico è αf , quindi, con αN_C CC, si ha che ogni CC in \bar{S} processa lo stesso numero di transazioni che in S .

Si utilizzano i simboli m , e , \hat{j} e g con lo stesso significato di prima. Subito dopo un raddoppio, m/e è una potenza di 2, $g = \log_2(m/e) + 1$, per il Lemma 2 il numero di RPC in S è $N_R = 2^g + \left\lceil 2^g/\hat{j} \right\rceil = 2m/e + \left\lceil 2m/(e\hat{j}) \right\rceil$. Si considera ora il numero di RPC \bar{N}_R necessari in $\bar{S}(\alpha N, \alpha f)$. Per $\alpha = 2^t$ con t positivo ed intero, $\bar{N}_R = 2\alpha m/e + \left\lceil 2\alpha m/(e\hat{j}) \right\rceil$. Poiché $\left\lceil 2\alpha m/(e\hat{j}) \right\rceil \leq \alpha \left\lceil 2m/(e\hat{j}) \right\rceil$, $N_R \leq \alpha N_R$.

Quindi, l'incremento richiesto da \bar{S} a partire da S del numero di CC ed RPC è al massimo di un fattore α e \bar{S} ha αN nodi. Quindi \bar{S} è well-provisioned. \square

3.6 Comunicazione inter-committee

Nel paragrafo precedente, nella descrizione dell'architettura, si è citata una forma di comunicazione tra comitati, o *comunicazione inter-committee*, in modo che un comitato possa inviare dei dati ad un altro comitato del round successivo, oppure un nodo possa inviare la transazione candidata al CC responsabile. Un nodo non comunica con un comitato in unicast. Questo richiederebbe infatti la conoscenza di tutte le destinazioni, che è un problema

di scalabilità considerando che i membri di ogni comitato cambiano ad ogni round. Un approccio basato su multicast può essere invece una soluzione, non utilizzando però approcci tradizionali, come [19], che poco si adattano alle specifiche richieste dall'architettura.

In seguito è presentata un'analisi delle specifiche di ogni comunicazione multicast. Sia N il numero dei nodi nella rete. Siano N_C , N_R , e , m , \hat{j} e q variabili con lo stesso significato dei precedenti paragrafi. Sia n un nodo generico nodo della rete che crea una transazione candidata. Sia S la dimensione dello spazio degli indirizzi. Sia R^i un Root-hash Pipeline Committee nel round i .

Sono stati individuati cinque flussi multicast, riportati nella Tabella 3.1.

In particolare, si devono tenere in considerazione i seguenti aspetti per il multicast nella comunicazione tra comitati oppure per inviare una transazione candidata al CC autorità:

- I membri di un comitato cambiano frequentemente, ad ogni round;
- I gruppi multicast devono essere pronti in anticipo rispetto a quando devono essere effettivamente utilizzati;
- I gruppi multicast sono necessari solo per un round.

Il problema della realizzazione di un multicast che rispetti queste specifiche rimane un problema aperto.

L'ultimo aspetto, una volta realizzata la comunicazione multicast, riguarda l'accettazione di un messaggio da parte di un comitato C_{out} ricevuto dal comitato C_{in} . Infatti, C_{in} potrebbe essere composto da nodi malevoli, che possono o decidere di non inviare il messaggio o di cambiarne il contenuto a proprio piacimento. Un comitato C_{out} interessato a ricevere messaggi da parte di comitato C_{in} , si iscrive ad un gruppo multicast come subscriber. C_{in} invia i messaggi come publisher del gruppo multicast. Ogni membro del comitato C_{in} invia lo stesso messaggio, che è ricevuto da ogni membro di C_{out} . C_{out} accetta un messaggio m da C_{in} solo se m è stato inviato da più della metà dei membri di C_{in} .

3.7 Discussione

In questo paragrafo si discute l'effettiva risoluzione del blockchain scalability trilemma, cercando di capire se la scalabilità limiti la decentralizzazione

	Gruppi multicast	Subscriber	Publisher
$n \rightarrow C_k$	N_C	$\frac{N}{N_C + N_R}$	$O(N)$
$C_k^i \rightarrow R_m^{i+1}$	$\lceil m/e \rceil$	$\frac{N}{N_C + N_R}$	$\frac{N_C N}{N_C + N_R} = O(N)$
$R^i \rightarrow R^{i+1}$	$\left(\frac{\hat{j} + 1}{2} \right)^{h-i-1}$	$\frac{N}{N_C + N_R}$	$\frac{\hat{j} + 1}{2} \frac{N}{N_C + N_R}$
$C_k \rightarrow DHT$	S	ciascuno storage node si iscrive ai gruppi relativi agli elementi di cui è autorità	$\frac{N}{N_C + N_R}$
$C_k^i \rightarrow C_k^{i+1}, \dots, C_k^{i+q}$	qN_C	$\frac{N}{N_C + N_R}$	$\frac{qN}{N_C + N_R}$
$R^i \rightarrow DHT$	S	ciascuno storage node si iscrive ai gruppi relativi agli elementi di cui è autorità	$\frac{N}{N_C + N_R}$

Tabella 3.1: Specifiche di ogni flusso multicast.

e/o la sicurezza, come in altri approcci presenti in letteratura. Riguardo la *decentralizzazione*, anche se ogni nodo della rete ha un ruolo diverso nella creazione del blocco, i membri ad ogni comitato sono assegnati e cambiati periodicamente in modo randomico, come in [20]. I ruoli sono quindi statisticamente omogenei. Quindi la scalabilità non impatta la decentralizzazione.

Riguardo la *sicurezza*, il Teorema 2 mostra come la scalabilità non riduce la dimensione di ogni singolo comitato. Molti attacchi, come quelli presentati nel Paragrafo 1.2.4, richiedono che l'attaccante controlli la maggior parte dei nodi di un comitato. Tuttavia, quando i membri di un comitato sono selezionati in modo randomico, l'attacco è molto più difficile. Inoltre, utilizzando approcci basati su Proof-of-Stake, ed in generale protocolli di consenso distribuito robusti, si evitano attacchi Sybil. Quindi la scalabilità non ha impatto sulla sicurezza.

Conclusioni e Sviluppi Futuri

La realizzazione di un'architettura che risolva il blockchain scalability trilemma è certamente un obiettivo molto ambizioso, in grado di estendere ad un uso globale tecnologie basate sulla blockchain in vari ambiti, come quello delle cripto-valute. È stata presentata all'interno di questo lavoro di tesi una definizione teorica di un'architettura in grado di scalare, basata su una parallelizzazione di Algorand, in cui più comitati in un round lavorano parallelamente per la creazione del prossimo blocco ed evitando la comunicazione in broadcast, che impatta fortemente la scalabilità. Si è dimostrato formalmente il suo corretto funzionamento e la scalabilità, con il teorema di correttezza e di scalabilità, rispettivamente. La scalabilità, a differenza di altre soluzioni presenti in letteratura, come lo sharding, non impatta, come dimostrato, su decentralizzazione e sicurezza. La dimensione dei comitati, infatti, rimane la medesima anche a fronte di un maggior numero di transazioni. In altre parole il carico è proporzionale al numero dei nodi, mantenendo limitato il tempo di latenza per la conferma delle transazioni candidate. Quindi si può concludere che questo lavoro di tesi è il primo risultato che risolve il blockchain scalability trilemma, considerando la scalabilità di tutti gli elementi architetturali della blockchain e non solo del protocollo di consenso.

Riguardo gli sviluppi futuri, da un punto di vista teorico, è necessaria una prova formale della sicurezza sulla base di un threat model, è importante comprendere l'impatto che ha la rimozione del vincolo di sincronizzazione di tutti i nodi della rete ed il comportamento del sistema in caso di fallimento dei comitati. Inoltre, poiché è stata assunta l'esistenza di un multicast scalabile, è interessante capire come realizzare questo tipo di protocollo, fondamentale per la comunicazione tra i comitati. Infine, si potrebbe estendere il dominio di applicabilità dell'architettura, adesso focalizzato sull'ambito cripto-valute, ad un contesto più generale, introducendo gli smart contract. Da un punto di vista pratico, si può effettuare una simulazione per determinare i parametri reali del sistema.

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] Philip A Bernstein, Vassos Hadzilacos, and Nathan Goodman. *Concurrency control and recovery in database systems*, volume 370. Addison-wesley Reading, 1987.
- [5] Maria Borge, Eleftherios Kokoris-Kogias, Philipp Jovanovic, Linus Gasser, Nicolas Gailly, and Bryan Ford. Proof-of-personhood: Redemocratizing permissionless cryptocurrencies. In *2017 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW)*, pages 23–26. IEEE, 2017.
- [6] Miguel Castro, Barbara Liskov, et al. Practical byzantine fault tolerance. In *OSDI*, volume 99, pages 173–186, 1999.
- [7] Rick Cattell. Scalable sql and nosql data stores. *Acm Sigmod Record*, 39(4):12–27, 2011.
- [8] CertiK. The blockchain trilemma: Decentralized, scalable, and secure? <https://medium.com/certik/the-blockchain-trilemma-decentralized-scalable-and-secure-e9d8c41a87b3>, 2019.
- [9] Anamika Chauhan, Om Prakash Malviya, Madhav Verma, and Tejininder Singh Mor. Blockchain and scalability. In *2018 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)*, pages 122–128. IEEE, 2018.

- [10] Jing Chen and Silvio Micali. Algorand: A secure and efficient distributed ledger. *Theoretical Computer Science*, 777:155–183, 2019.
- [11] James C Corbett, Jeffrey Dean, Michael Epstein, Andrew Fikes, Christopher Frost, Jeffrey John Furman, Sanjay Ghemawat, Andrey Gubarev, Christopher Heiser, Peter Hochschild, et al. Spanner: Google’s globally distributed database. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, 31(3):1–22, 2013.
- [12] Hung Dang, Anh Dinh, Ee-Chien Chang, and Beng Chin Ooi. Chain of trust: Can trusted hardware help scaling blockchains? *arXiv preprint arXiv:1804.00399*, 2018.
- [13] Hung Dang, Tien Tuan Anh Dinh, Dumitrel Loghin, Ee-Chien Chang, Qian Lin, and Beng Chin Ooi. Towards scaling blockchain systems via sharding. In *Proceedings of the 2019 international conference on management of data*, pages 123–140, 2019.
- [14] 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.
- [15] Gianmaria Del Monte, Diego Pennino, and Maurizio Pizzonia. Scaling blockchains without giving up decentralization and security. *arXiv preprint arXiv:2005.06665*, 2020.
- [16] John R Douceur. The sybil attack. In *International workshop on peer-to-peer systems*, pages 251–260. Springer, 2002.
- [17] Etherscan. Ethereum full node sync (default) chart. <https://etherscan.io/chartsync/chaindefault>, 2020.
- [18] Patrick Th Eugster, Pascal A Felber, Rachid Guerraoui, and Anne-Marie Kermarrec. The many faces of publish/subscribe. *ACM computing surveys (CSUR)*, 35(2):114–131, 2003.
- [19] Bill Fenner, Mark Handley, Hugh Holbrook, Isidor Kouvelas, Rishabh Parekh, Zhaohui Zhang, and Lianshu Zheng. Protocol independent multicast-sparse mode (pim-sm): Protocol specification (revised). *RFC*, 7761:1–137, 2016.
- [20] 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.

- [21] Dave Gutteridge. Japanese cryptocurrency monacoin hit by selfish mining attack. <https://www.ccn.com/japanese-cryptocurrency-monacoin-hit-by-selfish-mining-attack/>, 2018.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Anne-Marie Kermarrec and Maarten Van Steen. Gossiping in distributed systems. *ACM SIGOPS operating systems review*, 41(5):2–7, 2007.
- [25] Aggelos Kiayias, Alexander Russell, Bernardo David, and Roman Oliynkov. Ouroboros: A provably secure proof-of-stake blockchain protocol. In *Annual International Cryptology Conference*, pages 357–388. Springer, 2017.
- [26] 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.
- [27] Derek Leung, Adam Suhl, Yossi Gilad, and Nikolai Zeldovich. Vault: Fast bootstrapping for the algorand cryptocurrency. In *NDSS*, 2019.
- [28] Xiaoqi Li, Peng Jiang, Ting Chen, Xiapu Luo, and Qiaoyan Wen. A survey on the security of blockchain systems. *Future Generation Computer Systems*, 2017.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Silvio Micali. Algorand smart contracts at layer 1. <https://www.algorand.com/resources/blog/algorand-smart-contracts>, 2019, 31 Ottobre.

- [32] Silvio Micali. Algorand's smart contract architecture. <https://www.algorand.com/resources/blog/algorand-smart-contract-architecture>, 2020, 27 Maggio.
- [33] 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.
- [34] Satoshi Nakamoto. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Technical report, 2008.
- [35] Torben Pryds Pedersen. Non-interactive and information-theoretic secure verifiable secret sharing. In *Annual international cryptology conference*, pages 129–140. Springer, 1991.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Joseph Poon and Thaddeus Dryja. The bitcoin lightning network: Scalable off-chain instant payments, 2016.
- [39] 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.
- [40] Yoav Raz. The dynamic two phase commitment (d2pc) protocol. In *International Conference on Database Theory*, pages 162–176. Springer, 1995.
- [41] Jamie Redman. Bitcoin gold 51 <https://news.bitcoin.com/bitcoin-gold-51-attacked-network-loses-70000-in-double-spends/>, 2020.
- [42] 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.

- [43] Ewa Syta, Philipp Jovanovic, Eleftherios Kokoris 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.
- [44] Roberto Tamassia. Authenticated data structures. In *European symposium on algorithms*, pages 2–5. Springer, 2003.
- [45] Roberto Tamassia and Nikolaos Triandopoulos. Efficient content authentication in peer-to-peer networks, July 5 2011. US Patent 7,974,221.
- [46] Lubomir Tassev. Bitcoin in brief monday: Zencash targeted in 51hi-jacked for ransom. <https://news.bitcoin.com/bitcoin-in-brief-monday-zencash-targeted-in-51-attack-ticketfly-hijacked-for-ransom/>, 2018.
- [47] Kyle Torpey. Bitcoin mining centralization is ‘quite alarming’, but a solution is in the works. <https://www.forbes.com/sites/ktorpey/2019/07/28/bitcoin-mining-centralization-is-quite-alarming-but-a-solution-is-in-the-works/#1fed1b0530b4>, 2019.
- [48] Jordan Tuwiner. Bitcoin mining pools. <https://www.buybitcoinworldwide.com/mining/pools/>, 2020.
- [49] Visa. Visa factsheet. <https://usa.visa.com/dam/VCOM/download/corporate/media/visanet-technology/aboutvisafactsheet.pdf>, 2018.
- [50] Bitcoin Wiki. Full node. https://en.bitcoin.it/wiki/Full_node, 2020.
- [51] Bitcoin Wiki. Technical background of version 1 bitcoin addresses. https://en.bitcoin.it/wiki/Technical_background_of_version_1_Bitcoin_addresses, 2020.
- [52] Ethereum Wiki. Sharding-faqs. <https://eth.wiki/sharding/Sharding-FAQs>, 2020.
- [53] Gavin Wood. Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. *Ethereum project yellow paper*, 151:1–32, 2014.
- [54] Junfeng Xie, F Richard Yu, Tao Huang, Renchao Xie, Jiang Liu, and Yunjie Liu. A survey on the scalability of blockchain systems. *IEEE Network*, 33(5):166–173, 2019.

- [55] Brent Xu, Dhruv Luthra, Zak Cole, and Nate Blakely. Eos: An architectural, performance, and economic analysis. *Retrieved June*, 11:2019, 2018.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] Qiheng Zhou, Huawei Huang, Zibin Zheng, and Jing Bian. Solutions to scalability of blockchain: A survey. *IEEE Access*, 8:16440–16455, 2020.