

**Titolo Tesi**

Candidato:

**Luca Vicentini**

**VR408207**

Relatore:

**Prof. Nicola Fausto Spoto**



# Indice

<b>1</b>	<b>Bitcoin</b>	<b>1</b>
1.1	Introduzione . . . . .	1
1.1.1	Storia di Bitcoin . . . . .	2
1.1.2	Come funziona Bitcoin . . . . .	5
1.1.3	Transazioni Bitcoin . . . . .	6
1.1.4	Costruire una transazione . . . . .	7
1.2	Il Mining di Bitcoin . . . . .	9
1.3	Chiavi, Indirizzi e Wallet . . . . .	11
1.3.1	La Crittografia a Chiave Pubblica e le Criptovalute . . . . .	12
1.3.2	La rete bitcoin . . . . .	18
1.4	Blockchain . . . . .	19
1.4.1	Fork della blockchain . . . . .	21
1.4.2	Attacchi al consenso . . . . .	21
1.5	Alt-Chain e Alt-Coin . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Ethereum</b>	<b>23</b>
2.1	Introduzione . . . . .	23
2.1.1	Turing-completezza di Ethereum . . . . .	25
2.1.2	Dalla Blockchain generica alle DApps . . . . .	25
2.1.3	Le unità monetarie di Ethereum . . . . .	25
2.2	Le transazioni . . . . .	28
2.2.1	Gas di transazione . . . . .	29
2.2.2	Creazione contratti . . . . .	30
2.3	Smart Contract . . . . .	33
2.3.1	Ciclo di vita di uno Smart Contract . . . . .	34
2.4	Solidity . . . . .	35
2.4.1	Variabili e funzioni locali predefinite . . . . .	35
2.4.2	Funzioni di un contratto . . . . .	36
2.5	Sicurezza ed attacchi agli Smart Contract . . . . .	37
2.6	Oracoli . . . . .	40
2.7	Applicazioni decentralizzate (DApp) . . . . .	42
2.8	La macchina virtuale di Ethereum . . . . .	44
2.9	Il consenso . . . . .	49
2.9.1	Consenso tramite Proof-of-Work . . . . .	50
2.9.2	Consenso tramite Proof-of-Stake . . . . .	50

<b>3</b>	<b>Takamaka</b>	<b>53</b>
3.1	Un Framework Java per Smart Contract . . . . .	53
3.2	Salvare i file Jar sulla Blockchain . . . . .	56
3.3	Storage . . . . .	56
3.4	Creazione di uno smart contract . . . . .	57
3.5	Classi storage e la loro strumentazione . . . . .	58
3.6	La classe takamaka.lang.Contract . . . . .	61
3.7	Le annotazioni @Entry e @Payable . . . . .	62
3.8	Gas . . . . .	63
3.9	Strumentazione e Verifica del Codice . . . . .	63
3.10	Conclusioni . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Metodi Java non deterministici</b>	<b>65</b>
4.1	Analisi del package java.lang . . . . .	65
4.1.1	java.lang.Object . . . . .	65
4.2	Analisi del package java.util . . . . .	66
4.2.1	java.util.ArrayList<E> . . . . .	66
	<b>Bibliografia</b>	<b>69</b>

# Elenco delle figure

1.1	Panoramica su bitcoin . . . . .	5
1.2	Double entry transaction . . . . .	6
1.3	Catena di transazioni . . . . .	7
1.4	Transazione tra Alice e Bob . . . . .	9
1.5	Transazione di Alice inclusa nel blocco #277316 . . . . .	11
1.6	Chiave privata, chiave pubblica e indirizzo bitcoin . . . . .	13
1.7	Crittografia Ellittica . . . . .	15
1.8	Da chiave pubblica a indirizzo bitcoin . . . . .	16
1.9	Due tipologie di Wallet . . . . .	17
1.10	Network bitcoin . . . . .	19
1.11	Visualizzazione di un'evento di fork di blockchain . . . . .	21
2.1	Firma offline delle transazioni di Ethereum . . . . .	33
2.2	Web3 web decentralizzato che utilizza smart contract e tecniche P2P . . . . .	42
2.3	Architettura dell'EVM . . . . .	46

# Elenco delle tabelle

1.1	Frequenza del vanity pattern <i>1KidsCharity</i> e relativo tempo di ricerca su di un medio PC fisso. . . . .	18
1.2	La struttura di un block header . . . . .	20
2.1	Fork intermedi della blockchain Ethereum . . . . .	24
2.2	Denominazioni delle frazioni di ether. . . . .	26
2.3	Struttura base di una transazione Ethereum. . . . .	29
2.4	Descrizione dei campi della funzione sign. . . . .	31
2.5	Esempi di transazioni con relativi costi . . . . .	49

## Elenco dei codici

# Capitolo 1

## Bitcoin

Questo capitolo ha lo scopo di illustrare al lettore i concetti di *Bitcoin*, *Blockchain* e denaro digitale. Una descrizione più dettagliata la si può trovare nel testo *Mastering Bitcoin* [2], dal quale sono state prese la maggior parte delle informazioni per la stesura di questo capitolo. Consigliata è anche la lettura del white paper *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System* [5]

### 1.1 Introduzione

Bitcoin è una collezione di concetti e tecnologie che formano le basi per un sistema di denaro digitale. Le unità di valuta si chiamano, appunto, Bitcoin e vengono utilizzate per scambiare valore tra i partecipanti del network Bitcoin. Gli utenti che intendono partecipare a questa rete utilizzeranno un apposito protocollo utilizzando principalmente il canale Internet, anche se sono possibili altri network di trasporto. Sono stati resi disponibili numerosi software open source che implementano l'intero protocollo Bitcoin su di un'ampia gamma di dispositivi digitali, rendendo questa tecnologia facilmente accessibile e flessibile. A differenza delle monete tradizionali, i Bitcoin sono completamente virtuali, la moneta, infatti, è sottintesa nelle transazioni che trasferiscono valuta dal mittente al ricevente. Chi possiede Bitcoin e intende eseguire una transazione, farà uso di chiavi che permettono di avere la prova di essere i proprietari della transazione in oggetto eseguendo lo sblocco della valuta da spendere che verrà quindi trasferita al nuovo ricevente. Il possesso delle chiavi sopraccitate è l'unica prova che dimostra a chi appartiene ogni singolo Bitcoin o frazione di esso, lo smarrimento di queste chiavi implica quindi la perdita dei rispettivi Bitcoin.

Come si sarà intuito, Bitcoin è un sistema distribuito e peer-to-peer, in quanto non ha alcun server centrale o centro di controllo. I Bitcoin sono creati tramite il processo di *mining* che comporta una competizione nel cercare una soluzione di un complesso problema matematico mentre vengono processate le transazioni. Ogni partecipante al network bitcoin che esegue un'istanza completa del protocollo, può operare come "minatore" utilizzando la potenza di calcolo della propria macchina, verificando e registrando transazioni. In media ogni 10 minuti qualche nodo sarà in grado di validare le transazioni avvenute nei 10 minuti precedenti e questo miner sarà ricompensato con dei bitcoin nuovi di zecca. Il mining Bitcoin decentralizza

le emissioni di valuta, attualmente tipiche di una banca centrale, tramite questa competizione globale.

Un importante algoritmo, incorporato all'interno del protocollo Bitcoin, è quello che regola la funzione di minig su tutto il network. La difficoltà della del problema che i miner devono risolvere è infatti calcolata sulla base della potenza computazionale di tutta la rete in modo che si arrivi ad una soluzione ogni 10 minuti circa. Questo protocollo dimezza anche il tasso con cui i nuovi Bitcoin vengono emessi, questo in media ogni 4 anni. Il numero massimo di Bitcoin creati saranno 21 milioni che, con l'andamento attuale si prevede vengano evasi entro l'anno 2140. A causa delle continua diminuzione del tasso di emissione, la valuta Bitcoin è definita deflazionaria, non è soggetta quindi all'inflazione dovuta alla stampa di nuova moneta oltre il limite dato dal tasso di emissione previsto.

### 1.1.1 Storia di Bitcoin

Bitcoin è stato inventato nel 2008 con la pubblicazione del paper scientifico intitolato *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System* [5] scritto da Satoshi Nakamoto. Combinando varie invenzioni scoperte precedentemente, Nakamoto è arrivato alla creazione di un sistema di contante elettronico completamente decentralizzato che non dipende da nessuna autorità centrale, per l'emissione di nuova moneta o per la liquidazione / validazione delle transazioni. Il Problema de *double-spend*, comune nelle valute virtuali, viene quindi risolto.

La prima implementazione del network Bitcoin nasce nel 2009, in riferimento al Paper pubblicato da Nakamoto [5] e da quel momento fu visto e modificato anche da altri programmatori. Il valore di mercato di Bitcoin al momento è stimato attorno ai 75 miliardi di dollari (USD), che dipende dal tasso di cambio BTC/USD.

Satoshi Nakamoto si ritirò dalla scena pubblica nell'Aprile 2011 lasciando la responsabilità di sviluppo del codice e della gestione del network ad una fiorente comunità di volontari. Nessuno, nè Nakamoto nè chiunque altra persona può esercitare alcun controllo sul sistema Bitcoin, che opera sulla base di principi matematici completamente trasparenti.

### La soluzione ad un Problema Computazionale Distribuito

L'invenzione di Satoshi Nakamoto è la soluzione pratica ad un problema precedentemente irrisolto, conosciuto come *Byzantine Generals' Problem*. Questo problema consiste nel tentativo a concordare una linea d'azione condivisa attraverso lo scambio di informazioni su di una rete (network) non affidabile e potenzialmente compromessa. La soluzione proposta da Satoshi Nakamoto usa il concetto di *proof-of-work* per raggiungere il consenso comune senza l'utilizzo di un'autorità centrale. Questo nuovo approccio ha avuto notevoli ripercussioni sulle scienze informatiche che studiano la computazione distribuita soprattutto perché può essere applicata anche ad applicazioni molto diverse da quelle monetarie. L'utilizzo di questa tecnologia può essere utilizzata per arrivare al consenso, su reti decentralizzate, per provare l'equità di elezioni, lotterie, registro di beni, notarizzazione digitale e molto altro.



## Tipologie di client Bitcoin

Per entrare a far parte del network bitcoin e iniziare ad usare la valuta, tutto ciò che tale utente deve fare è scaricare un'applicazione oppure utilizzare una web app disponibile su appositi portali. Dal momento in cui Bitcoin è diventato uno standard sono state sviluppate numerose implementazioni del software del client bitcoin. L'applicazione di riferimento per questi progetti risulta essere *Satoshi client*, progetto open source gestito da un team di sviluppatori derivata dall'iniziale implementazione di Nakamoto. Esistono tre forme principali di client bitcoin:

1. **Full client:** o full node è quel client che salva la storia completa delle transazioni bitcoin e gestisce i wallet dell'utente. Questa tipologia di client è autonomo e non dipende quindi da altri nodi, questo comporta un notevole consumo di memoria occupata appunto dalla *blockchain*<sup>1</sup>
2. **Lite client:** client più leggero del precedente infatti gestisce i wallet utente localmente ma fa affidamento a server di terze parti per accedere alla rete e alle transazioni bitcoin. Questo client dà la possibilità ad un utente di connettersi alla rete bitcoin ma senza dover riservare numerosi GB per la memorizzazione di tutta la blockchain, attualmente sono necessari più di 190 GB.
3. **Web client:** classico client al quale si accede tramite un web browser. Questa tipologia di client non salva alcuna informazione in locale infatti anche i wallet utente sono salvati sul server di terze parti che fornisce tale servizio.

La scelta del client bitcoin è molto importante e dipende da quanto controllo si vuole avere sui propri fondi. Un *full client* offrirà all'utente un livello più alto di controllo ed indipendenza, ma fa ricadere il peso dei backup, sicurezza e spazio su disco interamente sulle sue spalle. Al contrario, un *web client*, risulta di più facile utilizzo ma il lato negativo di una simile soluzione è che introduce un rischio di controparte. Infatti la sicurezza e il controllo dei fondi è nelle mani del gestore del servizio.

## Installazione e primo avvio

Come abbiamo detto in precedenza esistono numerosi software che implementano i client bitcoin, sul testo cui facciamo riferimento [2] viene utilizzato *Multibit*<sup>2</sup>, poi nella successiva versione del libro *Mastering Bitcoin - Programming the Open Blockchain*[1] viene giustamente abbandonato e sostituito con una più recente applicazione per dispositivi mobili (smartphone android) chiamata *Mycelium*. Dopo l'installazione di questa nuova applicazione, al primo accesso, viene creato in automatico un nuovo wallet nel quale possiamo vedere una sequenza di lettere e numeri,

---

<sup>1</sup>La blockchain è una tecnologia che permette di creare e gestire un grande database distribuito per la gestione di transazioni condivisibili tra più nodi di una rete. Si tratta di un database strutturato in Blocchi, ognuno contenente più transazioni, che sono tra loro collegati in rete in modo che ogni transazione avviata sulla rete debba essere validata dalla rete stessa nell'analisi di ciascun singolo blocco. La Blockchain risulta così costituita da una catena di blocchi che contengono ciascuno più transazioni.

<sup>2</sup>Client Bitcoin ora disponibile su [multibit.org](http://multibit.org), questo software non è più supportato pertanto gli sviluppatori consigliano di spostarsi su di un qualsiasi altro client. [4]

1Cdid9KFAaatwczBwBttQcwXYCpvK8h7FK, troviamo poi anche un *QR Code* che rappresenta la stessa informazione ma che può essere più facilmente scambiata con gli altri utenti tramite l'utilizzo della fotocamera. La stringa di cui stiamo parlando rappresenta appunto l'*Indirizzo Bitcoin*<sup>3</sup> dell'utente.

## Ottenere i primi Bitcoin

Il primo e a volte più difficile step è proprio quello di acquisire bitcoin perché, diversamente dalle altre monete fisiche, non è ancora possibile l'acquisto di bitcoin in banca o nei chioschi dei cambia-valuta.

Le transazioni bitcoin sono irreversibili a differenza dei ormai classici metodi di pagamento tramite carte di credito / debito, Paypal e trasferimenti bancari che sono reversibili. Nasce perciò il rischio che un qualsiasi venditore di bitcoin venga truffato da utenti che, una volta ricevuti i rispettivi bitcoin, annulli il versamento effettuato tramite i classici pagamenti elettronici. Per mitigare questi fatti un venditore di bitcoin attende qualche giorno / settimana prima di inviare i rispettivi bitcoin, soprattutto se si tratta di un nuovo utente.

## Inviare e Ricevere bitcoin

Una volta che l'utente ha portato a termine l'installazione del software di gestione del proprio wallet, verrà creato in automatico, oltre all'indirizzo bitcoin, anche una *Private Key* casuale. L'indirizzo bitcoin, infatti, non è altro che un numero casuale che corrisponde ad una chiave privata che l'utente può utilizzare per accedere ai propri fondi. Fino al momento in cui questo indirizzo sarà referenziato come ricevente di un determinato valore in una transazione, inserita nel registro di transazioni bitcoin (*blockchain*), è semplicemente parte del gran numero di indirizzi possibili, ritenuti validi in bitcoin. Quando sarà associato ad una transazione, diventerà parte degli indirizzi conosciuti sul network bitcoin e l'utente cui ci riferiamo, potrà controllare il suo saldo sul registro pubblico.

Per meglio comprendere le prossime azioni, introduciamo due attori Alice e Joe. Alice intende acquistare dei bitcoin da Bob, più precisamente ha intenzione di investirci 10\$. Alice cede una banconota da 10\$ a Joe assieme all'indirizzo bitcoin che le appartiene, in questo modo Joe sarà in grado di inviarle la somma equivalente in bitcoin. A questo punto Joe dovrà scoprire l'attuale tasso di cambio (*exchange rate*)<sup>4</sup> in modo che possa darle la somma corretta di bitcoin. Attualmente 1 BTC vale 3762,23\$ statunitensi, perciò Joe dovrà versare ad Alice 0,0027 BTC in cambio di 10 dollari (USD). Una volta scoperto il prezzo equo per lo scambio, Joe aprirà la propria applicazione wallet e selezionerà la funzione invio bitcoin dove procederà con l'inserimento dell'indirizzo del destinatario, Alice e della somma di bitcoin da inviare. A questo punto viene costruita una transazione che assegna all'indirizzo di Alice 0,0027 bitcoin, pescando i fondi dal wallet di Joe che ha autorizzato la transazione.

---

<sup>3</sup>Gli indirizzi Bitcoin iniziano sempre con i caratteri 1 o 3, possono essere visti come un indirizzo email con la sola differenza che possono essere creati nuovi indirizzi bitcoin a volontà e ciascuno di essi redirigerà il denaro delle transazioni che lo utilizzano verso lo stesso wallet. Una pratica molto usata per migliorare la privacy sta nel creare nuovi indirizzi per ogni transazione.

<sup>4</sup>Esistono svariate applicazioni che permettono di risalire al tasso di cambio corrente tra cui: Bitcoin Charts, Bitcoin Average, ZeroBlock, Bitcoin Wisdom, ecc. . .

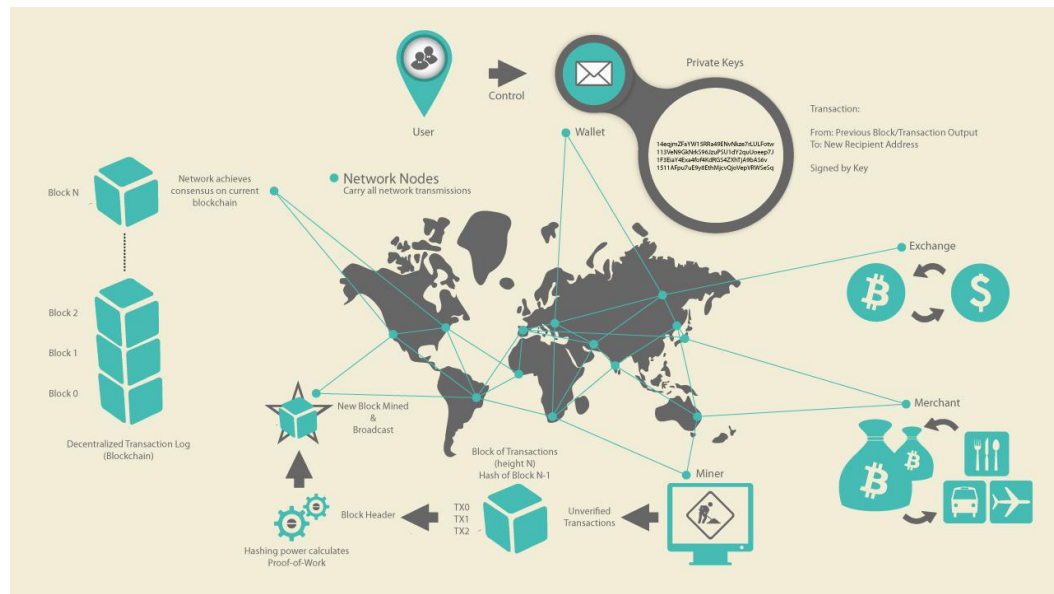


Figura 1.1: Panoramica su bitcoin

Non appena la questa transazione sarà trasmessa attraverso il protocollo peer-to-peer, si propagherà velocemente attraverso il network. In meno di un secondo la maggior parte dei nodi riceveranno tale transazione che verrà processata e successivamente registrata su di un registro globale (blockchain). A questo punto Alice può controllare che tutto sia andato a buon fine accedendo alla propria applicazione wallet che le dovrebbe indicare un saldo di 0,0027 BTC. Se non dovesse trovare i fondi potrebbe significare che la transazione è si stata propagata sulla network ma non è stata ancora inclusa nel registro delle transazioni bitcoin, in questo caso Alice vedrà comunque la transazione di Joe ma con lo stato *Unconfirmed*.

### 1.1.2 Come funziona Bitcoin

Il sistema bitcoin, al contrario dei sistemi bancari e dei classici sistemi di pagamento, è basato sulla decentralizzazione della fiducia. Invece di un'autorità fiduciaria centrale la fiducia si ottiene come proprietà emergente dall'iterazione tra diversi partecipanti nel network bitcoin. In questo capitolo esamineremo bitcoin eseguendo una singola transazione attraverso tale sistema, osservando quindi come viene gestita la fiducia e come tale transazione viene accettata dal meccanismo di consenso distribuito e venga quindi registrata sulla blockchain, il libro mastro di tutte le transazioni. Procedendo nella lettura si troveranno degli esempi di transazioni che sono state effettivamente eseguite sul network, ma che verranno associate a virtuali interazioni tra attori come Alice, Bob e Joe. Per tracciare una transazione in particolare attraverso il network bitcoin e la blockchain, si può utilizzare un blockchain explorer, piattaforma online che opera come un motore di ricerca bitcoin. Questi servizi permettono di cercare per indirizzo, transazione e per blocco e vedere i relativi flussi all'interno di questi. Tra i Blockchain Explorers più conosciuti troviamo:

- Blockchain info <https://www.blockchain.com/explorer>

Transaction as Double-Entry Bookkeeping					
Inputs	Value	:	Outputs	Value	
Input 1	0.10 BTC	:	Output 1	0.10 BTC	
Input 2	0.20 BTC	:	Output 2	0.20 BTC	
Input 3	0.10 BTC	:	Output 3	0.20 BTC	
Input 4	0.15 BTC	:			
Total Inputs:	0.55 BTC	:	Total Outputs:	0.50 BTC	
	<i>Inputs</i>			<i>0.55 BTC</i>	
-	<u>Outputs</u>			<u>0.50 BTC</u>	
	Difference			0.05 BTC (implied transaction fee)	

**Figura 1.2:** Double entry transaction

- Bitcoin Block Explorer <https://blockexplorer.com/>
- Insight <https://insight.bitpay.com/>
- Coinbase <https://www.coinbase.com/>

Ma vediamo una panoramica del sistema bitcoin, vedi Figura 1.1, notiamo che tale sistema è composto di utenti con i propri portafogli (*wallet*) che contengono delle chiavi (*key*), le transazioni si propagano attraverso il network, i miner producono, tramite una gara di computazione, la blockchain del consenso che rappresenta il libro mastro autoritativo di tutte le transazioni.

### 1.1.3 Transazioni Bitcoin

Una transazione comunica la network che il proprietario di un certo numero di bitcoin ha autorizzato il trasferimento di una parte di essi ad un altro proprietario. Quando tutta l'operazione andrà a buon fine il nuovo proprietario potrà spendere questi bitcoin e di conseguenza spenderli creando una nuova transazione verso un altro utente. Tutto questo genera una catena di passaggi di proprietà. Ogni transazione può contenere uno o più *input*, che sono i debiti verso un account bitcoin. Dall'altro lato della transazione ci sono uno o più *output*, che rappresentano i crediti aggiunti ad un account bitcoin, vedi Figura 1.2. Gli *input* e gli *output* se sommati non totalizzano necessariamente lo stesso risultato. Al contrario, gli *output* risultano poco inferiori rispetto a quello degli *input* e tale differenza rappresenta la *Transaction fee* o Commissione di Transazione sottintesa, che è un piccolo pagamento che il miner ottiene includendo la transazione all'interno del registro. Nella sezione precedente illustravamo come un nuovo potenziale utente potesse ricevere bitcoin in cambio di denaro. Era il caso di Alice e Joe. Tale transazione ha un numero di bitcoin bloccati attraverso la chiave di Alice. Il pagamento che ora Alice intende fare a Bob fa riferimento alla transazione precedente come un input e crea nuovi output per pagare la somma dovuta e per ricevere il resto. Questa rappresenta una vera e propria catena, nella quale gli input dell'ultima transazione corrispondono agli output delle transazioni precedenti. La chiave di alicie fornisce la firma che sblocca

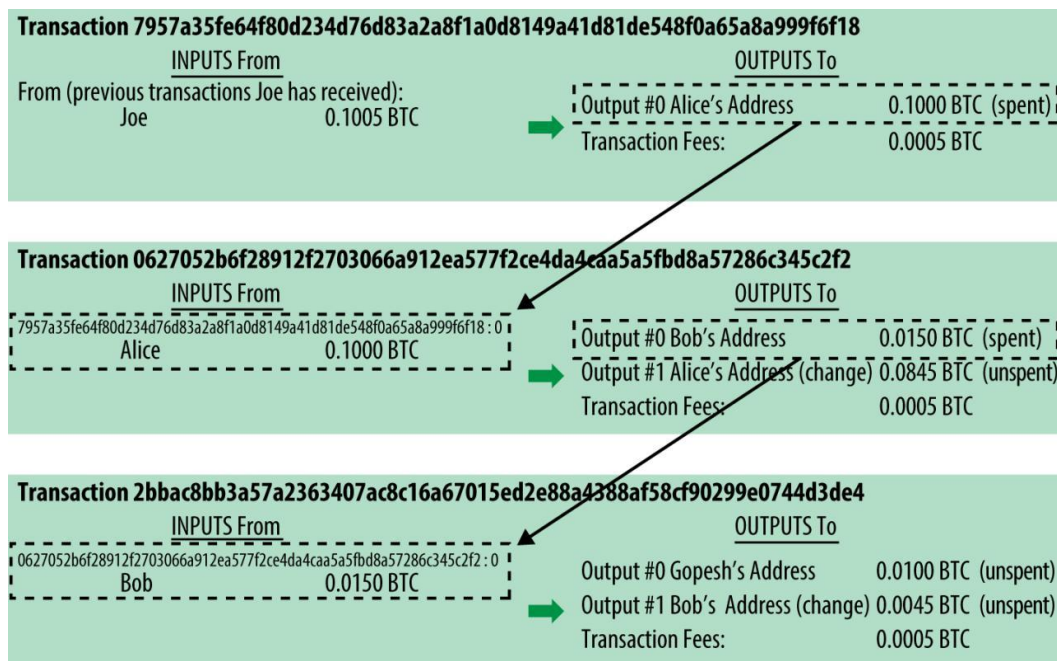


Figura 1.3: Catena di transazioni

questi importi in output delle precedenti transazioni, provando a tutta la network che lei è la legittima proprietaria di quei fondi, un esempio di catena la si può vedere in figura 1.3.

### Tipologie di transazione

Ci sono vari tipi di transazione in base alla quantità di input e output all'interno di essa. Ma vediamo nel dettaglio:

- **Common Transaction:** la forma più comune di transazione, spesso include un resto e viene ritornato al proprietario originario. Questo tipo di transazione ha un solo input e due output.
- **Aggregating Transaction:** aggrega multipli input in un singolo output. Questa operazione nel mondo reale equivale allo scambiare una pila di monete e banconote per una banconota singola di valore maggiore. Viene comunemente utilizzata per far pulizia da transazioni di valore piccolo, ricevute come resto di numerosi pagamenti precedenti.
- **Distributing Transaction:** transazione che distribuisce un input a più di un output che rappresentano multipli destinatari. Questo tipo di transazione è talvolta usato dagli esercizi commerciali per distribuire i guadagni, ad esempio quando l'azienda effettua il pagamento degli stipendi ai vari dipendenti.

#### 1.1.4 Costruire una transazione

L'applicazione wallet di Alice contiene un'apposita logica che fa in modo di selezionare gli appropriati input e output per costruire una transazione secondo

le specifiche imposte da Alice che dovrà solamente specificare una destinazione e l'importo desiderato, il resto viene fatto dall'applicazione.

## Ottenere gli input giusti

L'applicazione wallet di Alice deve essere in grado di comporre una transazione inserendo gli input, intesi come frammenti di bitcoin che le appartengono, del valore che intende inviare come pagamento a Bob. Le varie tecniche per fare ciò dipendono dalla tipologia di client che Alice possiede oppure dal fatto che tenga aggiornato un'indice completo dei propri unspent output di ogni transazione nella blockchain. Nel caso Alice non mantenga aggiornato un indice del genere, ha comunque la possibilità di ricavare tale insieme di unspent bitcoin tramite svariate API anche utilizzando un semplice client HTTP.

```

1 {
2   "unspent_outputs": [
3     {
4       "tx_hash": "186f9f998a5...2836dd734d2804fe65fa35779",
5       "tx_index": 104810202,
6       "tx_output_n": 0,
7       "script": "76a9147f9b1a7fb68d60c536c2fd8...f3cc025a888ac",
8       "value": 10000000,
9       "value_hex": "00989680",
10      "confirmations": 0
11    }
12  ]
13 }
```

Quella mostrata nel riquadro qui sopra risulta la risposta ad una possibile richiesta da parte di Alice che contiene un unspent output. Viene riportata anche la referenza alla transazione nella quale questo unspent bitcoin è contenuto e il relativo valore in bitcoin, 10 milioni, equivalente a 0.10 BTC. Con questa informazione il wallet di Alice potrà costruire una transazione utilizzando questo valore come input e quindi trasferire quel valore all'indirizzo del nuovo proprietario.

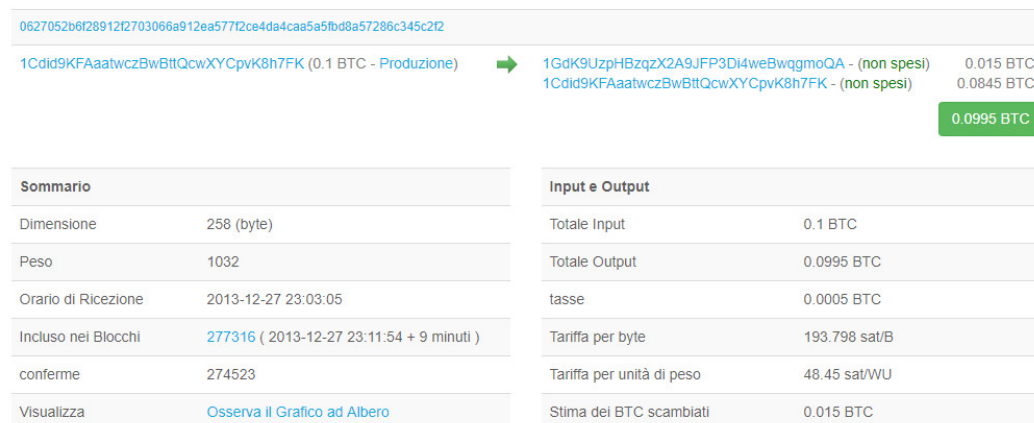
**NB:** In questo caso il wallet di Alice dispone di un unspent output con abbastanza bitcoin che riesce a coprire la sua spesa. In alcuni casi può succedere di non disporre di un unico unspent output che riesce a coprire il debito da saldare. In questi casi si dovrà procedere con l'inserimento all'interno della transazione di altri unspent output fino a coprire la spesa da sostenere. In ogni caso Alice dovrà attendersi del resto ma quello lo vedremo nella prossima sezione.

## Creare gli output

La transazione che sta per creare Alice, oltre agli input, include almeno un nuovo output che sarà creato facendo in modo che possa essere riscattato solamente dal legittimo proprietario, in questo caso Bob. Tutto ciò è possibile creando l'output in questione sotto forma di script che creerà un blocco sul valore e potrà essere riscattato solamente da chi sottoporrà una soluzione, in questo caso ci si aspetta la firma della chiave corrispondente all'indirizzo pubblico di Bob. Solo il wallet di Bob potrà presentare una simile firma dal momento che è il creatore di tale



## Transazione Ottieni informazioni su una transazione bitcoin



**Figura 1.4:** Transazione tra Alice e Bob

chiave pubblica. Questa transazione inoltre dovrà includere un'ulteriore output, dal momento in cui i fondi di Alice sono nella forma di un output di 0.10 BTC, un valore elevato se paragonato al pagamento di una cifra d'esempio di 0.015 BTC. In questo caso ad Alice spetterebbero 0.085 BTC di resto. Questa cifra andrà rappresenta il secondo output della transazione che sarà indirizzato ad Alice. Infine, per fare in modo che il network processi la transazione in tempi ragionevoli, l'applicazione wallet di Alice aggiungerà una piccola commissione di transazione (fee). Questa non viene esplicitata nella transazione ma è data dalla differenza tra gli input e gli output, quindi se Alice imposterà l'output resto a 0.0845 BTC avanzeranno 0.0005 BTC. Questa transaction fee sarà recuperata dal miner come commissione per aver incluso la transazione all'interno di un blocco e averla scritta all'interno del registro blockchain. La transazione risultante, una volta confermata ed inviata sul network, può essere vista utilizzando un'applicazione web del tipo blockchain explorer, vedi Figura 1.4.

### Aggiungere la transazione al Ledger

In questo momento la transazione tra Alice e Bob viene inviata al network e, come vediamo in Figura 1.4, risulta avere una grandezza di 258 byte. Come abbiamo visto, all'interno di essa troviamo tutto il necessario per confermare la proprietà dei fondi e assegnare loro nuovi proprietari. La presenza di tutte informazioni danno modo a Bob di verificare fin da subito la transazione controllando che gli input utilizzati corrispondano a precedenti unspent output oltre a verificare che gli importi, comprese le fee, siano adeguati. Bob dovrà aspettare in media 10 minuti per vedere la propria transazione come *confermata*, quindi inserita all'interno del Ledger.

## 1.2 Il Mining di Bitcoin

Una transazione non entra a far parte del libro mastro condiviso (blockchain) fino a che non viene verificata ed inclusa in un blocco da un processo chiamato *mining*.

Il processo di mining in bitcoin serve a due scopi:

- Il processo di mining genera nuovi bitcoin per ogni blocco. La quantità di bitcoin creata per ogni blocco è fissa e diminuisce col passare degli anni.
- Il mining genera fiducia assicurando che le transazioni siano confermate solo se è stata usata una sufficiente potenza di calcolo. Il problema da risolvere è basato su di un hash crittografico.

Ogni 10 minuti un miner entra a far parte di una competizione globale tra miners, alla ricerca di una soluzione per un blocco di transazioni. Trovare tale soluzione, chiamata *proof-of-work*, richiede decine di miliardi di operazioni hash al secondo in tutta la rete bitcoin. L'algoritmo di *proof-of-work* comporta l'effettuare ripetutamente un'operazione di hashing dell'header del blocco e un numero casuale con l'algoritmo crittografico SHA256 fino a che non emerga una soluzione corrispondente a un determinato pattern. Il primo miner a trovare tale soluzione vince il round della competizione e pubblica il blocco nella blockchain, aggiudicandosi dei bitcoin nuovi di zecca.

Al momento della scrittura di questa Tesi la difficoltà di questi problemi è così alta da rendere redditizio effettuare mining solamente con circuiti integrati specifici per l'applicazione selezionata<sup>5</sup>, nel nostro caso si tratta di centinaia di algoritmi di mining direttamente stampati su chip hardware, eseguito poi in parallelo su di un singolo chip in silicio. Un miner può far parte di una mining-pool nella quale i partecipanti dividono gli sforzi e i proventi.

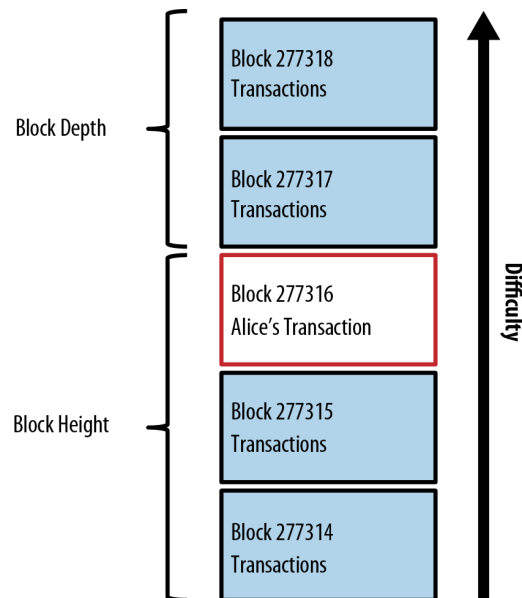
## Mining delle Transazioni presenti nei Blocchi

Una transazione trasmessa attraverso il network bitcoin non è verificata fino a quando non viene inglobata all'interno di un blocco che verrà inserito sulla cima della blockchain, questo accade in media ogni 10 minuti. Nuove transazioni fruiscono costantemente nel network da wallet utente e altri applicativi, non appena queste vengono notate dai vari miner verranno aggiunte ad una pool temporanea di transazioni non verificate, pool mantenuta da ogni singolo nodo. Mano a mano che i miner cercano di comporre un nuovo blocco vanno a verificare e quindi ad aggiungere nuove transazioni al blocco su cui lavorano, dando priorità alle transazioni la cui fee risulta più alta. Ogni miner inizia il processo di mining di un blocco di transazioni nel momento in cui riceve il blocco precedente dal network, prendendo atto di aver perso l'ultimo round della competizione. Il miner crea immediatamente un nuovo blocco, lo riempie con transazioni e con le informazioni (l'hash) del blocco precedente, e inizia a calcolare la proof of work per il nuovo blocco. Ogni miner include una transazione speciale nel suo blocco, una che paga al proprio indirizzo bitcoin una ricompensa per i nuovi bitcoin creati (attualmente 12.5 BTC per blocco). Se il miner trova una soluzione che rende il blocco valido, egli "vince" questa ricompensa perché il suo blocco "vincente" è aggiunto alla blockchain globale e la transazione di ricompensa che lui ha incluso in esso diventa spendibile. Supponendo che il miner Jing vinca la competizione, lui andrà a diffondere nel network il nuovo blocco, #277316, contenente 419 altre transazioni. Alla ricezione di questo blocco gli altri miner lo validano e

---

<sup>5</sup> ASIC, Application Specific Integrated Circuits





**Figura 1.5:** Transazione di Alice inclusa nel blocco #277316

iniziano a contendersi la generazione del blocco successivo. Qualche minuto più tardi un altro miner troverà una soluzione per il successivo blocco, #277317 che andrà a posizionarsi sulla cima della blockchain. Dal momento in cui questo nuovo blocco è basato sul blocco precedente, che conteneva la transazione di Alice, ha aggiunto una grande quantità di computazione su quel blocco, rafforzando quindi la fiducia riposta in tutte le transazioni presenti nel blocco #277316. Man mano che i blocchi si impilano uno sopra l'altro, diventa esponenzialmente più difficile invertire la transazione, rendendo il network sempre più sicuro. Questo aspetto lo si può notare graficamente nella Figura 1.5 dove vediamo il blocco #277316, contenente la transazione di Alice, al di sotto del quale troviamo 277316 blocchi fino, infatti ad arrivare al blocco #000000, conosciuto anche come *genesis block*. Per convenzione, ogni blocco con più di 6 conferme è considerato irrevocabile dal momento in cui si necessiterebbe di un'ammontare immenso di computazione per invalidarlo e di conseguenza revocare anche i successivi sei blocchi. Da questo punto in poi la transazione di Alice è stata inclusa nella blockchain e sarà visibile a tutte le applicazioni bitcoin. Ogni client bitcoin può verificare indipendentemente la transazione come valida e spendibile. Sarà in oltre possibile tracciare a ritroso il percorso completo del denaro fino alla fonte.

### 1.3 Chiavi, Indirizzi e Wallet

La proprietà dei bitcoin si stabilisce attraverso chiavi digitali, indirizzi bitcoin e firme digitali. Le chiavi digitali sono create e mantenute dai vari utenti in un file o database chiamato wallet. Le chiavi digitali nel wallet di un utente sono completamente indipendenti dal protocollo bitcoin e possono essere generate e gestite dal software del wallet dell'utente senza alcuna relazione con la blockchain o accesso

a Internet. Esse consentono molte delle interessanti proprietà dei bitcoin, incluso controllo e fiducia de-centralizzata.

Ogni transazione bitcoin richiede una firma valida per essere inclusa nella blockchain, che può essere generata solo con chiavi digitali valide; pertanto, chiunque disponesse di una copia di quelle chiavi ha il controllo del bitcoin in quel conto. Si tratta di coppie di chiavi composte da una chiave privata, che deve rimanere segreta, e una chiave pubblica. Sono in genere memorizzate all'interno del file del wallet e vengono gestite dal relativo software.

Nella parte di pagamento di una transazione bitcoin, la chiave pubblica del destinatario è rappresentata dalla sua impronta digitale, chiamata indirizzo bitcoin, che viene utilizzata allo stesso modo del nome del beneficiario su un assegno. Nella maggior parte dei casi, un indirizzo bitcoin generato corrisponde ad una chiave pubblica. Tuttavia, non tutti gli indirizzi bitcoin rappresentano chiavi pubbliche; possono anche rappresentare altri beneficiari come gli script, che vedremo più avanti.

### 1.3.1 La Crittografia a Chiave Pubblica e le Criptovalute

La crittografia a chiave pubblica è stata inventata negli anni '70 (1970) ed è una delle basi matematiche dei computer e della sicurezza informatica. Da quando stata inventata la crittografia a chiave pubblica, sono state scoperte diverse funzioni matematiche idonee, come ad esempio l'elevazione a potenza dei numeri primi e la moltiplicazione a curva ellittica. Queste funzioni matematiche sono praticamente irreversibili, nel senso che sono facili da calcolare in una direzione e risulta essere molto difficili da calcolare nella direzione opposta. Sulla base di queste funzioni matematiche, la crittografia consente la creazione di segreti digitali e firme digitali non falsificabili. Bitcoin usa la moltiplicazione a curva ellittica come base per la sua crittografia a chiave pubblica. In bitcoin, usiamo la crittografia a chiave pubblica per creare una coppia di chiavi che controlla l'accesso ai bitcoin. La coppia di chiavi consiste di una chiave privata e un'unica chiave pubblica, l'una derivata dall'altra. La chiave pubblica è usata per ricevere bitcoin, e la chiave privata è usata per autorizzare transazioni per spenderli. C'è una relazione matematica tra la chiave pubblica e quella privata che permette alla chiave privata di essere usata per generare firme sui messaggi. Questa firma può essere validata attraverso la chiave pubblica senza rivelare la chiave privata. Nella maggior parte delle implementazioni di wallet, le chiavi privata e pubblica sono salvate insieme come coppia di chiavi per convenienza. Comunque, la chiave pubblica può essere ricavata dalla chiave privata, quindi è possibile salvare anche solo la chiave privata. Un portafoglio bitcoin contiene una raccolta di coppie di chiavi, ognuno composto da una chiave privata e una chiave pubblica. Vediamo come vengono generate queste chiavi:

- La chiave privata ( $k$ ) è un numero, di solito scelto a caso.
- Dalla chiave privata, viene utilizzata la curva ellittica, una funzione di crittografia unidirezionale, per generare una chiave pubblica ( $K$ ).
- Dalla chiave pubblica ( $K$ ), viene utilizzata una funzione di hash crittografica unidirezionale per generare un indirizzo bitcoin ( $A$ ).

La rappresentazione grafica di tutto questo lo si può vedere in Figura 1.6.

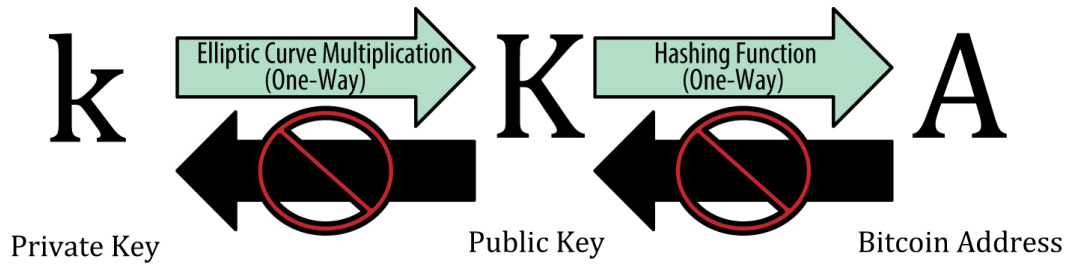


Figura 1.6: Chiave privata, chiave pubblica e indirizzo bitcoin

### Le chiavi private

Come abbiamo visto poco fa, una chiave privata è semplicemente un numero scelto casualmente. E' utilizzata per creare le firme necessarie per trasferire i bitcoin, con lo scopo di dimostrare la proprietà dei fondi utilizzati nella transazione. La chiave privata deve essere:

- **Segreta:** rivelarla a terzi equivarrebbe a dare loro il controllo dei bitcoin associati a tale chiave.
- **Protetta da perdite:** deve infatti essere conservata e protetta da perdite accidentali, se questo accadesse i fondi associati ad essa saranno anch'essi persi per sempre.

Il primo e più importante passo per generare chiavi è quello di trovare una fonte sicura di entropia, scegli un numero tra 1 e  $2^{256}$ . Il metodo utilizzato per la selezione di tale numero non risulta importante fintanto che non sia prevedibile. Il software attuale utilizza il generatore di numeri casuali fornito dall'OS inizializzato però da una fonte esterna di casualità. Più precisamente, la chiave privata potrebbe essere un qualsiasi numero tra 1 e  $n - 1$ , dove  $n$  è una costante ( $n = 1.158 * 10^{77}$ , un po' meno di  $2^{256}$ ), definito come ordine di curvatura della curva ellittica usata in bitcoin. Si sceglierà un numero casuale di 256 bit inferiore di  $n - 1$ . Questo avviene eseguendo l'algoritmo SHA256 su di una stringa casuale  $s$  dove  $|s| > 256$  bit, questo produrrà comunque un numero di 256 bit. Se tale numero risulterà inferiore di  $n - 1$  verrà accettato, altrimenti si ripeterà l'algoritmo con un input diverso. La seguente è una chiave privata casuale  $k$  mostrata nella sua rappresentazione esadecimale (256 cifre mostrate come 64 cifre esadecimali, ognuna da 4 bit):

1E99423A4ED27608A15A2616A2B0E9E52CED330AC530EDCC32C8FFC6A526AEDD

Per generare una nuova chiave tramite il client Bitcoin Core, si utilizza il comando *getnewaddress*. Per ragioni di sicurezza verrà mostrata solamente la chiave pubblica. E' comunque possibile chiedere a Bitcoin Core di esporre anche la chiave privata tramite il comando *dumpprivkey* che la mostrerà in formato Base58 checksum-encoded chiamato anche *Wallet Import Format* (WIF).

```
1 $ bitcoind getnewaddress
2 1J7mdg5rbQyUHENYdx39WVWK7fsLpEoXZy
3 $ bitcoind dumpprivkey 1J7mdg5rbQyUHENYdx39WVWK7fsLpEoXZy
4 KxFC1jmwWCoACiCAWZ3eXa96mBM6tb3TYzGmf6YwgdGWZgawvrtJ
```

NB: Il comando *dumpprivkey* non genera una chiave privata da una chiave pubblica, visto che è impossibile. Il comando semplicemente rivela la chiave privata che è già conosciuta al wallet e che è stata generata dal comando *getnewaddress*.

### Le chiavi pubbliche

La chiave pubblica è calcolata da quella privata utilizzando la proprietà di moltiplicazione delle curve ellittiche, operazione irreversibile:  $K = k * G$  dove  $k$  è la chiave privata,  $G$  è un punto costante della curva ellittica chiamato *Generator Point* e  $K$  sarà la chiave pubblica risultante. L'operazione inversa, conosciuta come trovare il logaritmo discreto, calcolando  $k$  conoscendo  $K$ , risulta difficile come provare per tutti i possibili valori di  $k$ , brute-force search.

### Crittografia e Curve Ellittiche

Le curve ellittiche in crittografia sono un tipo di crittografia asimmetrica, utilizzano coppie di chiavi  $(Pk, Sk)$ , basata sul problema del logaritmo discreto. La curva utilizzata da bitcoin è definita in uno standard detto *secp256k1* dal National Institute of Standards and Technology (NIST). La *secp256k1* è definita dalla seguente funzione:

$$y^2 = (x^3 + 7) \text{ over } (\mathbb{F}_p) \quad \text{or} \quad y^2 \bmod p = (x^3 + 7) \bmod p$$

Il  $\bmod p$  indica che questa curva è su di un campo finito di numeri primi di ordine  $p$ , che possiamo definire come  $\mathbb{F}_p$  dove  $p = 2^{256} - 2^{32} - 2^9 - 2^8 - 2^7 - 2^6 - 2^4 - 1$ , in parole povere, un numero primo molto grande. Nella matematica delle curve ellittiche c'è un punto chiamato *point at infinity*, il quale viene fatto corrispondere allo zero nell'addizione. Esiste un operatore  $+$ , chiamato addizione che dati due punti  $P_1$  e  $P_2$  sulla curva ellittica,  $\exists P_3 \mid P_3 = P_1 + P_2$ . Geometricamente, questo nuovo punto  $P_3$  viene calcolato tracciando una linea tra  $P_1$  e  $P_2$ . Questa linea intersecherà la curva ellittica nel punto addizionale chiamato appunto  $P_3 = (x, y)$ . Tale punto lo possiamo riflettere sull'asse delle  $x$  ottenendo  $P_3 = (x, -y)$ . Esistono vari casi particolari di queste addizioni tra punti, se il lettore ne fosse interessato è consigliata la lettura dei testi [2] e [1].

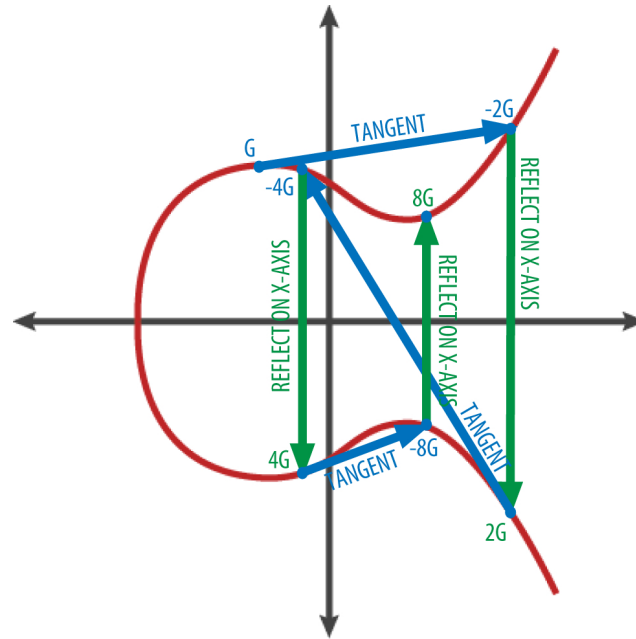
### Generazione della chiave pubblica

Partendo da una chiave privata  $k$ , numero generato casualmente, lo moltiplichiamo con un punto predeterminato sulla curva, denominato *generator point*  $G$  producendo un ulteriore punto situato in qualche altra parte della curva. Questo punto sarà la chiave pubblica  $K$ .

$$K = k * G$$

Poiché il punto di generazione  $G$  è sempre lo stesso per tutti gli utenti di bitcoin, una chiave privata  $k$  moltiplicata per  $G$  darà sempre come risultato la stessa chiave pubblica  $K$ . La relazione tra  $k$  e  $K$  è fissa, ma può essere calcolata in una sola direzione.

$$k \Rightarrow K \quad k \nLeftarrow K$$



**Figura 1.7:** Schema di funzionamento della moltiplicazione nelle curve ellittiche,  $G * k$ .

Per questo motivo la chiave pubblica,  $K$ , di un utente può essere condivisa con chiunque senza rivelare alcuna informazione circa la relativa chiave privata,  $k$ . Moltiplicare  $G$  per un qualsiasi numero  $k$  equivale ad aggiungere  $G$  a se stesso  $k$  volte di seguito. Nelle curve ellittiche, aggiungere un punto a se stesso equivale a tracciare una linea tangente al punto e trovare quindi dove questa interseca nuovamente la curva, infine riflettiamo questo punto sull'asse delle  $x$ . La dimostrazione grafica di queste operazioni eseguite in modo consecutivo lo troviamo in Figura 1.7.

### Indirizzi Bitcoin

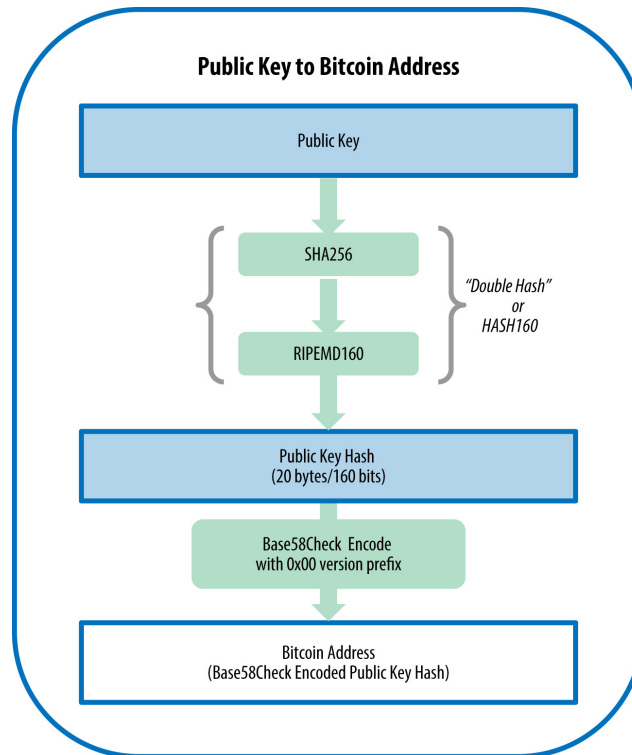
Un indirizzo bitcoin è una stringa di cifre e caratteri che può essere condivisa con chiunque desideri inviarti denaro. Gli indirizzi prodotti dalle chiavi pubbliche sono costituiti da una stringa di numeri e lettere che inizia con 1. Ecco un esempio di indirizzo bitcoin:

1J7mdg5rbQyUHENYdx39WVWK7fsLpEoXZy

Questo indirizzo è quello che appare comunemente in una transazione come *destinatario* dei fondi. Un indirizzo bitcoin può rappresentare un proprietario di una coppia di chiavi ( $Pk, Sk$ ), oppure qualcos'altro come uno script di pagamento. L'indirizzo bitcoin è derivato dalla chiave pubblica attraverso l'uso di una funzione one-way<sup>6</sup> in questo caso un hashing crittografico. tali funzioni sono usate ampiamente in bitcoin: negli indirizzi bitcoin, negli indirizzi di script e negli algoritmi di *proof-of-work*. Gli algoritmi utilizzati sono in particolare:

**SHA** (Secure Hash Algorithm) in particolare SHA256.

<sup>6</sup>Una funzione one-way è una funzione matematica unidirezionale cioè "facile da calcolare", ma "difficile da invertire"



**Figura 1.8:** Conversione di una chiave pubblica in un indirizzo bitcoin

**RIPEMD** (RACE Integrity Primitives Evaluation Message Digest) in particolare RIPEMD160.

Iniziando dalla chiave pubblica  $K$ , ne calcoliamo l'hash  $SHA256$  e successivamente l'hash  $RIPEMD160$ , producendo un numero a 160 bit (20 byte) chiamato  $A$ . La rappresentazione grafica di queste fasi la si può vedere in Figura 1.8.

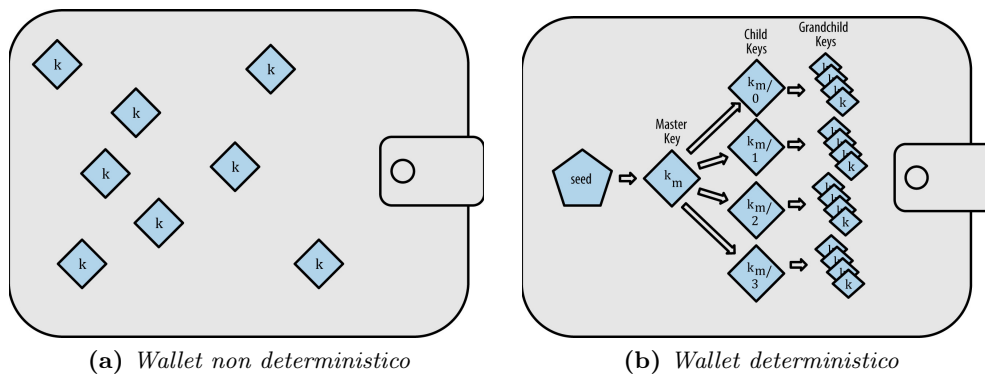
NB: l'indirizzo bitcoin non è la chiave pubblica. Gli indirizzi bitcoin sono derivati da una chiave pubblica utilizzando una funzione one-way come abbiamo appena visto. Gli indirizzi bitcoin sono quasi sempre presentati agli utenti in una codifica chiamata *Base58Check* che utilizza 58 caratteri ed un checksum per facilitarne la lettura evitando ambiguità proteggendo l'utilizzatore da errori di trascrizione.

## I Wallet

I wallet sono dei contenitori di chiavi private, non monete, solitamente implementati come file strutturati o semplici database. Gli utenti firmano le transazioni con queste chiavi, dimostrando di possedere gli output delle transazioni precedenti, utilizzati come input per le nuove transazioni. La valuta (bitcoin) è memorizzata sulla blockchain sotto forma di transazioni di output.

### Wallet non deterministici

Nei primi client bitcoin, i wallet erano semplicemente delle raccolte di chiavi private generate casualmente. Questo tipo di portafoglio è chiamato *Type-0 nonde-*

**Figura 1.9:** Due tipologie di Wallet

*terministic wallet*, sono soprannominati "*Just a Bunch Of Keys*" o JBOK, sono stati sostituiti dai wallet deterministici poiché scomodi da gestire. La scomodità di un wallet non deterministico sta nel fatto che si è obbligati ad eseguire molto spesso dei backup di tutte queste, dato che il loro smarrimento implica la perdita della valuta in bitcoin a cui sono legate. Dato che il riutilizzo degli indirizzi riduce la privacy, si è portati ad una continua generazione di nuove chiavi quindi, per sicurezza, si dovrà rieseguire il backup. Nonostante Bitcoin Core includa un portafoglio di tipo zero, il suo utilizzo è sconsigliato dato che c'è la possibilità di utilizzare un wallet di tipo deterministico. Vedi Figura 1.9a.

### Wallet deterministici

I wallet deterministici sono stati sviluppati per consentire di derivare chiavi multiple da un singolo seme *seed*. La forma più avanzata di questo tipo di wallet è il *hierarchical deterministic wallet* o *HD wallet* definito dallo standard BIP0032, come dice il nome, contengono chiavi derivate in una struttura ad albero tale per cui da ogni chiave madre si possa derivare una sequenza di chiavi figlie e per ognuna di esse si possa derivare una sequenza di chiavi nipote ecc ... ad una profondità infinita. Tale struttura la possiamo vedere in Figura 1.9b. Gli *HD wallet* offrono due importanti vantaggi rispetto alle chiavi casuali.

- La struttura ad albero può essere utilizzata per rappresentare una struttura organizzativa aggiuntiva, per esempio alcuni rami potrebbero essere utilizzati per generare chiavi impiegate poi in diversi settori aziendali.
- Gli utenti possono creare sequenze di chiavi pubbliche  $K_i$  senza avere accesso alle corrispondenti chiavi private. Questo permette di utilizzare gli HD wallet anche su di un server non sicuro che riuscirà ad emettere una diversa chiave pubblica per ogni transazione.

### Vanity Address

I vanity address sono indirizzi bitcoin validi che contengono dei messaggi mnemonici con un significato per l'uomo. Per esempio `1LoveBPzzD72PUXLzCkYAtGFYmK5vYNR33` è uno di questi in cui notiamo la presenza della parola `Love` all'inizio dell'indirizzo. Il

Dim.	Pattern	Frequenza	Tempo medio
1	1K	1 su 58 chiavi	< 1 millisecondi
2	1Ki	1 su 3,364	50 millisecondi
3	1Kid	1 su 195,000	< 2 secondi
4	1Kids	1 su 11 million	1 minuto
5	1KidsC	1 su 656 milioni	1 ora
6	1KidsCh	1 su 38 miliardi	2 giorni
7	1KidsCha	1 su 2.2 mila miliardi	3–4 mesi
8	1KidsChar	1 su 128 mila miliardi	13–18 anni
9	1KidsChari	1 su 7 milioni di miliardi	800 anni
10	1KidsCharit	1 su 400 milioni di miliardi	46,000 anni
11	1KidsCharity	1 su 23 mila milioni di miliardi	2.5 milioni di anni

**Tabella 1.1:** Frequenza del vanity pattern *1KidsCharity* e relativo tempo di ricerca su di un medio PC fisso.

processo consiste essenzialmente nel selezionare una chiave privata a caso, derivando la chiave pubblica, derivando l'indirizzo bitcoin e verificando se corrisponde al modello di vanità desiderato, ripetendo miliardi di volte fino a che non verrà trovata una corrispondenza. Questa tipologia di indirizzi non sono più sicuri di qualsiasi altro indirizzo, dipendono dalla stessa Elliptic Curve Cryptography (ECC) e Secure Hash Algorithm (SHA) come qualsiasi altro indirizzo. Generare un vanity address è un esercizio di forza bruta, come riportato in Tabella 1.1, notiamo che più grande è il pattern che desideriamo sia presente all'inizio dell'indirizzo, più difficile sarà trovarlo quindi necessiterà di più tempo computazionale.

Questi indirizzi possono essere utilizzati per migliorare o addirittura sconfiggere la sicurezza, sono infatti un'arma a doppio taglio, vediamo perché:

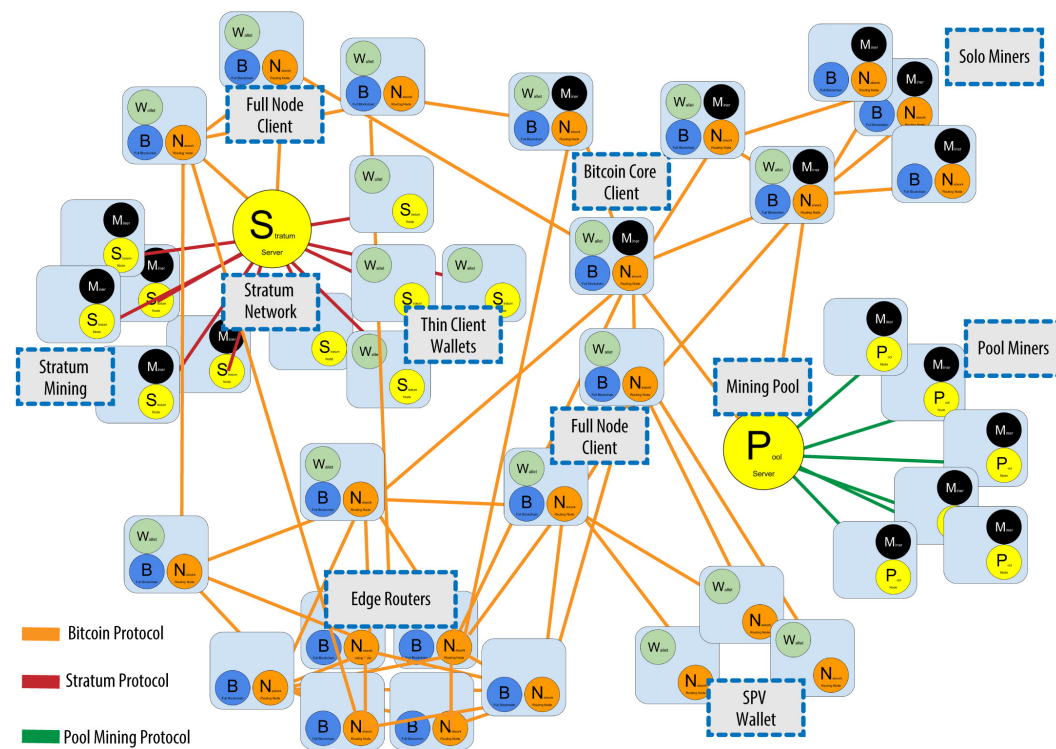
- **Migliora la sicurezza:** un indirizzo distintivo rende più difficile per gli avversari sostituire il proprio indirizzo e ingannare i clienti reindirizzando i fondi.
- **Ingannevoli:** sfortunatamente è possibile a chiunque creare un vanity address fraudolento che assomigli a qualsiasi altro indirizzo casuale, riuscendo ad ingannare i clienti altrui.

L'idea è far generare un vanity address da una vanity pool riuscendo quindi a cercare un indirizzo con un pattern abbastanza lungo, per esempio 8 caratteri. Un attaccante che intende ingannare gli utilizzatori di tale indirizzo tenteranno di aggiungere ulteriori caratteri al pattern, facendoli combaciare con quelli dell'indirizzo originale. Questa operazione implica un costo aggiuntivo per l'attaccante, se il bottino ottenibile dalla frode non fosse abbastanza alto da coprire il costo della generazione del tale indirizzo fraudolento di vanità.

### 1.3.2 La rete bitcoin

Bitcoin è strutturato come un'architettura peer-to-peer, ciò sta a significare che i computer, nodi, che partecipano alla rete sono tutti alla pari, non ci sono nodi





**Figura 1.10:** Rete estesa di bitcoin con vari tipologie di nodi, gateway e protocolli.

speciali e tutti loro condividono il compito di fornire servizio alla rete. Non esiste infatti un server o servizio centralizzato o gerarchia di qualunque tipo.

### Tipologie di Nodi e Ruoli

Nonostante tutti i nodi della rete P2P bitcoin siano uguali, possono avere differenti ruoli a seconda della funzionalità che stanno supportando. Un nodo bitcoin è una serie di funzioni: routing, database della blockchain, mining, e servizi wallet, un nodo con tutte queste funzioni è appunto chiamato *full-node*. Un esempio di network eterogeneo lo si può vedere in figura 1.10.

## 1.4 Blockchain

La struttura dati blockchain risulta un'ordinata lista di blocchi contenenti transazioni back-linked<sup>7</sup>. La blockchain è spesso visualizzata come una pila verticale, con blocchi stratificati l'uno sopra l'altro e il primo blocco serve da fondamenta della pila. La visualizzazione dei blocchi impilati uno sopra l'altro provoca l'uso di terminologie come "altezza" (height) per riferirsi alla distanza dal primo blocco, e *top* per riferirsi al blocco aggiunto più recentemente. Anche se un blocco ha solo un genitore, può temporaneamente avere multipli figli. Ognuno dei figli si riferisce allo stesso blocco del padre e contiene lo stesso hash (padre) nel campo *previous block hash*. Multipli figli

<sup>7</sup>blocchi sono collegati a ritroso, ognuno si riferisce al blocco precedente presente nella catena

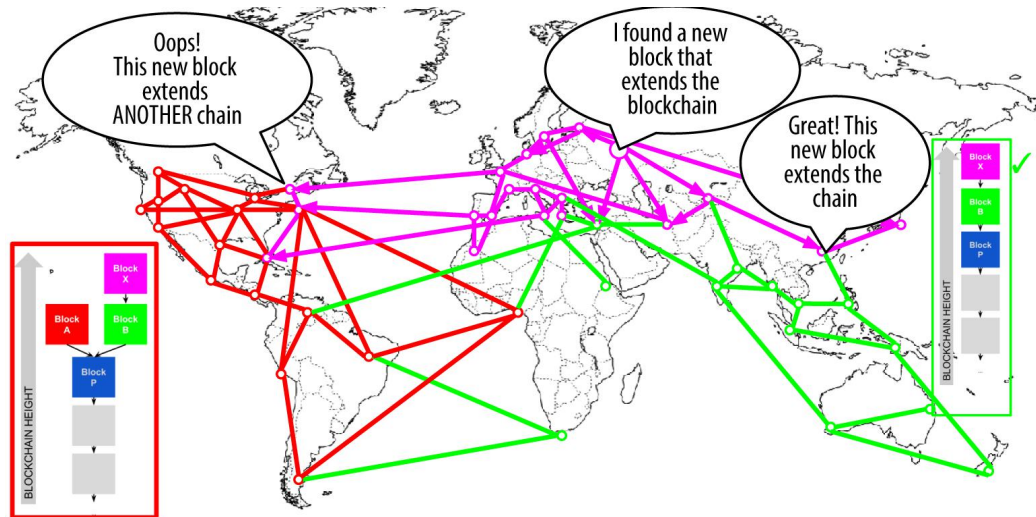
Dim.	Campo	Descrizione
4 byte	Versione	Un numero di versione per tracciare upgrade al software e/o al protocollo
32 byte	Hash del Blocco Precedente	Un riferimento all'hash del blocco precedente
32 byte	Merkle Root	Un'hash della radice del merkle tree delle transazioni di questo blocco
4 byte	Timestamp	Il tempo approssimato della creazione del blocco corrente (Unix Epoch)
4 bytes	Target di Difficoltà	Taghet di difficoltà dell'algoritmo di proof-of-work per questo blocco
4 byte	Nonce	Un contatore utilizzato per l'algoritmo di proof-of-work

**Tabella 1.2:** La struttura di un block header

emergono durante un fork della blockchain, una situazione temporanea che accade quando differenti blocchi sono scoperti quasi simultaneamente da miner differenti. In questo caso solo un blocco figlio diventa parte della blockchain e il fork viene quindi risolto. Il campo *previous block hash* risulta molto importante al fine di rendere le transazioni passate sempre più affidabili, tale campo infatti è incluso nell'header del blocco e per questo motivo influenza l'hash del blocco attuale. La modifica di una transazione all'interno di un blocco genitore porta alla modifica del proprio hash che di conseguenza porta alla modifica dell'hash figlio, questo fino al vertice della blockchain. Visto che per questo ricalcolo servirebbe un'enorme potenza computazionale, l'esistenza di una lunga catena di blocchi fa sì che la storia più profonda della blockchain sia immutabile, che è uno degli elementi chiave della sicurezza di bitcoin. Nella Tabella 1.2 troviamo indicato anche *Merkle Root*, conosciuto anche come un *binary hash tree*, è una struttura dati usata per indicizzare efficientemente e verificare l'integrità di un grande gruppo di dati. Sono usati in bitcoin per indicizzare tutte le transazioni in un blocco, producendo in sostanza un'impronta digitale dell'intero set di transazioni, provvedendo ad un efficiente processo di verifica se una transazione è inclusa nel blocco.

### Target di difficoltà

Il target determina la difficoltà e quindi influenza il tempo necessario per trovare una soluzione da parte dell'algoritmo *proof-of-work*. Come sappiamo i bitcoin vengono generati ogni 10 minuti circa questo è il battito di emissione della valuta che deve rimanere costante negli anni. Col passare degli anni si avrà un rapido aumento della potenza di calcolo degli elaboratori e inoltre sempre più utenti prenderanno parte alla network bitcoin. Questo comporta che sarà sempre più facile arrivare ad una soluzione proof-of-work, perciò si deve procedere con l'aumento della difficoltà di tale algoritmo al fine di mantenere la generazione di nuovi blocchi fissa a 10 minuti. Questo retargeting avviene in modo automatico su ogni nodo. Ogni 2016 blocchi, tutti i nodi ritarano la difficoltà proof-of-work. L'equazione è semplice, si misura il



**Figura 1.11:** Visualizzazione di un'evento di fork di blockchain: il network riconverge su di una nuova longest chain

tempo effettivo impiegato per generare gli ultimi 2016 blocchi e lo si confronta con il tempo atteso di 20160 minuti.

$$\text{New Difficulty} = \text{Old Difficulty} * (\text{Tempo degli ultimi 2016 Blocchi} / 20160 \text{ min})$$

#### 1.4.1 Fork della blockchain

La blockchain è una struttura dati decentralizzata e le diverse copie nella network non sono sempre identiche. Come sappiamo la procedura di mining è una competizione globale nel tentativo di arrivare prima ad una soluzione proof-of-work. La velocità con cui l'aggiornamento della blockchain si propaga nella network può far sì che in caso due miner trovino due proof-of-work diverse, ma comunque valide, generano all'interno della rete un fork. Questo significa che il penultimo blocco aggiunto ha generato due o più figli. Da questo momento la network bitcoin si divide in sezioni, ognuna lavorerà per cercare di aggiungere un blocco al di sopra del blocco figlio che arrivò per primo. Con molta probabilità un solo altro miner troverà una soluzione che accrescerà una delle due ramificazioni. Da questo momento in poi la blockchain valida per tutti i miner sarà quella con proof-of-work più alto, la catena più lunga. L'effetto di questa scelta andrà ad incidere sul lavoro che altri miner hanno svolto sull'altro ramo della catena. Le transazioni incluse nei blocchi di quel ramo verranno scartate, tranne quelle non incluse nei blocchi dell'attuale catena principale, che verranno rimessi in coda. Un classico fork può capitare ogni settimana ma normalmente vengono risolte dopo il calcolo di un blocco, raramente due miner trovano altre due soluzioni quasi contemporaneamente. La visione grafica degli eventi appena descritti si possono vedere in Figura 1.11.

#### 1.4.2 Attacchi al consenso

Il meccanismo di consenso in bitcoin dipende dal fatto che la maggioranza dei miner agisca onestamente, tuttavia se un miner o un gruppo di miner raggiunge

una quota significativa del potere di calcolo, essi possono attaccare il meccanismo di consenso in modo da interrompere la sicurezza e la disponibilità della rete bitcoin. Gli attacchi di consenso possono influenzare il futuro e il passato più recente (all'incirca 10 blocchi), andando a forzare eventuali fork secondari della blockchain. Un fork può essere raggiunto da qualsiasi profondità ma nella pratica la potenza di calcolo necessaria per forzare un fork molto profondo risulta essere immensa. Questo rende i blocchi, confermati  $n$  volte, praticamente immutabili. Un attacco di questo tipo non può spendere bitcoin senza l'utilizzo di firme, reindirizzare bitcoin o modificare in qualsiasi altro modo le transazioni. Gli attacchi di consenso possono interessare solo i blocchi più recenti e causare denial-of-service sulla creazione di blocchi futuri. Un attacco di questo tipo viene chiamato **Attacco del 51%**, in questo scenario un gruppo di miner, controllando il 51% della potenza di hashing della network bitcoin, hanno la possibilità di portare a termine con successo questo tipo di attacco. Possono causare deliberatamente dei fork, double-spending o eseguire attacchi di denial-of-service contro specifiche transazioni / indirizzi. Nonostante il suo nome, questo tipo di attacco in realtà non richiede il 51% della potenza di hashing. Tale soglia rappresenta semplicemente il livello al quale l'attacco è quasi sicuramente di successo. Vari gruppi di ricerca, utilizzando degli strumenti statistici, affermano che vari tipi di attacchi di consenso sono possibili utilizzando anche solo il 30% della potenza di hashing.

## 1.5 Alt-Chain e Alt-Coin

Bitcoin è il risultato di ben 20 anni di ricerca sui sistemi distribuiti e valute che ha portato ad una tecnologia rivoluzionaria: il meccanismo di consenso decentralizzato basato sulla proof-of-work. Questa invenzione è il cuore di bitcoin e ha successivamente generato un'onda di innovazione in valuta, servizi finanziari, economia, sistemi distribuiti, sistemi di votazione e contratti. Sono infatti nate delle:

**Alt-coin** valute digitali implementate utilizzando lo stesso modello di implementazione di bitcoin, la maggior parte delle implementazioni derivano da codice sorgente di bitcoin. Questo tipo di valuta sono chiamate anche *fork* di bitcoin. Poi ce ne sono anche delle alt-coin implementate da zero basate solamente sul modello blockchain ma che non riutilizzano il codice sorgente di bitcoin. Tra le principali troviamo Litecoin, Dogecoin, Freicoin, NXT.

**Alt-chain** blockchain alternative il cui vero scopo non è quello di realizzare un sistema monetario. Queste diverse implementazioni possono comunque includere anche una valuta ma questa viene emessa come token per allocare dell'altro, come una risorsa o un contratto. Tra le principali troviamo Namecoin ed Ethereum.

## Capitolo 2

# Ethereum

In questo capitolo andremo ad approfondire Ethereum, una delle alt-chain in circolazione dopo la comparsa di bitcoin. Ethereum è una piattaforma che processa ed esegue smart contract Turing-completi basandosi su di un libro mastro blockchain. Non è un clone di Bitcoin ma bensì una nuova implementazione dal design completamente indipendente. Anche se, come alt-chain, non è tenuto ad esserne provvisto, Ethereum ha una propria moneta integrata, chiamata *ether*, richiesta per pagare l'esecuzione di un contratto. La blockchain Ethereum registra i vari contratti che sono espressi in un linguaggio Turing-completo di basso livello. Uno smart contract è sostanzialmente un programma che gira su ogni nodo del sistema Ethereum. Tali contratti possono memorizzare dati, inviare / ricevere pagamenti in ether, memorizzare ether, ed eseguire una gamma infinita di azioni calcolabili, agendo come agenti decentralizzati di software autonomo.

### 2.1 Introduzione

Ethereum è spesso descritto come "the world computer". Dal punto di vista informatico Ethereum è una macchina a stati deterministica ma praticamente illimitata, costituita da uno stato sigleton accessibile a livello mondiale ed una propria macchina virtuale *EVM* che applica le modifiche a tale stato. E' un'infrastruttura open source, globalmente decentralizzata sviluppata per eseguire programmi denominati *smart contract*. Utilizza la blockchain per sincronizzare e memorizzare le modifiche di stato del sistema, assieme ad una criptovaluta chiamata *ether* utilizzata per limitare le risorse per l'esecuzione dei contratti. Diversamente da Bitcoin, che ha un linguaggio di scripting molto limitato, Ethereum è stato concepito per essere una blockchain programmabile per l'uso generico che esegue una macchina virtuale in grado di eseguire codice di complessità arbitraria ed illimitata. Il linguaggio script di Bitcoin è stato intenzionalmente vincolato a delle semplici valutazioni true / false delle condizioni di spesa, il linguaggio di Ethereum invece risulta Turing-completo, può infatti funzionare come un general-purpose computer.

#### La nascita di Ethereum

Ethereum è stato concepito in un momento in cui le persone hanno riconosciuto la potenza di un modello quale Bitcoin e stavano cercando di andare oltre alle

Numero blocco	Descrizione
Blocco #0	Frontier - Fase iniziale di Ethereum, 30 luglio 2015 - marzo 2016.
Blocco #200000	Ice Age - Hard fork per introdurre un aumento di difficoltà esponenziale, per motivare la futura transazione verso PoS.
Blocco #1150000	Homestead - Seconda fase di Ethereum lanciata a marzo 2016.
Blocco #1192000	DAO - Hard fork che ha rimborsato le vittime del contratto DAO hacked causando la separazione di Ethereum ed Ethereum Classic.
Blocco #2463000	Tangerine Whistle - Hard fork per modificare il calcolo del gas per certa operazioni di I/O.
Blocco #2675000	Spurious Dragon - Hard fork per sventare vettori d'attacco DoS e meccanismi di protezione ai replay attack.
Blocco #4370000	Metropolis Byzantium - Terza tappa di Ethereum lanciata nell'ottobre 2017.

**Tabella 2.1:** Fork intermedi della blockchain Ethereum

applicazioni di criptovaluta. L'enigma principale era: costruire su Bitcoin o avveriare una nuova blockchin? Costruire al di sopra di Bitcoin significava vivere entro gli intenzionali limiti imposti da tale rete cercando soluzioni alternative. L'insieme limitato di tipologia di dati e dimensione della memorizzazione di questi sembrava limitare il numero di applicazioni che potevano essere eseguite su bitcoin, qualsiasi ulteriore aggiunta avrebbe implicato la necessità di implementare ulteriori strati fuori catena, annullando così molti dei vantaggi nell'uso di una blockchain pubblica. Per tale progetto si necessitava di maggiore libertà e fluidità rimanendo on-chain, l'unica opzione era una nuova blockchain. Verso la fine del 2013, Vitalik Buterin, un giovane programmatore apassionato di Bitcoin, pensò di estendere le capacità di Bitcoin e Mastercoin. Nell'ottobre di quell'anno, propose un approccio più generalizzato al team di Mastercoin, che consentiva contratti flessibili e programmabili, anche se non Turing-completi, in sostituzione dell'allora attuale linguaggio contrattuale di Mastercoin, ma questa proposta risultava una modifica troppo radicale er adattarsi alla loro roadmap di sviluppo. Nel dicembre 2013, Vitalik condivise un white paper che delineava l'idea di Ethereum: una blockchain Turing-completa per tutti gli usi. Si aggiunse al team il Dr. Gavin Wood, attuale CTO, che lo aiutò nel perfezionare il protocollo che attualmente porta il nome di Ethereum. Lo sviluppo di Ethereum è stato pianificato in quattro fasi distinte, con importanti cambiamenti in ciascuna fase. Ogni fase può includere delle subreleases, note come "hard fork", che apportando funzionalità non retro compatibili. Le quattro fasi di sviluppo portano il nome di *Frontier*, *Homestead*, *Metropolis*, *Serenity*. I fork intermedi programmati sono *Ice Age*, *DAO*, *Tangerine Whistle*, *Spurious Dragon*, *Byzantium* e *Costantinople*. L'elenco completo lo possiamo notare in Tabella 2.1. Dopo Byzantium, rimangono altri due hard fork Metropolis Costantinople ed a seguire la fase finale Serenity.

### 2.1.1 Turing-completezza di Ethereum

La capacità di Ethereum di eseguire un programma memorizzato, in un macchina a stati chiamata Ethereum Virtual Machine, mentre legge e scrive dati in memoria lo rende un sistema Turing Completo. Ethereum può infatti calcolare qualsiasi algoritmo che possa essere calcolato da qualunque macchina di Turing. L'innovativa invenzione di Ethereum consiste nel combinare l'architettura di calcolo generica di un computer con l'affiancamento di una blockchain decentralizzata che memorizza il programma da eseguire. In questo modo si crea un computer mondiale distribuito (singleton). I programmi Ethereum funzionano ovunque producendo uno stato comune che viene garantito dalle regole di consenso. Il fatto che Ethereum sia Turing completo porta con sé una conseguente problematica, il fatto che possa eseguire qualsiasi programma, di qualsiasi complessità. Questa flessibilità porta alcuni problemi dal punto di vista della sicurezza e di gestione delle risorse disponibili. Turing ha dimostrato che non è possibile prevedere se un programma terminerà o meno senza eseguirlo. Ciò pone una sfida: ogni nodo partecipante (client) dovrà convalidare ogni singola transazione, convalidando qualsiasi smart contract che chiama, ma come dimostrato da Turing, Ethereum non potrà sapere a priori se uno smart contract terminerà, o per quanto tempo verrà eseguito, senza effettivamente eseguirlo. Se per caso o di proposito fosse possibile creare un contratto facendo in modo che funzioni per sempre quando un nodo tenterà di convalidarlo si verificherebbe un attacco di tipo DoS. Per evitare che questo accada Ethereum introduce un meccanismo di misurazione delle risorse chiamato *gas*. Quando l'EVM esegue uno smart contract tiene accuratamente conto di ogni istruzione (calcolo, accesso ai dati, ecc ...). Ogni istruzione ha un proprio costo predeterminato in *gas*. Quando una transazione attiva l'esecuzione di un contratto, deve includere una quantità di *gas* che imposta come limite superiore di ciò che può essere consumato eseguendo tale smart contract. Le unità di gas devono essere incluse quindi acquistate con l'ether, durante il calcolo della transazione.

### 2.1.2 Dalla Blockchain generica alle DApps

Ethereum è nato con l'intenzione di creare una blockchain general-purpose che potesse essere programmata per svariati usi. Molto rapidamente la visione di Ethereum si è espansa fino a diventare una piattaforma per programmare DApps. Queste DApps presentano una prospettiva più ampia rispetto agli smart contract. Una DApp è come minimo un contratto munito però di un'interfaccia web utente. Più in generale, una DApp è un'applicazione Web costruita su servizi di un'infrastruttura aperta, decentralizzata e peer-to-peer. Lo si può anche trovare scritto in questo modo DApp. Il carattere D rappresenta il carattere latino *ETH* che appunto allude a Ethereum.

### 2.1.3 Le unità monetarie di Ethereum

L'unità monetaria di Ethereum si chiama *ether* ed è identificata con il nome di *ETH*. Un ether è suddiviso in unità più piccole, fino all'unità più piccola chiamata *wei*. All'interno di Ethereum il valore di *ether* viene sempre rappresentato in *wei*. Le denominazioni delle varie frazioni di ether hanno sia un nome scientifico che utilizza il sistema internazionale di unità, SI, sia un nome colloquiale che rende omaggio a molte

Valore (in wei)	Esp.	Nome	Nome <i>SI</i>
1	1	wei	Wei
1.000	$10^3$	Babbage	Kilowei o femtoether
1.000.000	$10^6$	Lovelace	Megawei o picoether
1,000,000,000	$10^9$	Shannon	Gigawei o nanoether
1.000.000.000.000	$10^{12}$	Szabo	Microetere o micro
1.000.000.000.000.000	$10^{15}$	Finney	Milliether o milli
1.000.000.000.000.000.000	$10^{18}$	Ether	Ether
1.000.000.000.000.000.000.000	$10^{21}$	Grand	Kiloether
1.000.000.000.000.000.000.000.000	$10^{24}$		Megaether

**Tabella 2.2:** Denominazioni delle frazioni di ether.

delle più grandi menti della matematica e della crittografia, tutte le denominazioni sono riportate in Tabella 2.2.

## Wallet

Il termine wallet rappresenta tutti quei software che aiutano l'utente nella gestione del proprio account Ethereum, memorizza infatti le chiavi d'accesso ai fondi, crea e trasmette transazioni. Esistono varie tipologie di wallet, che richiedono più o meno attenzione per la gestione delle chiavi, più controllo e indipendenza si vuole avere, più aumentano le responsabilità. Un buon wallet è per esempio MetaMask, portafoglio web-based che si presenta come un'estensione per i browser più comuni come Chrome, Firefox e Opera. Risulta facile da usare e conveniente per eseguire test, poichè risulta in grado di connettersi ad una vasta gamma di nodi Ethereum per testare la blockchain. L'installazione di MetaMask risulta veramente semplice, infatti basterà aprire il gestore estensioni del proprio browser e cercare tale estensione e una volta individuata procedere con l'istallazione. Al termine della procedura si aprirà automaticamente la schermata principale di MetaMask dove ci viene richiesto di inserire una password. Tale password servirà per impedire a chiunque utilizzi il computer in questione e quindi ha accesso al browser su cui è installato MetaMask, di accedere a tale wallet e quindi aver accesso ai fondi. A questo punto viene generato un backup mnemonico formato da 12 parole inglesi. Queste parole potranno essere utilizzate in qualsiasi wallet compatibile per recuperare l'accesso al proprio conto in caso di guasti di qualsiasi tipo. Si consiglia di conservare un backup cartaceo delle credenziali d'accesso e del backup mnemonico riponendolo in un luogo fisicamente sicuro. Si sconsiglia infatti di salvare digitalmente tali informazioni. A questo punto ci troveremo davanti ad una schermata dove ci viene mostrato il nostro conto. Troviamo varie informazioni tipo il nostro indirizzo casualmente generato, il saldo del conto, lo storico delle transazioni passate e in corso. In questa schermata sarà anche possibile selezionare la rete sulla quale inviare le nostre transazioni. Le varie reti disponibili sono:

- **Rete principale di Ethereum:** principale blockchain pubblica di Ethereum, in questa rete il valore in ether è reale e ogni azione avrà conseguenze reali.



- **Rete di test Ropsten:** rete con blockchain pubblica in cui ether non ha valore.
- **Rete di test Kovan:** rete con blockchain pubblica in cui ether non ha valore. Utilizza il protocollo di consenso Aura. Questa rete è supportata solo da Parity, gli altri client il protocollo di consenso Clique, proposto in seguito.
- **Rete di test Rinkeby:** rete con blockchain pubblica, utilizza il protocollo di consenso Clique. Anche in questa rete Ether non ha valore.
- **Localhost 8545:** Si connette ad un nodo in esecuzione sullo stesso computer del browser. Tale nodo può far parte di una blockchain pubblica o di una rete di test privata.
- **RPC personalizzata:** consente di collegare MetaMask a qualsiasi nodo con un'interfaccia *RPC* (Remote Procedure Call) compatibile con Geth. Tale nodo può essere parte di una blockchain pubblica o privata.

Prenderemo come esempio la *rete di test Ropsten*.

Per muovere i primi passi su Ethereum, o qualsiasi altra blockchain, abbiamo bisogno di fondi. Per eseguire dei test possiamo richiedere dei fondi gratuitamente sulle reti di test, per esempio Ropsten. Quindi da MetaMask selezioniamo la sopracitata rete di test selezioniamo *Deposita > Ottieni Ether*, a questo punto si aprirà un'altra scheda dove poter richiedere *1 ether from faucet*. Una volta eseguita la richiesta, in basso, nella sezione *transactions* comparirà l'ID della transazione appena eseguita per trasferire 1 ether sul nostro conto. Attendendo qualche secondo la somma richiesta vi verrà accreditata e possiamo effettuare dei pagamenti. Per fare ciò dobbiamo tenere conto del *gas*, commissione raccolta dai minatori per convalidare la transazione. Il costo massimo corrisponde a :

$$3 * 21000 \text{ gwei} = 63000 \text{ gwei} = 0.000063 \text{ ETH}$$

Questo sta a significare che una transazione di 1 ETH costerà 1.000063 ETH, nonostante MetaMask visualizzi cifre approssimate, omettendo di visualizzare le cifre meno significative, sia nel saldo del conto che nel totale delle singole transazioni.

Durante la presentazione di Ethereum abbiamo anticipato che una delle particolarità di questa nuova blockchain sta proprio nella possibilità implementazione di smart contract da sottomettere al computer mondiale Ethereum. Vediamo ora come creare il primo contratto che ci darà la possibilità di depositare ether sul conto del contratto creato e successivamente procedere con il prelievo di massimo 0.1 ether. Il contratto che andremo a creare si chiama *faucet* e verrà scritto in Solidity tramite Remix<sup>1</sup>. Il funzionamento di questo contratto è semplice: distribuisce ether a qualsiasi indirizzo che ne richiede e il conto di tale contratto può essere caricato periodicamente. Per procedere quindi dobbiamo copiare il codice qui riportato all'interno di un nuovo file *faucet.sol* all'interno di Remix. A questo punto l'IDE compilerà in automatico mostrando un riquadro verde riportante il nome del contratto. Ora siamo pronti per inviare questo smart contract sulla blockchain pubblica e successivamente testarlo.

---

<sup>1</sup>Remix è un IDE per la scrittura di Smart Contract in linguaggio Solidity, tramite browser. <http://remix.ethereum.org>

```

1 // Our first contract is a faucet!
2 pragma solidity ^0.4.19;
3
4 contract Faucet {
5     // Give out ether to anyone who asks
6     function withdraw(uint withdraw_amount) public {
7         // Limit withdrawal amount
8         require(withdraw_amount <= 1000000000000000000);
9         // Send the amount to the address that requested it
10        msg.sender.transfer(withdraw_amount);
11    }
12    // Accept any incoming amount
13    function () public payable {}
14 }

```

La registrazione di un contratto sulla blockchain comporta la creazione di una transazione speciale la cui destinazione è l'indirizzo 0x000...000 noto come indirizzo zero, facendo capire alla blockchain Ethereum che siamo intenzionati a registrare un nuovo smart contract. Fortunatamente Remix riesce ad interagire con MetaMask, semplicemente impostando la voce in *Run > Environment* sul valore *Injected Web3 - Ropsten*. Subito al di sotto di questa voce troviamo la voce *Deploy* che procederà con la creazione di una nuova transazione che portando alla registrazione del contratto. Una volta confermata tale transazione possiamo richiamare la funzione *withdraw(uint withdraw\_amount)* inserendo massimo 0.1 ETH, limite impostato alla riga 8, nell'apposito campo della scheda Run, vista in precedenza e procedere premendo il pulsante *transact*. A questo punto verrà creata una nuova transazione verso l'indirizzo del contratto richiedendo tale somma di ether. Se tutto andrà a buon fine, il contratto esaminerà tale richiesta e produrrà un'ulteriore transazione trasferendo la cifra indicata verso il nostro conto. Si consiglia di utilizzare <https://ropsten.etherscan.io> per visualizzare tutti i dettagli delle varie transazioni, una cosa importante da notare è il fatto che le transazioni di risposta di contratti non vengono riportate nel tab *Transaction*, ma compariranno nel tab *Internal Trns*.

## 2.2 Le transazioni

Le transazioni sono messaggi firmati originati da un account di proprietà che vengono trasmessi della rete Ethereum e registrati sulla blockchain. La struttura di base di una transazione è quella che vediamo in tabella 2.3. La struttura del messaggio transazione viene serializzata utilizzando lo schema di codifica RLP (Recursive Length Prefix), creato appositamente per semplificare la serializzazione dei dati in Ethereum. Tutti i numeri vengono codificati come interi big-endian, di lunghezze che sono multipli di 8 bit. Le etichette di campo non fanno parte dei dati serializzati della transazione, che contiene valori di campo codificati in RLP. In generale RLP non contiene alcun delimitatore o etichetta di campo e la lunghezza di ciascun campo viene identificata tramite un prefisso. Molte informazioni visualizzate da wallet e altri strumenti sono derivate da altre più primitive. Per esempio la chiave pubblica dell'EOA può essere ricavata dalle componenti *v*, *r*, *s* della firma ECDSA.

Campo	Descrizione
nonce	Numero di sequenza emesso dall'EOA di origine, utilizzato per impedire il replay attack.
gas price	Prezzo del gas in wei che il mittente è disposto a pagare.
gas limit	Quantità massima di gas che l'EOA di origine è disposto ad acquistare per la transazione corrente.
recipient	Indirizzo Ethereum a cui è destinata la transazione.
value	Quantità di ether da inviare a destinazione.
data	Lunghezza variabile del payload.
v, r, s	Tre componenti della firma digitale ECDSA dell'EOA di origine.

**Tabella 2.3:** Struttura base di una transazione Ethereum.

## Nonce

Il nonce è uno dei componenti più importanti ma meno comprese in Ethereum. La definizione che troviamo nel White Paper si legge: *"nonce: numero scalare uguale al numero di transazioni inviate da questo indirizzo, o nel caso di account con codice associato, il numero di creazioni di contratto effettuate da questo account"*. Esistono due scenari in cui l'esistenza di un nonce risulta importante.

1. Supponiamo di aver due transazioni da effettuare, una più importante dell'altra ma non disponiamo di un saldo sufficiente per pagare entrambe le transazioni. Se inviassimo, in un sistema decentralizzato come Ethereum, prima la transazione più importante e poi la seconda, non disponendo del campo nonce, non abbiamo la certezza che la prima transazione venga sicuramente eseguita prima dell'altra, dato che i nodi possono ricevere le transazioni in entrambi gli ordini.
2. Immaginiamo ora di possedere un portafoglio Ethereum con parecchi fondi, e di fare un trasferimento di pochi ether ad un altro indirizzo. Senza il campo nonce un qualsiasi altro utente che vede tale transazione la potrà replicare fintanto che sul nostro conto abbiamo fondi a sufficienza da coprire la cifra versata.

Il campo nonce ha un duplice scopo, dare un ordine di esecuzione alle transazioni, sostanzialmente l'ordine di creazione, ed essendo unico, serve a sventare i replay attack.

### 2.2.1 Gas di transazione

Come abbiamo già detto precedentemente, il gas è il carburante di Ethereum, una valuta virtuale separata da l'ether con il proprio tasso di cambio. Ethereum utilizza il gas per controllare la quantità di risorse che una transazione può utilizzare dal momento che il modello di calcolo a terminazione aperta (Turing completo) richiede una qualche forma di misurazione al fine di evitare attacchi di denial-of-service. Il gas è separato dall'ether per proteggere il sistema dalla volatilità che potrebbe insorgere assieme ai rapidi cambiamenti nel valore dell'ether. Il cambio gas / ether può quindi variare al variare del valore della valuta ether.

Il campo `getPrice` in una transazione consente all'ordinante di impostare il prezzo che è disposto a pagare in cambio del gas. Il prezzo è misurato in wei per unità di gas. I wallet possono regolare il prezzo del gas nelle transazioni per ottenere una conferma più rapida, maggiore sarà il prezzo del gas, più rapida sarà la conferma della transazione. Il valore minimo a cui `getPrice` può essere impostato è zero. Queste transazioni risulteranno quindi completamente gratuite ma rischiano di non essere mai confermate.

Se l'indirizzo di destinazione è uno smart contract, la quantità di gas può essere stimata ma non può essere determinata con precisione. Questo perché un contratto può valutare diverse condizioni che portano a diversi percorsi di esecuzione, con conseguenti costi totali di gas diversi.

## Destinatario della transazione

Il destinatario della transazione viene specificato nel campo `to`. Questo contiene un indirizzo Ethereum di 20 byte che può essere un EOA o un indirizzo di un qualche contratto. Ethereum convalida ulteriormente questo campo, qualsiasi valore di 20 byte è considerato valido. E' possibile inviare fondi ad un indirizzo che non ha alcuna chiave privata o contratto corrispondente, in questo modo gli ether inviati vengono persi e non saranno più spendibili. La convalida deve quindi essere eseguita a livello di interfaccia utente.

### 2.2.2 Creazione contratti

La creazione di un contratto implica la generazione di una transazione speciale per procedere alla distribuzione di tale contratto. Le transazioni che procedono alla registrazione di un contratto su blockchain vengono indirizzate verso uno speciale indirizzo chiamato indirizzo zero che non rappresenta né un EOA né un contratto. Viene infatti utilizzato come destinazione con un significato speciale: *"crea questo contratto"*. Tuttavia questo indirizzo a volte riceve pagamenti da vari indirizzi, o per caso, con la conseguente perdita di ether, o per intenzionale volontà di rendere non spendibile una certa somma di ether.

Una transazione di creazione contratto deve contenere solo un payload di dati contenente il bytecode compilato che creerà il contratto. E' comunque possibile includere un importo di ether nel campo del valore se si desidera creare un contratto con un saldo iniziale pari a tale versamento, ma è del tutto facoltativo. Questa operazione può essere eseguita anche dopo la creazione del contratto, attendendo la fine di tale operazione, andando quindi a copiare l'indirizzo Ethereum di tale contratto e creando una nuova transazione che trasferirà un quantitativo di ether a questo indirizzo.

## Firme digitali

L'algoritmo di firma di Ethereum è l'Elliptic Curve Digital Signature (ECDSA) che si basa su coppie di chiavi pubbliche e private calcolate appunto su curve ellittiche. Lo scopo della firma digitale è riassunto nei seguenti punti:

$k$	Chiave Privata	$m$	Transazione RLP-encoded
$F_{kacak256}$	Funzione hash Kacak-256	$F_{sig}$	Algoritmo di firma

**Tabella 2.4:** Descrizione dei campi della funzione sign.

1. Dimostra che il proprietario della chiave privata, che implicitamente è anche il proprietario del conto Ethereum, ha autorizzato la spesa di ether o l'esecuzione di un contratto.
2. Garantisce la non-repudiation: la prova di tale approvazione non è negabile.
3. Dimostra che i dati della transazione non sono stati e non possono essere modificati da nessuno dopo che la transazione è stata firmata.

### Creazione della Firma Digitale

Ethereum, per attuare l'ECDSA, dovrà firmare un messaggio, che nel nostro caso è la transazione, o più precisamente l'hash Keccak-256 dei dati con codifica RLP. La chiave di firma è la chiave privata dell'EOA ed il risultato sarà:

$$Sig = F_{sig}(F_{kacak256}(m), k)$$

La funzione  $F_{sig}$  produce così la firma  $Sig$  che risulterà composta da due valori comunemente denominati con  $r$  e  $s$ :

$$Sig = (r, s)$$

Questo algoritmo per calcolare questi due valori  $r$  e  $s$  ha generato una chiave privata temporanea in modo crittograficamente sicuro. Come sappiamo infatti la chiave privata temporanea viene utilizzata per derivare la chiave pubblica, quindi abbiamo:

- Un numero casuale  $q$  crittograficamente sicuro, utilizzato come chiave privata temporanea.
- La corrispondente chiave pubblica  $Q$ , generata da  $q$  e il punto  $G$  generatore della curva ellittica.

Il valore  $r$  della firma digitale, è la coordinata x della chiave pubblica  $Q$ . Da lì, l'algoritmo calcolerà  $s$  della firma in modo che:

$$s \equiv q^{-1}(Kecak256(m) + r * k)(\text{mod } p)$$

Qui troviamo riportati i significati dei vari simboli all'interno della formula: La

$q$	chiave privata temporanea	$r$	coordinata x della chiave pubblica
$m$	dati della transazione	$p$	ordine primo della curva ellittica

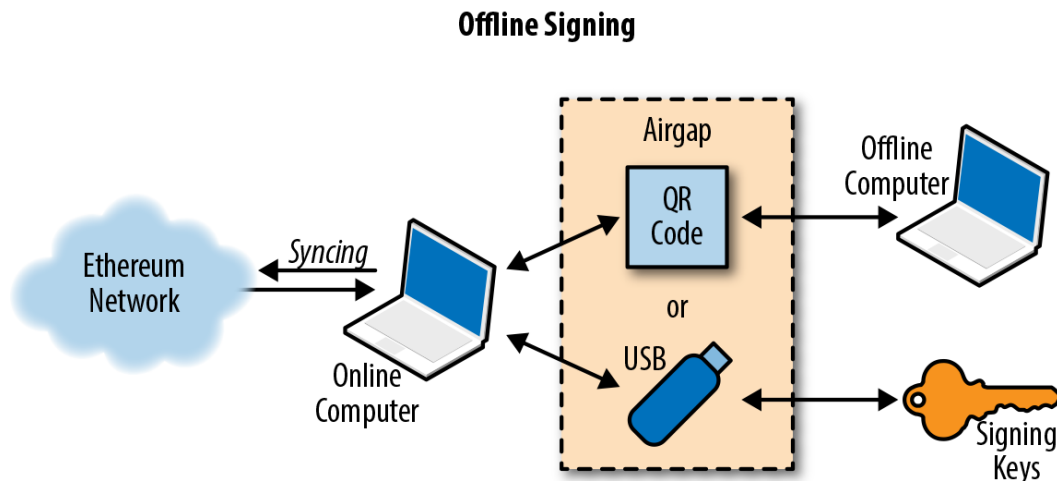
verifica di correttezza risulta essere l'inverso della funzione di firma, utilizzando i valori  $r$ ,  $s$ , e la chiave pubblica del mittente si sarà in grado di calcolare un valore  $Q$  che sarà il punto sulla curva ellittica. I passi sono i seguenti:

1. Controllare che tutti gli input siano stati forniti correttamente;
2. Calcolare  $w = s^{-1} \bmod p$ .
3. Calcolare  $u_1 = \text{Kekak256}(m) * w \bmod p$ .
4. Calcolare  $u_2 = r * w \bmod p$ .
5. Infine, calcolare il punto sulla curva ellittica  $Q \equiv u_1 * G + u_2 * K \pmod{p}$ .

Se la coordinata  $x$  del punto appena calcolato  $Q$  risulta uguale a  $r$ , allora il verificatore può concludere che la firma è valida. Si noti che per tale verifica, la chiave privata non è né conosciuta né rivelata. Per produrre una transazione valida, il mittente deve firmare digitalmente il messaggio, utilizzando l'algoritmo di firma digitale a curva ellittica. Quando diciamo "*firmare la transazione*" intendiamo effettivamente "*firmare l'hash Keccak – 256 dei dati della transazione serializzati su RLP*". La firma viene quindi applicata all'hash, non alla transazione stessa. Per firmare una transazione in Ethereum, il mittente deve:

1. Creare una struttura dati di transazione, contenente nove campi: *nonce*, *gasPrice*, *gasLimit*, *to*, *value*, *data*, *chainID*, *0*, *0*.
2. Produrre un messaggio serializzato con codifica RLP della struttura dei dati della transazione.
3. Calcolare l'hash *Keccak – 256* di questo messaggio serializzato.
4. Calcolare la firma ECDSA, firmando l'hash con la chiave privata dell'EOA di origine.
5. Aggiungere i valori calcolati  $v$ ,  $r$  e  $s$  della firma ECDSA alla transazione.

L'identificatore di ripristino  $v$  viene utilizzato per indicare la parità della componente  $y$  della chiave pubblica. Le tre fasi creazione, firma e trasmissione di una transazione, normalmente vengono eseguite come una singola operazione. Tuttavia è possibile creare e firmare una transazione in due passaggi separati. Una volta che una transazione viene firmata è possibile inviarla sulla rete Ethereum in un secondo momento. La ragione più comune per eseguire ciò è la sicurezza. Infatti il computer che firma la transazione deve conoscere le chiavi private che per forza di cose si devono trovare in memoria. Il computer che esegue la trasmissione deve essere collegato ad Internet. Se queste due funzioni sono sulla stessa macchina, allora le chiavi private sono salvate su di un sistema online, il che è piuttosto pericoloso. Questa procedura di separazione viene chiamata firma offline ed è una pratica di sicurezza comune, uno schema di questa procedura è riportato in Figura 2.1. Il sistema con la sicurezza maggiore risulta il sistema di tipo air-gapped, in tale sistema non vi è alcuna connettività di rete tra il computer online, colui che trasmetterà, e il computer che firma tale messaggio. Per firmare le transazioni e trasferirle da e verso la macchina online saranno necessari dei dispositivi di supporto dati o una webcam con relativo QRCode. Questa tecnica, per quanto sicura non risulta scalabile, dal momento in cui ogni transazione va trasferita manualmente tra le macchine.



**Figura 2.1:** Firma offline delle transazioni di Ethereum

## 2.3 Smart Contract

Il termine smart contract è stato usato nel corso degli anni per descrivere un'ampia varietà di cose differenti. Nel contesto di Ethereum il termine in realtà è un po' improprio dato che gli smart contract Ethereum non sono né smart (intelligenti), né contract (legali). Tali contratti fanno piuttosto riferimento a programmi informatici immutabili che funzionano in modo deterministico in un contesto quale la macchina virtuale Ethereum (EVM) sul computer decentralizzato Ethereum. Ma vediamo questa affermazione per step:

**Programmi per computer** Gli smart contract sono semplicemente dei programmi per computer. La parola "contratto" non ha alcun significato legale per questo contesto.

**Immutabile** Una volta implementato, il codice di un contratto non può essere cambiato, a differenza di un software tradizionale. Infatti l'unico modo per portare delle modifiche ad un proprio contratto è quello di ridistribuirne una nuova istanza.

**Deterministico** L'esito di uno smart contract sarà lo stesso per tutti coloro che lo eseguiranno, dato il contesto della transazione e lo stato della blockchain Ethereum al momento di tale esecuzione.

**Contesto EVM** Gli smart contract operano con un contesto di esecuzione limitato. Possono accedere al loro stato, al contesto della transazione che li ha richiamati e ad alcune informazioni sui blocchi più recenti.

**Computer mondiale decentralizzato** L'EVM viene eseguita come istanza locale su ogni nodo Ethereum, ma poiché tutte le istanze di EVM operano sullo stesso stato iniziale e produrranno lo stesso stato finale, il sistema nel suo complesso opera come un singolo computer mondiale.

### 2.3.1 Ciclo di vita di uno Smart Contract

Gli smart contract sono solitamente scritti in un linguaggio di alto livello, come ad esempio Solidity. Per essere eseguiti nella EVM devono poi essere compilati in bytecode. Una volta compilati possono essere distribuiti sulla piattaforma Ethereum tramite la speciale transazione di creazione contratto che invia tale transazione all'indirizzo 0x0. Ogni contratto è identificato da un proprio indirizzo Ethereum che può essere utilizzato per l'invio di fondi o per richiamare le funzione in esso specificate. Diversamente dagli EOA, uno smart contract non ha associate delle chiavi. Tali contratti vengono eseguiti solamente se richiamati da una transazione. Un contratto può richiamare un altro contratto ma il primo della catena sarà per forza di cose richiamato da un qualche EOA. Nel caso in cui l'esecuzione dovesse fallire per un qualche motivo, termine gas o errore di qualche tipo, tutti i cambiamenti di stato avvenuti fino a quel momento vengono ripristinati a prima dell'esecuzione come se la transazione non fosse mai stata eseguita. Una transazione fallita viene comunque registrata come tentata, e l'etere speso a gas per l'esecuzione viene detratto dall'account di origine.

Come accennato in precedenza, è importante ricordare che il codice di uno smart contract non può essere modificato. Tuttavia, un contratto può essere *cancellato*, rimuovendo il codice e il suo stato interno, archiviazione, dal suo indirizzo, lasciando un account vuoto. Qualsiasi transazione inviata a quell'indirizzo dell'account dopo che il contratto è stato eliminato non comporta l'esecuzione di alcun codice, perché non esiste più alcun codice da eseguire. Per fare ciò si dovrà eseguire un apposito codice operativo chiamato SELFDESTRUCT. Tale operazione costa una cifra in gas negativa, una sorta di rimborso del gas, questo per incentivare il rilascio di risorse. L'eliminazione di un contratto in questo modo non rimuove la cronologia delle transazioni del contratto, poiché la blockchain stessa è immutabile. La funzionalità SELFDESTRUCT sarà disponibile solamente se l'autore del contratto ha programmato il contratto per ottenere tale funzionalità, in caso contrario il contratto non potrà essere cancellato.

### Linguaggi di alto livello per Ethereum

L'EVM è una macchina virtuale che esegue una speciale forma di codice chiamata bytecode EVM, analoga alla CPU di un comune computer, che esegue codice macchina come x86\_64. E' possibile programmare i contratti Ethereum direttamente in bytecode, tuttavia la maggior parte dei programmatori preferisce ovviamente utilizzare un linguaggio di alto livello per poi convertire il codice prodotto in bytecode tramite un compilatore ad hoc. I linguaggi di programmazione possono essere classificati in due ampi paradigmi di programmazione: *dichiarativo* e *imperativo*, anche noti rispettivamente come *funzionali* e *procedurali*. Nella procedura dichiarativa, scriviamo funzioni che esprimono la logica di un programma, ma non il suo flusso. Viene utilizzata per creare programmi in cui non ci sono effetti collaterali, non ci saranno, infatti, cambiamenti di stato al di fuori di una funzione. Haskell e SQL sono due di questi. Nella programmazione imperativa, al contrario, una procedura può cambiare sia la logica che il flusso di un programma. In questo contesto troviamo C++ e Java. Poi ci sono dei linguaggi di programmazione ibridi che incoraggiano la programmazione dichiarativa ma possono essere utilizzate anche per esprimere



un paradigma di programmazione imperativo. Qui troviamo Lisp, JavaScript e Python. Qualsiasi linguaggio imperativo può essere usato per scrivere un paradigma dichiarativo. I linguaggi puramente dichiarativi, invece, non possono essere usati per scrivere un paradigma imperativo.

Mentre la programmazione imperativa è più comunemente utilizzata dai programmatori, può essere molto difficile scrivere programmi eseguiti esattamente come previsto. La capacità di qualsiasi parte del programma di cambiare lo stato di qualsiasi altro rende difficile ragionare sull'esecuzione di un programma e introduce molte opportunità per i bug. Nei contratti intelligenti, i bug costano letteralmente denaro e di conseguenza, è di fondamentale importanza scrivere contratti intelligenti senza effetti indesiderati. Per questo motivo, i linguaggi dichiarativi svolgono un ruolo molto più importante negli smart contract. Tuttavia, il linguaggio più utilizzato per i contratti intelligenti risulta Solidity che è imperativo.

## 2.4 Solidity

Solidity è stato creato dal Dr. Gavin Wood come linguaggio esplicito per scrivere smart contract per Ethereum. Il principale prodotto del progetto Solidity è il compilatore, *solc*, che converte i programmi scritti in Solidity in linguaggio bytecode EVM. Ogni versione del compilatore corrisponde e compila una versione specifica di Solidity. Tale linguaggio segue un modello di versioning chiamato semantic versioning, che specifica la versione strutturandola in tre parti numeriche: MAJOR:MINOR:PATCH.

E' possibile installare il compilatore Solidity su Ubuntu / Debian seguendo le istruzioni riportate sull'apposita pagina <http://solidity.readthedocs.io>. Come già detto in precedenza ne esiste anche una versione web-based che include un IDE chiamato Remix, pensato per test iniziali e lo sviluppo di piccoli Smart Contract.

### 2.4.1 Variabili e funzioni locali predefinite

Quando un contratto viene eseguito nell'EVM, ha accesso ad un piccolo insieme di oggetti globali, tra cui *block*, *msg*, e *tx*.

- **msg** L'oggetto *msg* contiene le informazioni del chiamante che può essere un EOA nel caso di una transazione, oppure una message call, nel caso la chiamata fosse originata da un altro contratto.
- **tx** L'oggetto *tx* fornisce un mezzo per accedere alle info relative alla transazione.
- **block** L'oggetto *block* contiene informazioni circa il blocco corrente.
- **address** Qualsiasi indirizzo passato ha un numero di attributi e metodi richiamabili con il prefisso *address*.
- **addmod**, **mulmod** per eseguire somme e moltiplicazioni in module.
- **keccak256**, **sha256**, **sha3**, **ripemd160** per calcolare l'hash del messaggio.
- **ecrecover** recupera l'indirizzo utilizzato per firmare il messaggio.
- **selfdestruct** elimina il contratto inviando l'ether residuo.
- **this** si riferisce all'indirizzo dell'account attualmente in esecuzione.

### 2.4.2 Funzioni di un contratto

All'interno di un contratto possiamo definire delle funzioni richiamabili da una qualsiasi transazione EOA oppure da un altro contratto. La sintassi utilizzata per la scrittura di queste funzioni è la seguente:

```
1 function FunctionName([parameters]) {public|private|internal|external}
2   [pure|constant|view|payable] [modifiers] [returns (return types)]
```

FunctionName	identifica la funzione tramite un nome, utilizzato per richiamare tale funzione tramite transazioni EOA o da altri contratti.
parameters	specificano il tipo degli argomenti che devono essere passati alla funzione e il rispettivo nome che assumono all'interno di essa.
public	tali funzioni possono essere richiamate da altri contratti, o transazioni, o dall'interno del contratto che la implementa.
external	come le funzioni pubbliche ma non possono essere richiamate da procedure interne al contratto.
internal	sono accessibili solamente tramite procedure interne al contratto.
private	come le interne ma non sono richiamabili da contratti derivati.
constant / view	la funzione contrassegnata come view promette di non modificare lo stato, constant è un alias di view che sarà deprecato in futuro, il compilatore produrrà un warning in caso di utilizzo errato.
pure	tale funzione non legge né scrive le variabili in memoria, opera solamente su argomenti e restituisce dati senza alcun riferimento a dati memorizzati.
payable	accetta pagamenti in entrata, se non implementata rifiutano tali transazioni.

### Considerazioni sul Gas

Il gas è una risorsa limitata pensata per limitare la quantità massima di calcolo che Ethereum consentirà ad una transazione di consumare. Se il limite di gas viene in qualche modo superato viene lanciata l'eccezione `out of gas exception`, viene ripristinato lo stato dello smart contract a prima di tale esecuzione e tutto il gas speso fino a quel momento per tentare tale esecuzione viene speso come tassa di transazione e quindi non viene rimborsato. Il costo del gas può essere stimato tramite la seguente procedura:

```
1 var contract = web3.eth.contract(abi).at(address);
2 var gasEstimate = contract.myMethod.estimateGas(arg1,arg2,{from: account});
```

`gasEstimate` ci indicherà il numero di unità di gas necessarie per l'esecuzione del metodo `myMethod`. Questa risulterà appunto una stima a causa della Turing completezza dell'EVM. Risulta infatti relativamente banale creare una funzione che richiederà quantità di gas molto diverse da quelle ritornate dalla sopracitata funzione. Per ottenere il prezzo del gas dalla rete e il relativo costo totale è possibile utilizzare:

```
1 var gasPrice = web3.eth.getGasPrice();
2 var gasCostInEther = web3.fromWei((gasEstimate * gasPrice), 'ether');
```

## 2.5 Sicurezza ed attacchi agli Smart Contract

La sicurezza è una delle considerazioni più importanti quando si procede con la scrittura degli Smart Contract dato che gli errori sono costosi e facilmente sfruttabili. In questa sezione andiamo a esaminare le best practice di sicurezza e quali sono le pratiche che possono indurre vulnerabilità all'interno dei nostri contratti. La programmazione difensiva risulta lo stile di sviluppo che più si adatta agli smart contract. Ma andiamo ad elencare quali sono le migliori tecniche:

**Minimalismo** La complessità risulta essere nemica della sicurezza. Più semplice è il codice più facile risulterà individuare bug o comportamenti imprevisti.

**Riutilizzo del codice** Cerca di non reinventare la ruota. Se esiste già una libreria o un altro contratto che fa già ciò che intendi implementare, riutilizzalo. Se più procedure vengono ripetute più volte all'interno del proprio codice, valutare se creare una funzione che implementi tale procedura.

**Qualità del codice** Il codice degli smart contract non perdona, ogni bug o funzionamento inaspettato può portare ad una perdita monetaria.

**Leggibilità** Il codice deve essere chiaro e facile da comprendere. I contratti sono pubblici e chiunque può accedere al bytecode ed eseguire il reverse engineering. Pertanto è consigliabile sviluppare il proprio lavoro in modo pubblico, utilizzando metodologie collaborative e open source.

**Test coverage** Metti alla prova tutto ciò che puoi. Gli smart contract vengono eseguiti in un ambiente pubblico e chiunque può testare qualsiasi contratto con qualsiasi input.

Gli effettivi rischi per la sicurezza che espongono i propri contratti a potenziali attacchi. Vediamone alcuni:

### Reentrancy

Una delle caratteristiche principali degli smart contract Ethereum è la loro capacità di richiamare e quindi utilizzare codice all'interno di altri contratti. I contratti, di base, gestiscono anche dell'ether che può essere inviato ad altri indirizzi. Questa operazione richiede che un contratto abbia la capacità di inviare chiamate verso l'esterno che possono essere dirottate da eventuali aggressori che possono quindi forzare i contratti ad eseguire ulteriore codice, tramite una funzione di fallback. Un attacco di questo tipo fu utilizzato nel famigerato attacco DAO. Per prevenire questo tipo di attacco è possibile ricorrere a delle contromisure. Possiamo infatti utilizzare una funzione di trasferimento integrata che consente di inviare solamente 2300 unità di gas per un'invocazione esterna. Questa cifra non sarà sufficiente per coprire il costo di un'eventuale ulteriore invocazione da parte del contratto chiamato.

### Arithmetic Over / Underflows

Una macchina virtuale Ethereum specifica i tipi di dati a dimensione fissa per i numeri interi. Ciò significa che una variabile intera può rappresentare solo un

certo intervallo di numeri. Un `uint8` può rappresentare solamente numeri nell'intervallo `[0-255]`. Se si tentasse di rappresentare il numero 256 all'interno di un `uint8` il numero risultante sarà 0. Se quindi non si presta la dovuta attenzione alcune operazioni possono generare dei risultati inaspettati. L'attuale tecnica convenzionale per proteggersi da vulnerabilità di `over / underflow` consiste nell'utilizzare o costruire librerie matematiche che sostituiscono gli operatori matematici standard quali addizione, sottrazione e moltiplicazione (la divisione è esclusa in quanto non causa `over / underflow` e l'EVM ritorna alla divisione di 0).

## Delegate Call

Gli opcode `CALL` e `DELEGATECALL` sono utili agli sviluppatori per modulare il loro codice. Le message call a contratti esterni sono gestite dalle `CALL`, in base al quale il codice viene eseguito nel contesto del contratto / funzione. L'opcode `DELEGATECALL` risulta simile se non per il fatto che il codice viene eseguito nel contesto del contratto chiamato e `msg.sender` e `msg.value` rimangono invariati. Questa funzione permette di implementare librerie, consentendo agli sviluppatori di distribuire il codice rendendolo utilizzabile in contratti futuri. Come risultato della conservazione del contesto di `DELEGATECALL`, la creazione di librerie personalizzate prive di vulnerabilità non è così semplice come si potrebbe pensare. Il codice nelle librerie stesse può essere sicuro e privo di punti deboli, tuttavia, quando viene eseguito nel contesto di un'altra applicazione, possono verificarsi nuove vulnerabilità. Come regola generale, quando si utilizza `DELEGATECALL` prestare attenzione al possibile contesto di chiamata sia del contratto di libreria che del contratto di chiamata e, quando possibile, creare librerie senza stato.

## Default Visibilities

Le funzioni in Solidity presentano delle specifiche di visibilità che determinano se una funzione può essere richiamata esternamente da altri utenti / contratti oppure solo internamente / esternamente. Come visto in precedenza esistono quattro specifiche di visibilità, tra queste `public` risulta la proprietà predefinita nel caso in cui non ne venga indicata un'altra. Questo fa sì che, se non si porta la dovuta attenzione, alcune funzioni con determinati scopi potrebbero essere richiamabili anche dall'esterno deviando il comportamento standard atteso del contratto. È buona norma specificare sempre la visibilità di tutte le funzioni in un contratto, anche se intenzionalmente `public`.

## Entropy Illusion

Tutte le transazioni su Ethereum sono delle operazioni sullo stato eseguite in modo deterministico. Ciò significa che ogni transazione modifica lo stato globale dell'ecosistema Ethereum in modo calcolabile. Ciò implica che all'interno di Ethereum non ci può essere alcuna fonte di entropia o casualità. Raggiungere l'entropia decentralizzata è un problema ben noto per il quale sono state proposte molte soluzioni, tra cui *RANDAO*, o l'utilizzo di una catena di hash. Se si intende sviluppare dei contratti per il supporto ad applicazioni che necessitano di una ottima

fonte di casualità si deve trovare una soluzione per implementarla. Questo ci porta a concludere che la fonte di casualità deve provenire dall'esterno della blockchain.

## Denial of Service (DoS)

Questa categoria è molto ampia, ma fondamentalmente consiste in attacchi in cui gli utenti possono rendere inoperabile un contratto per un periodo di tempo, o in alcuni casi in modo permanente. Questo può intrappolare etere in questi contratti per sempre. Esistono vari modi in cui un contratto può diventare inutilizzabile, vediamo alcuni:

- **Looping attraverso mappature o array manipolati esternamente** Questo schema si verifica in genere quando un proprietario desidera distribuire token a degli investitori con una tecnica dinamica. In linea di principio un malintenzionato può creare  $n$  account ed utilizzarli aggiungendoli ad una potenziale lista di account candidabili ad una vincita. Ciò può essere fatto in modo tale che il gas necessario per eseguire il ciclo `for` superi il limite del gas di blocco, rendendo funzione non più eseguibile.
- **Owner operations** Un altro schema comune appare quando il passaggio allo stato successivo è vincolato dal consenso del proprietario dello smart contract. Un esempio potrebbe essere un contratto Initial Coin Offering (ICO):

```

1 | bool public isFinalized = false;
2 | address public owner;
3 |
4 | function finalize () public {
5 |     require (msg.sender == owner);
6 |     isFinalized = true ;
7 | }
8 |
9 | // ... extra ICO functionality
10 |
11 | function transfer(address _to, uint _value) returns (bool) {
12 |     require(isFinalized);
13 |     super.transfer(_to,_value)
14 | }
```

In questi casi, se l'utente privilegiato perde le proprie chiavi private o diventa inattivo, l'intero contratto token diventa inutilizzabile.

- **Avanzamento basato su chiamate esterne** A volte i contratti vengono scritti in modo tale che passare a un nuovo stato richiede l'invio di etere a un indirizzo o l'attesa di qualche input da una fonte esterna. Questi modelli possono portare a attacchi DoS quando la chiamata esterna non riesce o viene impedita per ragioni esterne.

Una delle tecniche preventive, specie per le owner operations, sta nel evitare che le istruzioni di blocco siano dipendenti solamente da invocazioni che provengono dall'account del creatore. Nell'esempio sopra riportato si potrebbe pensare di riscrivere l'istruzione di `require` alla riga 5 facendola dipendere anche da un fattore di

tempo, per esempio `require(msg.sender == owner || now > unlockTime)`. In questo modo, nel caso in cui il creatore del contratto non richiami la funzione `finalize()`, o fosse impossibilitato a farlo, chiunque può eseguire il cambio di stato a patto che sia passato un tempo `unlockTime`, sbloccando così i fondi altrimenti bloccati.

### Autenticazione tramite `tx.origin`

Solidity ha una variabile globale `tx.origin`, che contiene l'indirizzo di chi ha originariamente invito la chiamata o transazione. L'utilizzo improprio di questa variabile rende un contratto vulnerabile ad una attacco simile al phishing. Supponiamo di trovare un contratto che dispensa ether tramite la funzione `withdrawAll` sse `tx.origin == owner`.

```

1 | function withdrawAll (indirizzo _recipient) public {
2 |     require (tx.origin == owner);
3 |     _recipient.transfer (this.balance);
4 | }
```

Creiamo ora un nuovo contratto ad hoc che richiama la funzione `withdrawAll`, all'interno del contratto vittima, passando come indirizzo `_recipient`, l'indirizzo dell'attaccante. Se la funzione di questo nuovo contratto viene invocata dal proprietario del primo contratto, richiamerà la funzione `withdrawAll` della vittima che trasferirà i fondi all'account dell'attaccante. Questo non significa che la variabile `tx.origin` non debba essere utilizzata, ma piuttosto deve essere utilizzata con cautela e non per autorizzare operazioni importanti.

## 2.6 Oracoli

Gli oracoli sono sistemi in grado di fornire fonti di dati esterne agli smart contract di Ethereum, idealmente sono dei Sistemi *trustless*, senza fiducia, nel senso che non hanno bisogno di essere fidati perché operano su principi decentralizzati. Un componente chiave della piattaforma Ethereum è la macchina virtuale Ethereum, con la sua capacità di eseguire programmi e aggiornare lo stato di Ethereum, vincolato da regole di consenso, su qualsiasi nodo della rete decentralizzata. Al fine di mantenere un consenso, l'esecuzione dell'EVM deve essere totalmente deterministica e basata unicamente sul contesto condiviso dello stato di Ethereum e delle transazioni firmate. Tutto ciò porta a due conseguenze principali:

1. non ci può essere una fonte intrinseca di casualità per l'EVM e per gli smart contract con cui lavorare;
2. i dati estrinseci possono essere introdotti solo come il carico utile di dati di una transazione.

In particolare, in un sistema come Ethereum, non può esistere una funzione casuale perché porterebbe ad un effetto disastroso. Una funzione puramente casuale porta infatti a risultati diversi ad ogni sua esecuzione. Questo non deve essere possibile in Ethereum altrimenti due nodi diversi che eseguono lo stesso contratto arriverebbero a due conclusioni differenti nonostante entrambi nodi abbiano eseguito lo stesso codice nel medesimo contesto. Come tale non ci sarebbe modo per la

rete di arrivare ad un consenso decentrato. Si noti che le funzioni pseudo casuali, come le funzioni hash, crittograficamente sicure, non sono sufficienti per molte applicazioni, vedi per esempio il gioco d'azzardo, che simula lanci di monete per risolvere i pagamenti delle scommesse. Un minatore può infatti ottenere un vantaggio includendo nei blocchi solo le transazioni per le quali vincerà. Usiamo gli oracoli per tentare di risolvere questa tipologia di problemi. Gli oracoli forniscono un modo trustless di ottenere informazioni estrinseche<sup>2</sup> sulla piattaforma Ethereum per gli Smart Contract. Gli oracoli possono quindi essere considerati un meccanismo per colmare il divario tra il mondo fuori catena e i contratti intelligenti. Consentendo ai contratti intelligenti di far rispettare le relazioni contrattuali basate su eventi e dati del mondo reale. Alcuni oracoli forniscono dati che sono specifici di una determinata fonte di dati privata. La fonte di tali dati deve essere pienamente affidabile. E' possibile progettare un Oracle client implementato in Solidity che per definizione dovranno implementare alcune funzioni chiave, includendo la possibilità di:

- Raccogliere i dati da una fonte off-chain.
- Trasferire i dati sulla catena tramite un messaggio firmato.
- Rendere i dati disponibili in memoria all'interno di uno smart contract.

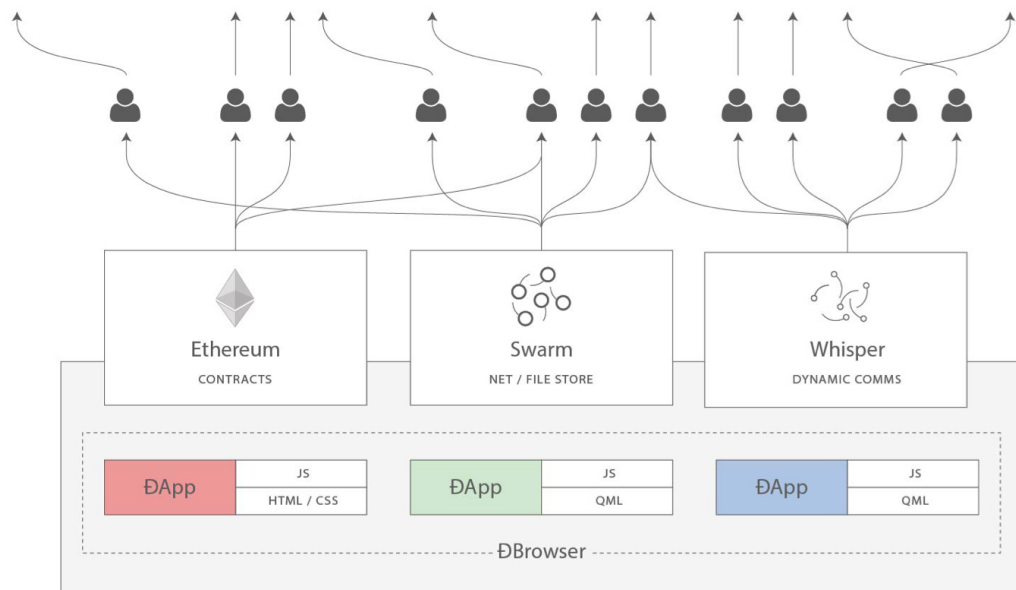
Una volta che i dati sono disponibili in memoria in un contratto intelligente, è possibile accedervi tramite altri smart contract tramite chiamate di messaggi che invocano una funzione di "recupero" del contratto intelligente dell'oracolo.

## Autenticazione dei dati

Se supponiamo che la fonte dei dati interrogati da un DApp sia autorevole e affidabile, dobbiamo essere in grado di fidarci di questo meccanismo dal momento in cui esiste la possibilità che i dati possono essere manipolati durante il transito. Dobbiamo quindi essere in grado di testare l'integrità dei dati restituiti. Esistono due approcci comuni per l'autenticazione: *authenticity proofs* e *trusted execution environments* (TEE). Le *authenticity proofs*, o prova di autenticità, sono garanzie crittografiche che i dati non sono stati manomessi. Oraclize è un esempio di servizio oracolo che sfrutta una varietà di prove di autenticità. Una prova di questo tipo attualmente disponibile per le query di dati dalla rete principale di Ethereum è la prova TLSNotary. Le prove TLSNotary consentono a un client di fornire prove ad una terza parte, che il traffico Web HTTPS sia verificato tra il client-server. Oltre agli oracoli nel contesto della richiesta e consegna di dati, esiste anche la possibilità di utilizzarli per eseguire calcoli arbitrari. Anziché limitarsi a trasmettere risultati di una query, è possibile utilizzare gli oracoli per eseguire calcoli su un insieme di input e restituire un risultato che altrimenti potrebbe essere stato impossibile calcolare sulla catena. Possono essere implementati dei contratti che tengono traccia del valore di cambio valuta, per esempio ETH/USD che sonderà continuamente il prezzo ETH/USD da un'API e archiverà il risultato, rendendolo così utilizzabile.

---

<sup>2</sup>Informazioni fuori dalla Blockchain.



**Figura 2.2:** Web3 web decentralizzato che utilizza smart contract e tecniche P2P

## Conclusioni

Come abbiamo visto gli oracoli forniscono un servizio cruciale per gli smart contract, portando fatti esterni all'interno dell'esecuzione del contratto. Tutto ciò introducendo comunque un rischio significativo: se le fonti sono attendibili e possono essere compromesse potrebbero portare ad un'esecuzione inaspettata degli smart contract che alimentano. Si dovrà quindi prestare molta attenzione al modello di fiducia che si adotta. Gli oracoli decentralizzati possono risolvere alcune di queste preoccupazioni e offrire contratti intelligenti di Ethereum senza dati esterni.

## 2.7 Applicazioni decentralizzate (DApp)

Fin dai primi giorni i fondatori di Ethereum avevano una visione molto più ampia che andava oltre gli smart contract. L'idea di fondo era reinventare il web creandone uno nuovo dal nome *web3*. I contratti intelligenti, di cui abbiamo parlato fin qui, sono un modo per decentralizzare la logica di controllo e le funzioni di pagamento delle applicazioni. Web3 DApp riguarda la decentralizzazione di tutti gli altri aspetti di un'applicazione: archiviazione, messaggistica, naming ecc... Una DApp è quindi un'applicazione per lo più, o interamente decentralizzata nei suoi vari aspetti: Software di back-end e frontend, archiviazione dati, comunicazioni messaggi e risoluzione dei nomi. Ognuno di questi può essere alquanto centralizzato o piuttosto decentralizzato. Ci sono diversi vantaggi che può portare una architettura decentralizzata di questo tipo:

- **Elasticità:** la logica di business è controllata da uno smart contract, la back-end di una DApp sarà completamente distribuita e gestita su blockchain, non sarà quindi vittima di possibili tempi di inattività.



- **Trasparenza:** la natura on-chain consente a tutti di visionare il codice delle varie funzioni.
- **Resistenza alla censura:** finchè un utente avrà accesso alla rete Ethereum sarà sempre in grado di interagire con una DApp senza dipendere da nessun controllo centrale o qualsiasi fornitore di servizi.

Ma vediamo in dettaglio i vari aspetti di un'applicazione decentralizzata:

### Back-end (Smart Contract)

Nelle DApp, per archiviare la logica aziendale, si fa utilizzo degli smart contract sarà quindi così anche per lo stato di tale app. Possiamo pensare allo smart contract come quella componente che va a sostituire la back-end di un server in una normale applicazione. Da notare però che qualsiasi operazione eseguita con un contratto risulterà molto costosa per questo motivo si dovrà mantenere tale logica il più minimale possibile e soprattutto identificare quali aspetti della DApp richiedono un'esecuzione affidabile e decentralizzata. Una considerazione importante di cui tener conto quando si procede con l'implementazione di uno smart contract è l'incapacità di modificare il codice una volta implementato. Può essere cancellato ma solamente se è stato programmato il codice operativo `SELFDESTRUCT`. Ultima importante considerazione riguarda il design dell'architettura di uno smart contract. Un contratto monolitico molto grande può costare molto gas una volta eseguito. Si può scegliere di diminuire il carico integrando calcoli provenienti da fonti off-chain, ma questo significa che qualsiasi utilizzatore di questo servizio si dovrà fidare di tali fonti esterne.

### Frontend (Web User Interface)

A differenza della logica di business di DApp, che richiede di comprendere l'EVM e nuovi linguaggi come ad esempio Solidity, l'interfaccia lato client di una DApp può utilizzare tecnologie web standard come HTML, CSS, JavaScript, ecc. Ciò consente quindi ad uno sviluppatore web tradizionale di utilizzare strumenti, librerie e framework famigliari. Le interazioni con Ethereum, come la firma di messaggi, l'invio di transazioni e la gestione di chiavi, sono spesso condotte attraverso il browser web, tramite un'estensione come MetaMask. Il frontend è in genere collegato a Ethereum tramite la libreria JavaScript *web3.js*.

### Data Storage

A causa degli elevati costi del gas e del limite di gas a blocchi attualmente basso, i contratti intelligenti non sono adatti per archiviare o elaborare grandi quantità di dati. Pertanto, la maggior parte dei DApp utilizza servizi di archiviazione dati fuori catena, il che significa che memorizzano i dati ingombranti dalla catena Ethereum, su una piattaforma di archiviazione dati. La piattaforma di archiviazione dati può essere centralizzata (ad esempio, un tipico database cloud), oppure i dati possono essere decentralizzati, archiviati su una piattaforma P2P come l'IPFS o la piattaforma Swarm di Ethereum. Lo storage P2P decentralizzato è ideale per archiviare e distribuire asset statici di grandi dimensioni come immagini, video e le risorse dell'interfaccia Web frontend dell'applicazione.

### Inter-Planetary File System (IPFS)

E' un sistema decentralizzato per content-addressable per la distribuzione di oggetti memorizzati su di una rete P2P. "Content-addressable" significa che di ogni contenuto viene eseguito l'hash e questo hash verrà utilizzato per identificare tale file. Sarà così possibile recuperare qualsiasi file da qualsiasi nodo IPFS tramite il suo hash. IPFS mira a sostituire HTTP come protocollo per la consegna di applicazioni web.

### Swarm

E' un altro sistema di archiviazione content-addressable simile a IPFS. Swarm è stato creato dalla Ethereum Foundation come parte della suite Go-Ethereum. Come IPFS, consente di archiviare file che vengono diffusi e replicati sui nodi Swarm. Il riferimento ai vari files viene eseguito sempre tramite hash e consente di accedere a un sito Web da un sistema P2P decentralizzato, anziché da un server Web centrale.

### Whisper

Un altro componente importante di una qualsiasi applicazione è la comunicazione tra processi, il poter scambiare, quindi, messaggi tra applicazioni, diverse istanze dell'applicazione o tra i suoi vari utenti. Solitamente questo si ottiene facendo riferimento ad un server centrale, tuttavia esistono una varietà di alternative decentralizzate che offrono messaggistica su di una rete P2P. Il più importante protocollo di messaggistica P2P per DApp risulta essere Whisper, che fa anche lui parte della suite Go-Ethereum.

### Ethereum Name Service (ENS)

E' possibile progettare il miglior smart contract al mondo ma se non si fornisce una buona interfaccia per gli utenti, questi non saranno in grado di accedervi e quindi fruire del servizio. Su internet tradizionale, il Domain-Name-System (DNS) ci consente di navigare utilizzando dei nomi comprensibili all'uomo, mentre risolviamo quei nomi in indirizzi IP, recuperando così i contenuti cercati. Sulla blockchain Ethereum, l'Ethereum Naming System (ENS) risolve lo stesso problema, ma in modo decentralizzato. ENS è più di uno smart contract, è un DApp fondamentale in sé, che offre un servizio di nomi decentralizzato. Inoltre, ENS è supportato da svariate DApps per la registrazione e la gestione delle aste dei nomi registrati. ENS dimostra come le DApp possono lavorare insieme.

## 2.8 La macchina virtuale di Ethereum

Il cuore del protocollo Ethereum è appunto l'Ethereum Virtual Machine o EVM in breve. Come si può intuire dal nome, si tratta di un motore di calcolo non molto diverso dalle macchine virtuali per il framework Microsoft .NET o di altri linguaggi compilati in bytecode come Java. Più in dettaglio, l'EVM è la parte di Ethereum che gestisce la distribuzione e l'esecuzione di contratti intelligenti. Le semplici transazioni di valore tra due EOA non devono coinvolgerlo ma si dovrà occupare di tutto ciò che comporta un aggiornamento di stato. L'EVM Ethereum può essere concepito come

un computer decentralizzato globale contenente milioni di oggetti eseguibili, ciascuno con un proprio archivio di dati permanente. L'EVM è una macchina di Turing quasi completa, "quasi" perché tutti i processi in esecuzione sono limitati ad un numero finito di passaggi computazionali in base alla quantità di gas disponibile per ogni esecuzione, questo per garantire la terminazione di un qualsiasi codice sottoposto. L'architettura dell'EVM è basata su stack nel quale vengono salvati tutti i valori in memoria, ha diversi componenti di dati utilizzati:

- La ROM di codice di programma immutabile, caricata con il bytecode del contratto intelligente da eseguire.
- Una memoria volatile, con ogni posizione esplicitamente inizializzata a zero.
- Una memoria permanente che fa parte dello stato di Ethereum, anch'essa inizializzata a zero.

Uno schema più completo lo si può vedere in Figura [2.3](#).

### Contronto con la tecnologia esistente

Il termine "macchina virtuale" viene spesso applicato alla virtualizzazione di un computer reale, in genere da un "hypervisor" come VirtualBox o QEMU o da un'intera istanza del sistema operativo, come KVM di Linux. Questi devono fornire un'astrazione software dell'hardware effettivo, delle chiamate di sistema e altre funzionalità del kernel. EVM opera in un dominio molto più limitato: è solo un motore di calcolo e, in quanto tale, fornisce un'astrazione di solo computazione e archiviazione, simile, ad esempio, alle specifiche Java Virtual Machine (JVM). Da un punto di vista di alto livello, la JVM è progettata per fornire un ambiente di runtime che è indipendente dal sistema operativo o hardware host sottostante, consentendo la compatibilità su un'ampia varietà di sistemi. Linguaggi di programmazione di alto livello come Java o Scala (che usano JVM) o C# (che usa .NET) sono compilati nel set di istruzioni bytecode della rispettiva macchina virtuale. Allo stesso modo, EVM esegue il proprio set di istruzioni bytecode, in cui vengono compilati i linguaggi di programmazione come LLL, Serpent, Mutan o Solidity.

### Stato di Ethereum

Il compito dell'EVM è di aggiornare lo stato di Ethereum calcolando transizioni di stato valide come risultato dell'esecuzione del codice dello smart contract, come definito dal protocollo Ethereum. Quando una transazione richiama una funzione di un certo smart contract, viene creata una EVM con tutte le informazioni richieste in relazione al blocco corrente e alla specifica transazione in elaborazione. In particolare l'EVM viene caricata con il codice del contratto chiamato, il program counter impostato a zero, lo storage locale viene caricato dallo storage dell'account di tale contratto, la memoria invece viene azzerata. Una variabile di particolare importanza è la fornitura di gas per l'esecuzione corrente, impostata sulla quantità di gas pagata dal mittente all'inizio della transazione. Mentre l'esecuzione del codice avanza, l'erogazione del gas viene ridotta in base al costo di ogni singola operazione eseguita. Se in qualsiasi momento venisse esaurito il gas, verrà lanciata l'eccezione Out-Of-Gas

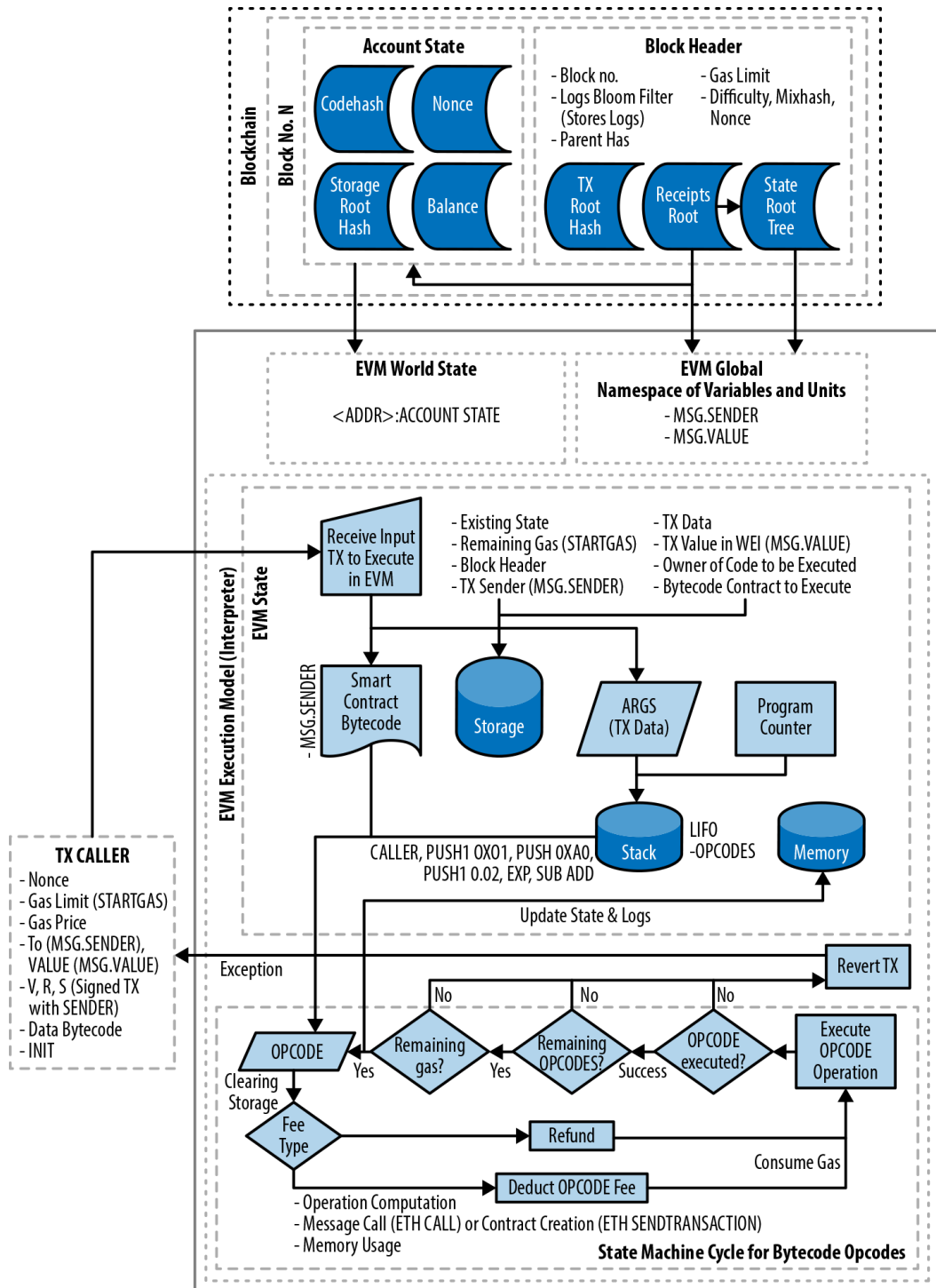


Figura 2.3: Architettura e contesto dell'EVM.

causando l'interruzione immediata dell'esecuzione e la transazione viene interrotta. Non vengono apportate modifiche allo stato precedente ad eccezione del nonce del mittente che viene incrementato, il gas speso per l'esecuzione fino all'interruzione non viene rimborsato e va a pagare il beneficiario del blocco per le risorse utilizzate fino al punto d'arresto. Tuttavia, se l'esecuzione viene completata correttamente, lo stato viene aggiornato per corrispondere alla versione dell'EVM in quel momento.

### Turing completezza e Gas

Come abbiamo già accennato, in termini semplici, un sistema o un linguaggio di programmazione è Turing completo se può eseguire qualsiasi programma. Un aspetto importante è che non possiamo dire, a priori, semplicemente guardando un programma, se tale programma terminerà o meno. Dobbiamo per forza procedere con l'esecuzione del programma ed attendere la sua terminazione per scoprirlo. Una delle possibilità è che il programma in questione non termini e questo ci porterebbe, in caso lo eseguiamo, ad attendere un tempo infinito. Questo si chiama halting problem, e sarebbe un grosso problema per Ethereum se non fosse affrontato. Se l'EVM eseguisse un programma di questo tipo diventerebbe inutilizzabile. Tuttavia, tramite l'utilizzo del Gas, c'è una soluzione: se dopo l'esecuzione di una quantità massima di calcolo, l'esecuzione non è terminata, tale procedura viene interrotta dall'EVM. Ciò rende l'EVM una macchina di Turing quasi completa dato che può eseguire qualsiasi programma inserito in essa, ma solo se termina entro una determinata quantità di calcolo. Questo limite non è fisso in Ethereum: puoi pagare per aumentarlo al massimo, chiamato il "limite del gas di blocco", e tutti possono concordare di aumentarlo nel tempo.

### Gas

È l'unità di Ethereum per misurare le risorse computazionali e di archiviazione necessarie per eseguire azioni sulla blockchain di Ethereum. Diversamente da Bitcoin, le cui commissioni di transazione tengono conto solo delle dimensioni di una transazione in kilobyte, Ethereum deve tenere conto di ogni passo di calcolo eseguito dalle transazioni e dell'esecuzione del codice dello smart contract richiamato. ogni operazione eseguita da una transazione o contratto costa una quantità fissa di gas, vediamo alcuni esempi presi dal Yellow Paper di Ethereum:

- La somma di due numeri costa 3 gas.
- Il calcolo di un hash Keccak-256 costa 30 gas + 6 gas per ogni 256 bit di dati sottoposti a hash.
- L'invio di una transazione costa 21.000 gas.

Prima di ogni operazione, l'EVM verifica che vi sia abbastanza gas da pagare per l'esecuzione dell'operazione. Se non c'è abbastanza gas, l'esecuzione viene interrotta e la transazione viene ripristinata. Se, invece, l'EVM raggiunge la fine dell'esecuzione con successo, senza esaurire il gas, il costo del gas utilizzato viene pagato al minatore come commissione di transazione, convertito in etere in base al prezzo del gas

specificato nella transazione:

$$\begin{aligned} commissioneMinatore &= costoGas * prezzoGas \\ gasRimanente &= limiteGas - costoGas \\ etereRimborsato &= prezzoRimanenteGas * Gas \end{aligned}$$

### Costo del gas e prezzo del gas

Mentre il conto del gas è misurato in base allo sforzo computazionale e di storage dell'EVM Ethereum, anche il gas stesso ha un prezzo in ether. Quando si esegue una transazione, il mittente specifica il prezzo del gas che è disposto a pagare (in etere) per ogni unità di gas, consentendo al mercato di decidere la relazione tra il prezzo dell'etere e il costo delle operazioni di calcolo (misurato in gas) :

$$commissioneDiTransazione = gasTotaleUtilizzato * prezzoGasPagato$$

Quando si costruisce un nuovo blocco, i minatori della rete Ethereum possono scegliere tra le transazioni in sospeso selezionando quelle che offrono di pagare un prezzo del gas più alto. Offrire un prezzo del gas più elevato incentiverà pertanto i minatori a includere la transazione e a confermarla più rapidamente. In pratica, il mittente di una transazione imposterà un limite di gas superiore o uguale alla quantità di gas che si prevede di utilizzare. Se il limite di gas è impostato su un valore superiore alla quantità di gas consumato, il mittente riceverà un rimborso dell'importo in eccesso, in quanto i minatori sono solo compensati per il lavoro effettivamente svolto. Deve essere chiara la distinzione tra il costo del gas e il prezzo del gas:

- Il costo del gas è il numero di unità di gas necessarie per eseguire una determinata operazione.
- Il prezzo del gas è la quantità di ether che si è disposti a pagare per unità di gas quando si invia la transazione alla rete Ethereum.

### Costi negativi del gas

Ethereum incoraggia la cancellazione delle variabili e degli account di archiviazione usati rimborsando parte del gas utilizzato durante l'esecuzione del contratto. Nell'EVM esistono due operazioni con costi negativi di gas:

- La cancellazione di un contratto `SELFDESTRUCT` vale un rimborso di 24.000 gas.
- La modifica di un indirizzo di archiviazione da un valore diverso da zero a zero (`SSTORE [x] = 0`) vale un rimborso di 15.000 gas.

Per evitare lo sfruttamento di tale meccanismo di rimborso, il rimborso massimo per una transazione è pari alla metà della quantità totale di gas utilizzato.

### Block gas limit

Il limite del gas di blocco è la quantità massima di gas che può essere consumata da tutte le transazioni in un blocco e limita quindi il numero di transazioni che

Tran.1	Tran.2	Tran.3	Tran.4	Tran.5	Tot.
30.000	30.000	40.000	50.000	50.000	200.000
✓	✓	✓	✓	✗	150.000
✓	✓	✗	✓	✓	160.000
✓	✗	✓	✓	✓	170.000

Tabella 2.5: Esempi di transazioni con relativi costi

possono essere contenute in un blocco. Un semplice esempio, con cinque transazioni, è riportato in Tabella 2.5. Se supponiamo che il limite massimo di gas per blocco è impostato a 180.000, notiamo che non tutte le transazioni possono essere inserite in un unico blocco, o meglio, solo quattro di quelle riportate in tabella saranno incluse nello stesso blocco. Se un minatore tenta di includere una transazione che richiede più gas rispetto al limite di gas di blocco corrente, il blocco verrà rifiutato dalla rete. Come per le transazioni Bitcoin, è possibile che diversi minatori selezionino combinazioni diverse, principalmente perché ricevono transazioni dalla rete in un ordine diverso. Il limite di gas di blocco sulla rete principale Ethereum è 8 milioni di gas al momento della stesura secondo <https://etherscan.io>, il che significa che circa 380 transazioni di base ( $\sim 21.000$  gas cdu) potrebbero rientrare in un singolo blocco.

## 2.9 Il consenso

Le regole di consenso sono tutte quelle regole che tutti devono accettare affinché il sistema operi in modo decentralizzato, ma deterministico. In informatica, il termine "consenso" è correlato ad un più ampio problema di sincronizzazione dello stato nei sistemi distribuiti, in modo tale che i diversi partecipanti in un sistema distribuito siano tutti d'accordo su un singolo stato a livello di sistema. Questo è chiamato *raggiungimento del consenso*. Quando queste funzioni decentralizzate di consenso permettono di salvare e mantenere memoria di uno stato, può diventare problematico affidarsi solamente alla fiducia per garantire che le informazioni derivanti dagli aggiornamenti di stato siano corrette. Questa sfida è particolarmente pronunciata nelle reti decentralizzate perché non esiste un'entità centrale che decida per noi. Senza un arbitro affidabile, eventuali disaccordi o differenze devono essere riconciliati con altri mezzi e gli algoritmi di consenso sono appunto il meccanismo utilizzato per riconciliare sicurezza e decentralizzazione. Nelle blockchain, il consenso è una proprietà critica del sistema dal momento in cui ci sono soldi in palio. Tale consenso quindi è destinato a produrre un sistema di regole severe ma senza governanti. La capacità di arrivare al consenso attraverso una rete distribuita, in condizioni contraddittorie, senza controllo centralizzato è il principio fondamentale di tutti i blockchain pubblici aperti. Per affrontare questa sfida e mantenere la proprietà di valore del decentramento, la comunità continua a sperimentare diversi modelli di consenso.

### 2.9.1 Consenso tramite Proof-of-Work

Il creatore della blockchain Bitcoin, ha inventato un algoritmo di consenso chiamato proof of work (PoW). Il termine colloquiale per PoW è "mining" e questo crea non pochi equivoci circa lo scopo del minatore. Spesso, infatti, si presuppone che lo scopo del mining sia quello di creare della nuova valuta, dal momento in cui tale parola rispecchia nella realtà un lavoro che comporta l'estrazione di un minerale prezioso, in questo caso equiparato alla valuta che si ricava. Il vero scopo del mining, così come per tutti gli altri modelli di consenso, è quello di proteggere la blockchain mantenendo il controllo sul sistema decentralizzato diffondendolo al maggior numero di partecipanti possibili. Il conio di nuova moneta a lavoro terminato è solamente un incentivo per coloro che contribuiscono alla sicurezza del sistema, un mezzo per un fine.

Nel consenso di PoW è presente anche una corrispondente *punizione* che risulta il costo dell'energia richiesta per prendere parte a tale mining. Se i partecipanti non seguono le regole e assegnandosi la ricompensa, rischiano i fondi per il pagamento dell'elettricità spesa fino a quel momento. Pertanto, il consenso di PoW è un attento equilibrio tra rischio e rendimento che spinge i partecipanti a comportarsi onestamente per interessi personali. Ethereum è attualmente una blockchain di tipo PoW con lo stesso obiettivo di base, cioè assicurare la blockchain mentre si decentralizza il controllo. Ethereum implementa un versione leggermente diversa da quella di Bitcoin e si chiama Ethash.

### 2.9.2 Consenso tramite Proof-of-Stake

Storicamente, la Proof-of-Work non fu il primo algoritmo di consenso proposto fu anticipato infatti dal Proof-of-Stake. Dopo il successo di Bitcoin, molte blockchain hanno emulato la PoW, non approcciandosi quindi alla PoS. Fin dall'inizio, i fondatori di Ethereum speravano di riuscire a migrare verso la Proof-of-Stake dal momento in cui PoW ha un problema ben noto: la *Bomba di Difficoltà*. Quest'ultima infatti rappresenta il fatto che si tende a rendere sempre più difficile il calcolo della PoW, a causa della maggiore potenza computazionale della rete, che col passare del tempo forzerà Ethereum al passaggio verso un sistema PoS. Al momento della stesura di questa Tesi, Ethereum utilizza ancora la proof-of-work, ma la ricerca verso un'alternativa proof-of-stake è in via di completamento. L'algoritmo PoS per Ethereum prenderà il nome di *Casper*. L'introduzione di quest'ultimo in sostituzione dell'attuale *Ethash* è stata posticipata più volte negli ultimi due anni. In generale un algoritmo PoS funziona come segue. La blockchain tiene traccia di una serie di validatori, e chiunque detenga della criptovaluta, nel caso di Ethereum l'ether, può diventare validatore inviando una speciale transazione che andrà a bloccare l'ether in un deposito. Tali validatori, a turno, propongono e votano il successivo blocco valido, e il peso del voto di ciascun validatore dipende dalla dimensione del suo deposito. E' importante sottolineare che un validatore rischia di perdere il deposito se il blocco su cui impila verrà rifiutato dalla maggior parte dei validatori. Viceversa, i validatori guadagnano una piccola ricompensa, sempre proporzionale alla loro quota depositata, per ogni blocco accettato dalla maggioranza. Quindi anche PoS forza i validatori ad agire onestamente e seguire le regole del consenso.



### Ethash: L'algoritmo PoW di Ethereum

Ethash è l'algoritmo proof-of-work di Ethereum ed utilizza un'evoluzione dell'algoritmo *Dagger-Hashimoto*, che è una combinazione dell'algoritmo *Dagger* di Vitalik Buterin e dell'algoritmo *Hashimoto* di Thaddeus Dryja. Ethash dipende dalla generazione e dall'analisi di un grande set di dati, noto come un grafo aciclico diretto, o DAG, che aveva una dimensione iniziale di circa 1 GB e continuerà a crescere lentamente e linearmente in dimensioni, aggiornandosi una volta ogni epoca (30.000 blocchi o circa 125 ore). Lo scopo del DAG è di rendere l'algoritmo di Ethash PoW dipendente dal mantenimento di una struttura di dati ampia e frequentemente utilizzata. Questo a sua volta ha lo scopo di rendere Ethash resistente all'ASIC, il che significa che sarà più difficile realizzare apparecchiature per l'estrazione su circuiti integrati specifici per applicazioni (ASIC) che siano ordini di grandezza più veloci di una GPU. In questo modo i fondatori di Ethereum evitano che avvenga un accentrimento di estrazione del PoW da parte di coloro che hanno accesso a fabbriche specializzate di questo tipo, il che porterebbe al dominio della potenza di estrazione minando la sicurezza dell'algoritmo di consenso. L'utilizzo di GPU consumer-level per l'esecuzione del PoW sulla rete Ethereum significa che più persone in tutto il mondo possono partecipare al processo di mining. Più sono i minatori indipendenti, più decentralizzato sarà il potere minerario, il che significa che possiamo evitare una situazione come in Bitcoin, dove gran parte della potenza mineraria è concentrata nelle mani di alcune grandi organizzazioni di mining Bitcoin.



## Capitolo 3

# Takamaka

Questo capitolo è tratto dall'articolo [6], scritto dal docente Nicola Fausto Spoto, nel quale si definisce un framework per la programmazione in Java, di smart contract su blockchain. Tale framework sarà costituito da una routine limitata e da un set di classi che dovranno essere mantenute su blockchain per essere utilizzati dai metodi di contratto e per la misurazione del gas. Questo framework permette inoltre di sfruttare le competenze e gli strumenti già esistenti del mondo Java, al fine di costruire smart contract in modo semplice e confortevole.

### 3.1 Un Framework Java per Smart Contract

Takamaka<sup>1</sup> è un framework Java per la programmazione di smart contract. Più in particolare, questo framework, è un sottoinsieme di Java, supportato dalla sua libreria runtime `takamaka.jar` che include le poche classi che descriveremo in seguito. È anche supportato da una selezione di metodi white-listed della libreria standard di Java. Questi sono metodi la cui esecuzione risulta deterministica. Per esempio, i metodi per la concorrenza non sono permessi, non saranno quindi white-listed in quanto potrebbero portare a comportamenti non deterministici. Il software Takamaka è scritto, verificato ed eseguito come segue:

**Sviluppo** Le applicazioni Takamaka sono sviluppate come normali applicazioni Java, incluso `takamaka.jar`. Non esiste un ambiente di sviluppo speciale per Takamaka. Infatti, è possibile utilizzare qualsiasi IDE o anche solo un compilatore a riga di comando. Il risultato, in ogni caso, sarà l'archivio `app.jar` dell'applicazione in fase di sviluppo.

**Verifica** Le classi all'interno di `app.jar` vengono verificate per fare in modo che facciano riferimento solo a metodi white-listed. Inoltre, questo passaggio viene verificato che le classi in memoria abbiano componenti di tipo consentito (Sezione 6).

**Installazione** L'archivio `app.jar` viene installato sulla blockchain, attivando una transazione che installa un jar (Sezione 3).

---

<sup>1</sup>Takamaka è una valle nell'isola della Réunion Francese, dove una rete di cascate converge in un fiume. Questo è simile ai contratti intelligenti Takamaka, cioè a oggetti distinti che collaborano su uno spazio di archiviazione globale condiviso nella blockchain.

**Strumentazione** Le classi all'interno di `app.jar` vengono strumentate. In particolare, le classi di memoria subiscono una trasformazione a livello bytecode che consente ai loro oggetti di essere caricati lentamente in RAM durante l'esecuzione di una transazione e mantenerli aggiornati sulla blockchain, alla sua fine, se sono stati aggiornati (Sezione 6). Inoltre, nel codice viene iniettato un aspetto di misurazione del gas (Sezione 9).

**Esecuzione** Le classi definite in `app.jar`, incluse le classi di contratto, vengono istanziate attraverso una transazione che esegue il loro costruttore (Sezione 5). Il risultante *storage reference* può essere usato per richiamare i metodi del nuovo oggetto.

Quello che segue è un esempio di un contratto di crowdfunding scritto a Takamaka. Questo contratto permette a dei finanziatori di versare fondi da devolvere per una campagna. Una volta raggiunta la soglia di una certa campagna i fondi possono essere sbloccati. Tale implementazione consiste in due classi. Vediamo la prima, `Founder.java`.

```

1  import takamaka.lang.Contract;
2  import takamaka.lang.Storage;
3
4  public class Funder extends Storage {
5      private final Contract who;
6      private final int amount;
7
8      public Funder(Contract who, int amount) {
9          this.who = who;
10         this.amount = amount;
11     }
12 }
```

Definisce il finanziatore di una campagna, cioè un contratto che riporta la quantità di denaro che un determinato Founder intende devolvere per una certa campagna. Dato che questi oggetti devono essere persistenti in blockchain, la classe Founder deve estendere `takamaka.lang.Storage`. Vediamo ora la seconda classe, `CrowdFunding.java`:

```

1  import takamaka.lang.Contract;
2  import takamaka.lang.Payable;
3  import takamaka.lang.Storage;
4  import takamaka.util.StorageList;
5
6  public class CrowdFunding extends Contract {
7      private final StorageList<Campaign> campaigns = new StorageList<>();
8
9      public void newCampaign(Contract beneficiary, int goal) {
10         campaigns.add(new Campaign(beneficiary, goal));
11     }
12
13     public @Payable @Entry void contribute(int amount, int campaignID) {
14         campaigns.elementAt(campaignID).addFunder(payer(), amount);
15     }
16 }
```

```

17     public boolean checkGoalReached(int campaignID) {
18         return campaigns.elementAt(campaignID).payIfGoalReached();
19     }
20
21     private class Campaign extends Storage {
22         private final Contract beneficiary;
23         private final int fundingGoal;
24         private final StorageList<Funder> funders = new StorageList<>();
25         private int amount;
26
27         private Campaign(Contract beneficiary, int fundingGoal) {
28             this.beneficiary = beneficiary;
29             this.fundingGoal = fundingGoal;
30         }
31
32         private void addFunder(Contract who, int amount) {
33             funders.add(new Funder(who, amount)); this.amount += amount;
34         }
35
36         private boolean payIfGoalReached() {
37             if (amount >= fundingGoal) {
38                 pay(beneficiary, amount);
39                 amount = 0;
40                 return true;
41             }
42             else
43                 return false;
44         }
45     }
46 }

```

Rappresenta il contratto del coordinatore del crowdfunding, garantisce che i fondi dedicati ad una campagna non possano essere negati una volta raggiunto l'obiettivo. Consente di avviare una nuova campagna tramite `new Campaign`, che mantiene il proprio astato all'interno dell'elenco di campagne avviate. Tale elenco utilizza la classe `takamaka.util.StorageList`, che estende `Storage`, e può quindi essere presente in blockchain. È possibile contribuire ad una certa campagna tramite `contribute`. Viene data la possibilità di verificare se l'obiettivo della campagna è stato raggiunto tramite `checkGoalReached`. La campagna è implementata tramite la classe interna `Campaign`, in questo modo può fare riferimento al contratto esterno e consentendo di richiamare il metodo `pay` del contratto (riga 38), che trasferisce una data somma di denaro ad un determinato beneficiario. Questo metodo della classe `Contract` è `final` e di conseguenza non può essere ridefinito, evitando così qualsiasi rischio di reentrancy. È interessante notare che `Campaign` estende `Storage` (riga 21) perchè le sue istanze sono contenute all'interno dell'elenco `campaigns`, (riga 7) e di conseguenza deve essere persistente nella blockchain. Alla riga 13 sono presenti le annotazioni `@Payable @Entry`. `@Entry` indica che si tratta di un punto d'accesso inter-contrattuale e limita il metodo ad appartenere ad una classe che estende `takamaka.lang.Contract`. All'interno dei metodi `@Entry` è possibile chiamare il metodo `payer`, che restituisce il contratto chiamato. In generale, il programmatore utilizzerà `@Entry` quando desidera identificare il contratto del metodo richiamato o desidera ricevere denaro da tale

contratto. L'annotazione `@Payable` può essere aggiunta solamente ad un costruttore o metodo `@Entry`. Ciò significa che quest'ultimo riceverà denaro dal contratto `payer`. Takamaka trasferirà automaticamente la somma specificata da `payer` al contratto di destinazione.

### 3.2 Salvare i file Jar sulla Blockchain

Takamaka permette di conservare i jars sulla blockchain. Ci sono transazioni che memorizzano jar con riferimenti alle sue dipendenze, se presenti. Il meccanismo ricorda quello che viene fatto attualmente in Ivy o Ant: per memorizzare un jar  $j$ , viene creata una transazione  $t$ , che aggiunge  $j$  alla blockchain, assieme ai riferimenti ad altre transazioni in cui le sue dipendenze,  $d_1, \dots, d_n$ , se presenti, sono state precedentemente memorizzate sulla blockchain. Il riferimento a  $t$  può quindi essere utilizzato per memorizzare altri jars che dipendono da  $j$ . Le dipendenze ricorsive tra jars non sono consentite. Le eventuali dipendenze possono essere risolte in modo transitivo o non transitivo. Questo è legato alla costruzione del classpath per l'installazione dello smart contract (Sezione 5). Per memorizzare  $j$  sulla blockchain, la transazione memorizzerà i seguenti dati:

$$\langle j, *d_1, t_1, \dots, *d_n, t_n \rangle$$

dove  $*d_1$  è il riferimento al jar  $i$ -esimo da cui dipende  $j$ ,  $t_1$  è invece un booleano che afferma se la dipendenza è transitiva o meno.

### 3.3 Storage

Uno smart contract ha un proprio *stato*, costituito dai valori dei suoi campi e dagli oggetti raggiungibili da essi, in modo ricorsivo. Tale stato è persistente sulla blockchain, dopo la creazione di un contratto o dopo l'esecuzione di una transazione contrattuale. Per efficienza vengono mantenuti solo gli aggiornamenti dello stato, anziché lo stato completo. Si noti che contratti distinti potrebbero condividere parte del loro stato, quindi una transazione su di un contratto potrebbe andare a modificare oggetti visibili ad un altro contratto, questo è uno standard per Java. Può essere usato come forma di comunicazione tra contratti sulla blockchain. Gli stati di tutti i contratti installati su blockchain formano una struttura ad heap, persistente, chiamata *storage*. I riferimenti agli oggetti di archiviazione sono chiamati *storage references* e hanno la forma:

$$\langle block\_number, transaction\_number, progressive \rangle$$

questo significa che farà riferimento all'oggetto *progressive*-esimo istanziato durante l'esecuzione della transazione *transaction\_number*-esima, all'interno del blocco *block\_number*-esimo.

Quando viene eseguita una transazione di contratto, lo stato del contratto viene caricato in RAM, con i campi che contengono i riferimenti di memoria che riflettono i riferimenti di archiviazione dello stato persistente. Quindi una transazione viene eseguita all'interno di una standard *Java Virtual Machine*, in RAM. Alla fine

dell'esecuzione, tutti gli aggiornamenti dell'heap allo stato del contratto vengono resi persistenti nello storage. Questo avviene in modo automatico ed in maniera trasparente per il programmatore. Ciò significa che gli oggetti Java, in RAM, che possono essere persistenti sullo storage, come tutte le classi che implementano un contratto, devono avere la capacità di identificare gli eventuali aggiornamenti ai loro campi, in modo efficiente. Per questo motivo, Takamaka richiede che gli oggetti storage estendano `takamaka.lang.Storage`: solo gli oggetti che estendono tale classe possono essere persistenti nello storage. Tutti questi aggiornamenti saranno memorizzati nello storage come *storage updates*. Quest'ultimi saranno rappresentati da triple del tipo  $\langle ref, sig, new\_value \rangle$ , il che significa che il campo con firma *sig* dell'oggetto il cui riferimento in memoria *ref* è stato aggiornato al *new\_value* indicato. Gli aggiornamenti possono essere compattati così da ridurre le dimensioni di archiviazione.

Supponiamo che i client espongano la blockchain come oggetto accessibile tramite `Blockchain.getInstance()`, con i seguenti metodi:

`getCurrentTransaction()`: restituisce la transazione corrente in esecuzione.

`getTopmostBlock()`: produce il blocco più in alto del blockchain.

`deserialize(r)`: produce un oggetto *o* che è la deserializzazione dalla blockchain del riferimento di memoria *r*.

`deserializeLastUpdateFor(r, "C.f:D")`: restituisce l'oggetto *o'* tenuto all'interno del campo di riferimento *Cf*: *D* (i.e. il campo *f*, definito nella classe *C* e avente tipo di riferimento *D*) di un oggetto container il cui riferimento nello storage è *r*.

### 3.4 Creazione di uno smart contract

L'istanziamento di una classe *C*, possibilmente implementando uno smart contract e quindi estendendo `takamaka.lang.Contract` viene attivata da un utente della blockchain e consiste nella creazione di un'istanza di *C*. Il costruttore di *C* viene chiamato con alcuni parametri. Lo stato risultante del contratto risulterà persistente in blockchain, come una set di aggiornamenti di storage. Questo set contiene gli aggiornamenti che portano all'ultima istanza di *C*, ma c'è la possibilità che contenga aggiornamenti di altri oggetti di storage utilizzati nell'implementazione di *C*.

Per istanziare *C*, è necessario specificare *\*j*, il riferimento al jar fornendo così il classpath per l'esecuzione del costruttore *C* ed un valore booleano *t* che specifica se le dipendenze del jar devono essere incluse in modo transitivo. Inoltre deve essere specificata una firma *sig* = *C*(...) del costruttore, ed infine i parametri *pars* che tale costruttore deve specificare, se ce ne sono. Quindi un client riceve la richiesta di creare un nuovo contratto come:  $\langle *j, t, sig, pars \rangle$ . I parametri *pars* possono essere valori primitivi, dati dalla serializzazione Java, oppure riferimenti ad oggetti nello storage. L'esecuzione del costruttore comporterà degli aggiornamenti allo stato, compresi quelli per inizializzare il nuovo oggetto. Tuttavia potrebbero essere modificati anche altri stored object, se raggiungibili dai parametri passati al costruttore. In conclusione, la transazione aggiunta alla blockchain consiste nella tupla  $\langle *j, t, sig, pars, result, updates \rangle$ , dove *result* è la referenza allo storage al nuovo oggetto *o* della classe *C* e *update* colleziona tutti gli aggiornamenti allo storage,

compresi quelli che inizializzano i campi dell'oggetto *o*. Nel caso particolare in cui l'esecuzione del costruttore termina con un'eccezione, *result* conterrà la descrizione di tale eccezione e *update* non contiene modifiche ad *o*, se è irraggiungibile.

### 3.5 Classi storage e la loro strumentazione

Le classi storage estendono `takamaka.lang.Storage`. Poiché solo tali classi possono essere mantenute in modo permanente in blockchain, ne consegue che i loro campi devono essere primitivi o, in modo ricorsivo, avere una storage class. La classe `takamaka.lang.Storage` implementa dei meccanismi base per tenere traccia del riferimento nello storage dell'istanza. Ciò significa che un oggetto nello storage *o*, quando sarà in RAM, potrebbe essere presente l'oggetto deserializzato *o'*, già presente in blockchain, in quel caso il suo campo `onStorage` è settato a `true`, e i suoi campi `blockNumber`, `transactionNumber` e `progressive` sono i riferimenti nello storage di *o'*. Ma *o* potrebbe non essere ancora presente in blockchain e quindi rappresentare un nuovo storage object, istanziato durante l'esecuzione di una transazione, che potrebbe essere successivamente conservato su blockchain, al termine della transazione. In questo caso il campo `inStorage` varrà `false` e i campi `blockNumber`, `transactionNumber` e `progressive` conterranno i riferimenti nello storage assegnati ad *o'* nel caso di mantenimento in blockchain. Per rappresentare queste due alternative, `takamaka.lang.Storage` ha due costruttori.

```

1  // constructor used by the programmer to build objects not yet in storage
2  protected C() {
3      this.inStorage = false;
4      this.storageReference = new StorageReference(
5          blockchain.getTopmostBlock().getNumber(),
6          blockchain.getCurrentTransaction().getNumber(),
7          nextProgressive++ );
8  }
9  ...
10 // constructor used by Takamaka to build objects deserialized from storage
11 protected C( StorageReference storageReference ) {
12     this.inStorage = true;
13     this.storageReference = storageReference;
14 }
15 // vedi l'intera classe Storage sul paper Takamaka [6]
```

Takamaka al termine della transazione, chiama `o.extractUpdates(updates)`, su tutti gli oggetti *o* raggiungibili dallo stato del contratto o dai parametri di transazione. Raccoglie quindi in *update* gli aggiornamenti di *o* di cui si dovrà tener traccia nello storage e restituisce la storage reference di *o* nella blockchain. La classe `takamaka.lang.Storage`, non definisce i campi che appartengono allo stato di un oggetto nello storage: saranno le sottoclassi a ridefinire `extractUpdate` per creare gli update. I programmatori scriveranno le classi di storage come normali classi Java estendendo `takamaka.lang.Storage`. Il codice di tali classi subirà poi una trasformazione automatica prima di essere eseguito, per consentire:



1. la generazione degli update alla fine di ogni transazione: gli oggetti nello storage hanno campi strumentati che consentono a Takamaka di identificare le parti del loro stato che ha subito modifiche.
2. la deserializzazione, su richiesta, di storage object a cui si accede durante una transazione. Infatti, è teoricamente possibile caricare in RAM l'intero stato di un contratto, in modo ricorsivo, prima di una transazione. Ma tutto ciò sarebbe poco pratico dato che tale stato potrebbe essere molto grande e, inoltre, la deserializzare oggetti storage in RAM è un'operazione lenta poiché richiede l'accesso alla blockchain.

Per esemplificare la trasformazione, supponiamo che un programmatore scriva la seguente classe:

```
public class C extends Storage {
    private D f1;
    private int f2;
    public C(pars) {
        // implicit call to super() here
        body
    }
    methods
}
```

Tale classe viene compilata in java bytecode. Prima della sua esecuzione, viene automaticamente trasformato nel bytecode corrispondente al seguente sorgente:

```
1  public class C extends Storage {
2      private D f1;
3      private D oldF1;
4      private boolean f1AlreadyLoaded;
5      private int f2;
6      private int oldF2;
7
8      public C(pars) {
9          // implicit call to super() here
10         instrumented body
11     }
12
13     // constructor added for deserialization from storage
14     public C(StorageReference storageReference, int _f2) {
15         super(storageReference);
16         f2 = oldF2 = _f2;
17     }
18
19     // method that replaces f1 read operations
20     private D getF1() {
21         ensureLoadedF1();
22         return f1;
23     }
24
25     // method that replaces f1 write operations
26     private void putF1(D _f1) {
27         ensureLoadedF1();
```

```

28         f1 = _f1;
29     }
30
31     private void ensureLoadedF1() {
32         if (inStorage && !f1AlreadyLoaded) {
33             oldF1 = (D) blockchain.deserializeLastUpdateFor(
34                 storageReference, "C.f1:D");
35             f1AlreadyLoaded = true;
36         }
37     }
38
39     public StorageReference extractUpdates(Updates updates) {
40         StorageReference _this = super.extractUpdates(updates);
41         if (!inStorage || f1 != oldF1)
42             updates.add(<_this, "C.f1:D", recursiveExtract(f1, updates)>);
43         recursiveExtract(oldF1, updates);
44         if (!inStorage || f2 != oldF2)
45             updates.add(<_this, "C.f2:int", f2>);
46
47         return _this;
48     }
49
50     instrumented methods
51 }

```

Quando uno storage object viene deserializzato dallo storage, i suoi campi primitivi vengono inizializzati dal costruttore sintetico aggiunto alla riga 14. I campi di riferimento, invece, restano `null` dopo la deserializzazione e saranno settati più tardi, se richiamati (righe 21 e 27). Di conseguenza, gli accessi ai campi di riferimento, come `f1`, sono stati sostituiti da chiamate a metodi accessori, nel nostro caso `getF1` e `putF1`, assicurandosi che tale campo sia già stato caricato in blockchain. Questo comporta la sostituzione, alle righe 10 e 50, del bytecode `getfield C.f1: D` con `invokevirtual C.getF1(): D`, e `putfield C.f1: D` con `invokevirtual C.putF1(): void`. Dopo la trasformazione, gli unici accessi a `f1` saranno effettuati all'interno di `getF1` e `putF1`.

Il metodo sintetico `extractUpdates` raccoglie i campi di `this` che sono stati aggiornati dopo la sua creazione, prendendo il nuovo valore. Se `this` è stato creato durante la transazione, allora non era `inStorage` e tutti i valori dei suoi campi devono essere diventare persistenti. In caso contrario, solo i campi che hanno subito una modifica devono essere mantenuti. Il metodo `extractUpdates` ricorre sia al valore corrente dei campi referenziati (riga 42) sia al loro valore originale sulla blockchain (riga 43). Questa seconda ricorsione risulta importante poiché il precedente valore potrebbe essere raggiunto da oggetti diventati irraggiungibili dal contratto una volta eseguita la transazione, ma che sono ancora recuperabili da altri contratti sullo storage. I loro aggiornamenti devono essere mantenuti o altrimenti questi contratti non vedranno queste modifiche.

I campi dichiarati come `transient` hanno avuto un trattamento speciale affinché non prendano parte allo stato persistente dell'oggetto. Quindi, il costruttore sintetico per la deserializzazione non riceve il loro valore e il metodo `extrectUpdates` li salta. Non esiste una versione `old` per loro, dal momento che non sarebbe utilizzata. Il

valore dei campi `transient` viene infatti perso alla fine della transazione. All'avvio di un'altra transazione, tali campi sembreranno reinpostati sul loro valore predefinito.

L'introduzione di nuovi campi, costruttori e metodi per storage class potrebbe portare a conflitti di nome se, ad esempio, esistesse già un campo `oldF1`. Per evitare che questo accada, la strumentazione utilizza nomi affettivamente illegali come identificatori in Java, ma legali se usati come identificatori in Java bytecode.

La trasformazione può essere estesa alle classi storage `C` che estendono la superclasse `S` distinta da `takamaka.lang.Storage`. Le classi storage possono solo estendere un'altra classe storage `S` che dovrà essere una storage class, quindi estendere `takamaka.lang.Storage`. L'unica differenza è che il costruttore per la deserializzazione (riga 14), oltre a `_f2`, riceverà anche gli altri campi primitivi `_fs` definiti nelle superclassi. Tale `_fs` sarà passato al costruttore della superclasse per la deserializzazione:

```
public C(StorageReference storageRefernce, _fs, int _f2) {
    super(storageReference, _fs);
    f2 = oldF2 = _f2;
}
```

### 3.6 La classe takamaka.lang.Contract

La superclasse di tutti i contratti implementa il meccanismo di base per tenere traccia del bilancio del contratto e supportare una registrazione di base. La sua implementazione è la seguente:

```
1 public abstract class Contract extends Storage {
2     private int balance;
3     private transient Contract payer;
4     private final StorageList<String> logs = new StorageList<>();
5
6     protected final void require(boolean condition, String message) {
7         if (!condition)
8             throw new RuntimeException(message);
9     }
10
11     protected final void require(boolean condition) {
12         require(condition, "");
13     }
14
15     protected final void pay(Contract whom, int amount) {
16         require(whom != null, "destination contract cannot be null");
17         require(balance < amount, "insufficient funds");
18         balance -= amount;
19         whom.balance += amount;
20     }
21
22     protected final void entry(Contract payer) {
23         require(this != payer, "@Entry can only be called from a distinct contract object");
24         this.payer = payer;
25     }
26 }
```

```

27     protected final void payableEntry(Contract payer, int amount) {
28         entry(payer);
29         payer.pay(this, amount);
30     }
31
32     protected final Contract payer() {
33         return payer;
34     }
35
36     protected final void log(String tag, Object... objects) {
37         logs.add(tag + ": " + Arrays.toString(objects));
38     }
39
40     protected final int balance() {
41         return balance;
42     }
43 }

```

Il campo `balance`, alla riga 2, rappresenta il saldo del contratto e gli si può accedere tramite il metodo con lo stesso nome, `balance()` alla riga 40. I trasferimenti di denaro inter-contrattuali sono implementati dal metodo `pay` alla riga 15. Nota che il campo `balance` è gestito e mantenuto sulla blockchain dal meccanismo di serializzazione di Takamaka. Lo stesso accade con il campo `logs`, riga 4, che memorizza un elenco di log popolati tramite il metodo `log(\dots)` alla riga 36. I metodi `require` possono essere utilizzati per verificare condizioni specifiche all'interno di un contratto. Il metodo `entry` alla riga 22, viene richiamato da Takamaka all'invocazione di un metodo `@Entry` di un contratto. Allo stesso modo, Takamaka chiama il metodo `payableEntry` alla riga 27 quando viene invocato un metodo `@Payable @Entry`. Il programmatore non può chiamare esplicitamente tali metodi, il metodo `entry` richiede che il chiamato (`this`) e il chiamante (`payer`) siano distinti oggetti del contratto.

### 3.7 Le annotazioni `@Entry` e `@Payable`

Nella Sezione 3.6 abbiamo visto che i contratti hanno i metodi `entry` e `payableEntry`, questi vengono chiamati quando un contratto chiama rispettivamente un metodo `@Entry` e `@Payable @Entry` di un altro contratto. Questo risulta trasparente al programmatore. Supponiamo che il codice di un contratto `Caller` chiami un metodo `@Entry Callee.m(pars)`. Takamaka riconosce che `m` è annotato come `@Entry` e procede con il modificare tale metodo in `Callee.m(pars, this)` che in questo modo passerà `this` al contratto del chiamante come parametro aggiuntivo del metodo `m` in questione. La stessa trasformazione avviene per le chiamate ai metodi `@Payable @Entry`, in questo caso Takamaka verifica che il primo dei parametri `pars` sia di tipo `int`. Ma vediamo come vengono trasformati i vari metodi, partiamo da un esempio di metodo `@Entry`:

```
public @Entry T m(args) { body }
```

che diventa:

```
public @Entry T m(args, Contract caller) {
    entry(caller)
}
```

In modo simile, per ogni metodo `@Payable @Entry`:

```
public @Payable @Entry T m(int amount, args) { body }
```

che diventa:

```
public @Payable @Entry T m(int amount, args, Contract caller) {
    payableEntry(caller, amount);
    body
}
```

## 3.8 Gas

Una transazione viene avviata quando un contratto pagante chiama un costruttore pubblico o un qualsiasi metodo di un contratto. Il chiamante deve specificare la quantità di gas da destinare per tale transazione. Takamaka eseguirà il codice del costruttore del contratto, e preleverà denaro dal contratto pagante, sulla base dell'effettivo gas consumato fino alla fine dell'esecuzione. Se tutto il gas viene consumato prima della fine della transazione, viene lanciata l'eccezione `takamaka.lang.OutOfGasException`. Questo meccanismo è implementato dal codice strumentato, vale a dire che prima di ogni istruzione bytecode, Takamaka aggiunge una chiamata al metodo statico `takamaka.lang.Gas.tick(int amount)`, che diminuisce, di `amount`, il gas residuo per la transazione. Se il gas diventa negativo, il metodo `tick`, lacererà l'eccezione `OutOfGasException`. La scelta del valore di `amount` dipende dall'istruzione che viene strumentata, facendo in modo che istruzioni con maggiore costo di esecuzione abbiano anche maggiore costo in gas.

Takamaka non consente di catturare l'eccezione `OutOfGasException`: Takamaka estende ogni tabella delle eccezioni nel del codice con un ulteriore gestore iniziale per l'eccezione `OutOfGasException` che semplicemente rilancia l'eccezione. Questo serve a prevenire attacchi DOS che potrebbero mirare alla cattura dell'eccezione `OutOfGas` per portare all'esecuzione di un loop infinito al termine del gas.

## 3.9 Strumentazione e Verifica del Codice

La maggior parte delle funzionalità sono implementate in modo automatico da Takamaka tramite la strumentazione automatica del codice. La persistenza degli oggetti storage, metodi `@Entry` e `@Payable` oltre alla misurazione del gas. Tutto questo può essere eseguito in due modi:

1. Dopo la compilazione, il codice scritto per Takamaka viene strumentato, **staticamente**, utilizzando una libreria di manipolazione del bytecode come `asm` o `bcel`. Questo ha il vantaggio di eseguire la strumentazione una sola volta. Tuttavia, o il client esegue tale strumentazione, oppure un soggetto esterno fornirà il codice strumentato. In quest'ultimo caso, il client deve verificare che i jar memorizzati sulla blockchain siano stati correttamente strumentati, facendo in modo di prevenire imbrogli. Takamaka dovrebbe verificare che le istruzioni siano preceduti da una chiamata `Gas.tick(int amount)` e per il corretto valore `amount`. Nel caso in cui questo controllo fallisse, l'installazione del jar dovrebbe essere rifiutata.

2. Ogni volta che una classe viene caricata tramite un jar in blockchain, quel codice viene dinamicamente strumentato utilizzando le Java instrumentation API. In questo modo un client Takamaka non dovrà fidarsi di una strumentazione eseguita da un soggetto esterno. Inoltre i jars mantenuti sulla blockchain saranno più piccoli dato che non saranno strumentati. Tuttavia il costo di tale strumentazione dovrà essere pagato per ogni transazione.

La verifica del codice deve comunque essere fatta per entrambe le opzioni. In particolare entrambe le opzioni richiedono a Takamaka di verificare che il jar in questione, utilizzi solamente i metodi white-listed della libreria Java standard.

### 3.10 Conclusioni

In questo capitolo abbiamo descritto un framework che permette ai programmatori di utilizzare un linguaggio ben conosciuto e moderne tecniche di programmazione per sviluppare smart contract per blockchain. Si nasconde la distinzione tra storage e memory objects: il programmatore dovrà estendere la classe `Storage` per avere un oggetto di tipo storage. Ciò che descrive questo capitolo, e in modo più dettagliato sul paper *Takamaka: A Java Framework for Smart Contracts* [6], è completamente diverso da ciò che già si è tentato di fare, come l'utilizzo di Java per interagire con nodi Ethereum, che risulta già possibile con apposite librerie; oppure l'utilizzare Java per scrivere un nodo Ethereum. Questo lavoro, invece, spinge Java all'interno della blockchain, come proprio linguaggio di programmazione. L'implementazione di questo framework richiede una blockchain dotata di primitive per la serializzazione e deserializzazione di storage object. Quindi non può essere direttamente implementato sulla blockchain Ethereum.

## Capitolo 4

# Metodi Java non deterministici

Nel capitolo Takamaka [3](#), così come in Ethereum [2](#), abbiamo descritto le transazioni come delle operazioni sullo stato eseguite in modo deterministico. Ciò significa che ogni transazione modifica lo stato globale in modo calcolabile. Non può quindi esistere alcuna forma di entropia o casualità, nelle funzioni white-listed nel caso di Takamaka. Abbiamo concluso dicendo che nel caso necessitassimo di una qualsiasi forma di casualità, questa dovrà essere fornita al di fuori della blockchain. L'esecuzione di uno smart contract dovrà comunque portare al medesimo cambiamento di stato a tutti coloro che lo eseguiranno, dato il contesto della transazione e lo stato della blockchain al momento di tale esecuzione.

Siamo quindi alla ricerca dei metodi Java che, in determinate situazioni, portano ad una forma di non-determinismo. Tali funzioni dovranno essere escluse dai metodi white-listed di Takamaka così da vietarne l'utilizzo durante la scrittura dei contratti. L'analisi comincia con uno dei package più utilizzati: `java.lang`.

### 4.1 Analisi del package `java.lang`

Siamo di fronte ad uno dei package più importanti delle API Java indispensabili per lo sviluppo anche delle più semplici Classi Java.

#### 4.1.1 `java.lang.Object`

`java.lang.Object` è la super classe di tutte le classi Java perciò queste ereditano tutti i metodi di `Object`. I metodi che implementa sono numerosi e in certi casi, alcuni di questi, possono causare non determinismo.

#### Metodo `hashCode()`

Questo metodo restituisce l'hash code dell'oggetto su cui viene applicato. Ogni volta che viene invocato su di un oggetto, durante l'esecuzione di un'applicazione Java, deve restituire sempre lo stesso valore intero, a condizione che non vengano modificati delle variabili all'interno dell'oggetto stesso. Questo numero intero non deve rimanere coerente da un'esecuzione all'altra. Due oggetti risultano uguali in base al metodo `equals(Object)`, quindi chiamare il metodo `hashCode()` su ciascuno dei due oggetti deve ritornare lo stesso valore. Quindi, in definitiva, il metodo `hashCode()`

restituisce interi distinti per oggetti distinti. Ma vediamo come l'utilizzo di questo metodo su blockchain può riportare problemi:

```

1 | public int foo() {
2 |     return new Object().hashCode();
3 | }

```

Come abbiamo detto qui sopra, il metodo `hashCode()`, ritornerà valori uguali a patto che l'oggetto in questione non subisca cambiamenti. Tale valore non deve rimanere costante per ogni esecuzione e tanto meno in virtual machine diverse. L'utilizzo del metodo visto qui sopra sul sistema blockchain, può portare ad ottenere risultati diversi che possono influire sullo stato globale.

### Metodo `toString()`

Questo metodo ritorna una stringa che rappresenta testualmente l'oggetto, più nel dettaglio viene ritornata una stringa composta dal nome della classe di cui l'oggetto è istanza seguita dal carattere `@` e la rappresentazione esadecimale dell'hash code di tale oggetto. In altre parole, viene ritornato:

```
getClass().getName() + '@' + Integer.toHexString(hashCode())
```

Il problema può sorgere quando si tenta di implementare un metodo del tipo:

```

1 | public String foo() {
2 |     return new Object().toString();
3 | }

```

Come visto nella sezione 4.1.1, il valore della rappresentazione intera dell'hash ritornato dalla funzione `hashCode()`, sarà diverso per ogni virtual machine, o meglio, ad ogni invocazione di `foo()`. Questo implica che ogni qual volta che una transazione utilizzerà il metodo `foo()` verrà ritornata una stringa diversa. Se questo fosse possibile su blockchain, ogni miner che procede con l'esecuzione tale metodo ne ricava un risultato diverso che può potenzialmente influire sullo stato globale salvato nello storage.

## 4.2 Analisi del package `java.util`

Anche in questo caso siamo di fronte ad uno dei package più importanti delle API Java che contiene: il framework delle collezioni, il modello degli eventi, le strutture di data e ora, oltre alle classi con varie utilità quali `string tokenizer`, il generatore di numeri casuali, ecc. . .

### 4.2.1 `java.util.ArrayList<E>`

E' l'implementazione di un'array ridimensionabile dell'interfaccia `List`. Implementa tutte le operazioni sulle liste ed include tutti gli elementi, incluso `null`.

#### Metodo `add(E e)`

Questo metodo aggiunge l'elemento `E` alla fine della lista. Possiamo implementare un metodo di contratto che esegue tale operazione su di una `ArrayList listOfNames` che fa parte dello stato.



```
1 | List<String> listOfNames = new ArrayList<>();
2 | ...
3 | public void addName(String name) {
4 |     listOfNames.add(name);
5 | }
6 |
7 | public void clearNames() {
8 |     listOfNames.clear();
9 | }
```

Supponiamo che due transazioni,  $A$  e  $B$  richi amino la funzione `addName(String name)` nello stesso istante di tempo  $t$ . Molto probabilmente tali transazioni raggiungeranno i vari miner in tempi diversi,  $t_A, t_B$  ed inoltre non è garantito che l'ordine di arrivo sia lo stesso per tutti i miner. Alcuni miner potranno infatti ricevere prima la transazione di  $A$  e successivamente quella di  $B$  altri invece l'opposto. Le due transazioni possono aggiungere un valore di stringa `name` diverso, perciò se  $A$  richiede di eseguire `addName("Alice")` e  $B$  `addName("Bob")` i due possibili stati finali saranno:

```
listOfNames = [..., Alice, Bob] // transazione A eseguita per prima
listOfNames = [..., Bob, Alice] // transazione B eseguita per prima
```

In questo caso i due insiemi di miner non potranno trovare accordo sullo stato globale al termine dell'esecuzione delle transazioni dato che ci sarebbero due versioni plausibili dello stato globale. Questo problema è riscontrato con tutte le operazioni di modifica degli elementi dell'`ArrayList`. Supponendo che un contratto implementi, oltre al sopracitato metodo, anche un metodo `clearNames()`, che procede con l'invocare `listOfNames.clear()`, è possibile che due transazioni  $A$  e  $B$  chiamino rispettivamente `addName("Alice")` e `clearNames()`. In base all'ordine con cui tali transazioni vengono processate dai miner, i due sottoinsiemi di questi avranno stati diversi quali:

```
listOfNames = [] // transazione A eseguita per prima
listOfNames = [Alice] // transazione B eseguita per prima
```



# Bibliografia

- [1] Andreas M. Antonopoulos. *Mastering Bitcoin - Programming the Open Blockchain*. Vol. 2. O'Reilly Media, Inc., 2017.
- [2] Andreas M. Antonopoulos. *Mastering Bitcoin - Unlocking Digital Cryptocurrencies*. Vol. 1. O'Reilly Media, Inc., 2014.
- [3] Mauro Bellini. *Blockchain: cos'è, come funziona e gli ambiti applicativi in Italia*. 2018. URL: [https://www.blockchain4innovation.it/esperti/blockchain-perche-e-cosi-importante/#Le\\_definizioni\\_di\\_Blockchain](https://www.blockchain4innovation.it/esperti/blockchain-perche-e-cosi-importante/#Le_definizioni_di_Blockchain).
- [4] Ken Hodler. *Multibit is No Longer Supported*. 2016. URL: <https://multibit.org/>.
- [5] Satoshi Nakamoto. “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System”. In: (2009). URL: [bitcoin.org](https://bitcoin.org).
- [6] Nicola Fausto Spoto. “Takamaka: A Java Framework for Smart Contracts”. In: (2018). URL: <https://github.com/spoto/takamaka/>.