

Come emettere una moneta digitale di banca centrale

David Chaum*
xx Network

Christian Grothoff†
BFH‡ e Progetto GNU

Thomas Moser§
Banca Nazionale Svizzera

Questa versione: febbraio 2022

Prima versione: maggio 2020

Sommario

Con l'emergere di Bitcoin e delle criptovalute stabili (per es. Diem, già nota come Libra) recentemente proposte dai colossi del web, le banche centrali affrontano una crescente concorrenza da parte di operatori privati che offrono la propria alternativa digitale al contante fisico. Non trattiamo qui la questione normativa se una banca centrale debba emettere o meno una moneta digitale. Contribuiamo invece all'attuale dibattito di ricerca spiegando in che modo una banca centrale potrebbe farlo, se lo volesse. Proponiamo un sistema basato su token senza tecnologia di registro distribuito, e mostriamo che le monete elettroniche emesse in passato, basate solo su software, possono essere migliorate per tutelare la privacy nelle transazioni, soddisfare i requisiti normativi in modo efficace e offrire un livello di protezione resistente ai computer quantistici contro il rischio sistemico per la privacy. Né la politica monetaria né la stabilità del sistema finanziario sarebbero realmente interessate da questo sistema dal momento che una CBDC emessa in questo modo replicherebbe il contante fisico anziché i depositi bancari.

JEL: E42, E51, E52, E58, G2

Parole chiave: monete digitali, banca centrale, CBDC, firma cieca, criptovalute stabili, *stablecoins*

Ringraziamenti

Vorremmo ringraziare Michael Barczay, Roman Baumann, Morten Bech, Nicolas Cuche, Florian Dold, Andreas Fuster, Stefan Kügel, Benjamin Müller, Dirk Niepelt, Oliver Sigrist, Richard Stallman, Andreas Wehrli e tre collaboratori anonimi per i loro commenti e suggerimenti. Le posizioni, le opinioni, i risultati e le conclusioni o raccomandazioni espresse in questo documento sono strettamente quelle degli autori. Non riflettono necessariamente le posizioni della Banca nazionale svizzera (BNS). La BNS declina ogni responsabilità per eventuali errori, omissioni o inesattezze che dovessero comparire nel documento.

Traduzione: Dora Scilipoti, con contributi da Luca Saiu

*david@chaum.com

†christian.grothoff@bfh.ch

‡Università di Scienze Applicate di Berna

§thomas.moser@snb.ch

1 Introduzione

Dall'avvento dei personal computer negli anni ottanta, e più specificamente da quando nel 1991 la *National Science Foundation* revocò le restrizioni sull'uso di Internet per scopi commerciali, c'è stata una ricerca sulla creazione di moneta digitale per i pagamenti online. La prima proposta è stata quella di Chaum (1983). Sebbene tali metodi siano stati attuati, non hanno preso piede; le carte di credito sono invece diventate il metodo più diffuso per i pagamenti online. La proposta di Nakamoto (2008) per una versione puramente *peer-to-peer* di moneta digitale e il conseguente lancio di Bitcoin avvenuto con successo hanno inaugurato una nuova era di ricerca e sviluppo di valute digitali. La piattaforma CoinMarketCap elenca oltre 5.000 criptovalute. Recentemente le banche centrali hanno iniziato a considerare, o almeno a studiare, l'emissione di monete digitali (vedi Auer & Böhme, 2020; Auer et al., 2020; Boar et al., 2020; Kiff et al., 2020; Mancini-Griffoli et al., 2018).

Attualmente le banche centrali emettono due tipi di moneta: (i) riserve sotto forma di conti di regolamento presso le banche centrali, destinate solo agli operatori dei mercati finanziari, e (ii) divisa disponibile per tutti sotto forma di banconote. Di conseguenza, la letteratura sulla moneta digitale di banca centrale (*Central Bank Digital Currency* - CBDC) distingue tra (a) CBDC all'ingrosso ad accesso ristretto e (b) CBDC al dettaglio disponibile per il pubblico (si veda, ad esempio, Bech & Garratt, 2017). Una CBDC all'ingrosso sarebbe meno destabilizzante per il sistema attuale dato che le banche e gli operatori dei mercati finanziari hanno già accesso alla moneta digitale della banca centrale sotto forma di conti presso questa istituzione, che utilizzano per regolare i pagamenti interbancari. La domanda qui è se la tokenizzazione della moneta di banca centrale e la tecnologia di registro distribuito (*Distributed Ledger Technology* - DLT) offrano vantaggi particolari rispetto ai sistemi con regolamento lordo in tempo reale (*Real-Time Gross Settlement* - RTGS) esistenti. Finora la risposta è negativa, almeno per i pagamenti interbancari nazionali (vedi Chapman et al., 2017).

Una CBDC al dettaglio, che sarebbe una nuova forma di moneta di banca centrale disponibile per il pubblico, potrebbe essere più destabilizzante per il sistema attuale, a seconda di come è progettata. Più una CBDC compete con i depositi delle banche commerciali, maggiore è la minaccia ai finanziamenti bancari, con effetti potenzialmente negativi sul credito bancario e sull'attività economica (vedi Agur et al., 2019). Tuttavia, una CBDC al dettaglio potrebbe anche essere vantaggiosa (vedi Bordo & Levin, 2017; Berentsen & Schär, 2018; Bindseil, 2020; Niepelt, 2020; Sveriges Riksbank, 2020; Bank of England, 2020). Mettere a disposizione di tutti una moneta elettronica di banca centrale esente dal rischio di controparte potrebbe migliorare la stabilità e la resilienza del sistema di pagamenti al dettaglio. Potrebbe inoltre fornire un'infrastruttura di pagamento neutrale per incoraggiare la concorrenza, l'efficienza e l'innovazione. Nel complesso, è probabile che i costi e i benefici di una CBDC al dettaglio differiscano da un paese all'altro. Per il punto di vista della Banca nazionale svizzera, che non ha in programma l'emissione di una CBDC al dettaglio, si veda Jordan (2019).

Nel presente documento analizziamo la CBDC al dettaglio, ma senza affrontare la questione se una banca centrale *debba o meno* emetterla. Ci concentriamo invece sul possibile design di una CBDC. L'interesse per la progettazione di CBDC è recentemente aumentato considerevolmente (si veda, ad esempio, Allen et al., 2020; Bank of England, 2020). Il design che proponiamo differisce notevolmente da altre proposte. Il nostro sistema si basa sulla tecnologia eCash descritta da Chaum (1983) e Chaum et al. (1990), migliorandola. In particolare, proponiamo una CBDC basata su token, solo con software e senza tecnologia di registro distribuito. La DLT è un'architettura interessante in assenza di un operatore centrale o se le entità che interagiscono non accettano di nominare un operatore centrale fidato. Questo non è certo il caso di una CBDC al dettaglio emessa da una *banca centrale*. Distribuire il registro delle transazioni della banca centrale con una *blockchain* non fa che aumentare i costi di transazione; non porta alcun vantaggio tangibile nell'implementazione da parte di una banca centrale. L'utilizzo della DLT per emettere moneta digitale può essere utile in assenza di una banca centrale (ad esempio, il progetto Sovereign delle Isole Marshall) o se l'intenzione esplicita è quella di fare a meno di una banca centrale (ad esempio, Bitcoin).¹

¹Potrebbero esserci casi opportuni di utilizzo della DLT per le infrastrutture dei mercati finanziari, come gli scambi digitali, dove sorge la questione di come incorporare la moneta della banca centrale all'interno di una struttura DLT per eseguire i regolamenti. Tuttavia, in tali situazioni i potenziali benefici della DLT, ad esempio costi inferiori o riconciliazione automatica, non derivano da un'emissione decentralizzata di moneta di banca centrale.

La CBDC basata su token che proponiamo consente anche di preservare una caratteristica fondamentale del contante fisico: la privacy nelle transazioni. Spesso si sostiene che l'uso della crittografia per la tutela della privacy richieda così tanta potenza di calcolo da rendere impraticabile la sua implementazione su dispositivi portatili (vedi Allen et al., 2020). Sebbene questo possa essere vero nel caso di una tecnologia di registro distribuito, dove la tracciabilità delle transazioni è necessaria per prevenire la doppia spesa (Narayanan et al., 2016), non lo è nel caso proposto in questo documento, dove si ha un protocollo di firma cieca di tipo Chaum e la partecipazione di una banca centrale. La nostra CBDC, basata su firme cieche e un'architettura a due livelli, garantisce una tutela della privacy nelle transazioni perfetta e quanto-resistente, fornendo al contempo protezioni sociali che sono di fatto più potenti rispetto a quelle delle banconote per la lotta al riciclaggio di denaro (*Anti-Money Laundering* - AML) e al finanziamento del terrorismo (*Counter Terrorism Financing* - CFT).

La privacy nelle transazioni è importante per tre motivi. In primo luogo, protegge gli utenti dal potenziale abuso di monitoraggio e sorveglianza da parte dei governi. Anche se si pensa di non avere nulla da nascondere, i piani di sorveglianza di massa restano problematici, se non altro per il rischio di errori e abusi, soprattutto se condotti senza trasparenza e responsabilità (vedi Solove, 2011). In secondo luogo, la privacy nelle transazioni protegge gli utenti dallo sfruttamento dei dati da parte dei fornitori di servizi di pagamento. Infine, salvaguarda gli utenti dalla controparte nelle transazioni in quanto esclude possibili comportamenti opportunistici successivi o rischi per la sicurezza dovuti a negligenza o mancata protezione dei dati dei clienti (vedi Kahn et al., 2005).

Questo documento è strutturato come segue: nella Sezione II si spiega la differenza tra la moneta di banca centrale e altri tipi di moneta. Nella Sezione III si esaminano i modelli di CBDC tipici e generici prima di proporre il nostro progetto nella Sezione IV. Si considerano poi gli aspetti normativi e le politiche (V) e il relativo lavoro (VI). Infine, si conclude (VII).

2 Cos'è la moneta di banca centrale?

La moneta è un attivo che può essere utilizzato per acquistare beni e servizi. Per essere considerato moneta, l'attivo deve essere accettato da entità diverse dall'emittente. Ecco perché i voucher, ad esempio, non sono considerati moneta. La moneta autentica deve essere *comunemente* accettata come mezzo di scambio. Sebbene la moneta abbia altre funzioni, ad esempio come unità di conto e riserva di valore, la sua caratteristica distintiva è la sua funzione di mezzo di scambio. Normalmente l'unità di conto (cioè come avvengono la fissazione dei prezzi e la contabilizzazione dei debiti) coincide per ragioni pratiche con il mezzo di scambio. Una separazione può tuttavia verificarsi se il valore del mezzo di scambio manca di stabilità rispetto ai beni e servizi scambiati.² La moneta deve anche essere una riserva di valore per fungere da mezzo di scambio perché deve preservare il suo potere d'acquisto tra il momento in cui si riceve e quello in cui si spende. In ogni modo, ci sono molti altri attivi che fungono da riserva di valore, come azioni, obbligazioni, metalli preziosi e immobili. Pertanto, la caratteristica di riserva di valore non è distintiva della moneta.

In un'economia moderna, il pubblico utilizza due tipi diversi di moneta: (a) moneta statale e (b) moneta privata. La moneta statale viene generalmente emessa dalla banca centrale, che agisce in qualità di agente dello Stato. La moneta della banca centrale è disponibile per alcune istituzioni finanziarie sotto forma di depositi presso la banca centrale (riserve) e per il pubblico sotto forma di valuta (banconote e monete), nota anche come «contante». In una economia moderna con valuta fiat, tale moneta non ha un valore intrinseco. Legalmente è una passività della banca centrale, sebbene non sia rimborsabile. Nella maggior parte dei paesi, la moneta della banca centrale è definita come avente corso legale, il che significa che deve essere accettata per il pagamento dei debiti monetari, comprese le tasse e le sanzioni legali. Sebbene ciò garantisca un certo valore alla moneta della banca centrale, lo status di corso legale non è sufficiente per mantenere un valore stabile. È la politica monetaria della banca centrale che mantiene il valore della moneta. Mantenere la stabilità dei prezzi, vale a dire un valore stabile della moneta rispetto

²Ciò può accadere spontaneamente in un ambito caratterizzato da un'inflazione elevata, ad esempio quando i prezzi sono quotati in USD ma i pagamenti vengono effettuati in valuta locale. Lo stesso vale per i pagamenti in Bitcoin, dove i prezzi sono solitamente fissati in USD o altre valute locali a causa dell'elevata volatilità del Bitcoin. Una separazione può anche essere progettata appositamente, come nel caso dell'*Unidad de Fomento* (UF) in Cile o i Diritti Speciali di Prelievo (DSP) del Fondo Monetario Internazionale (FMI). Tuttavia, anche in questi casi lo scopo è quello di avere un'unità di conto più stabile.

a quello dei beni e dei servizi scambiati, è infatti una delle principali responsabilità delle banche centrali.

La maggior parte dei pagamenti in un'economia moderna vengono effettuati con moneta privata emessa dalle banche commerciali ed è costituita da depositi bancari a vista che le persone detengono presso queste banche. Sono depositi che si possono utilizzare mediante assegni, carte di debito, carte di credito e altri mezzi di trasferimento di denaro e costituiscono una passività della banca commerciale di riferimento. Una caratteristica fondamentale di questi depositi è che le banche commerciali garantiscono la convertibilità su richiesta in moneta della banca centrale ad un prezzo fisso, vale a dire, alla pari. I depositanti possono prelevare i propri fondi in contante o trasferirli ad un valore fisso di 1:1. Le banche commerciali mantengono stabile il valore della propria moneta ancorandola a quella della banca centrale.

Tuttavia, in un sistema di riserva frazionaria, una banca commerciale, anche se solvibile, potrebbe non avere liquidità a sufficienza per onorare la sua promessa di convertire i depositi bancari in moneta della banca centrale (ad esempio, nel caso di una corsa agli sportelli) in modo tale che i clienti non possano prelevare i propri soldi. Una banca può anche diventare insolvente e fallire, e di conseguenza i clienti possono perdere denaro. Per questo motivo le banche commerciali sono soggette a regolamentazioni volte a mitigare tali rischi.

Una differenza notevole tra la moneta di una banca centrale e la moneta privata emessa da una banca commerciale è, pertanto, che quest'ultima comporta un rischio di controparte. Una banca centrale può sempre adempiere ai suoi obblighi utilizzando la propria moneta non rimborsabile. In un'economia nazionale, la moneta della banca centrale è l'unico attivo monetario esento da rischi di credito e di liquidità. È pertanto l'attivo tipicamente preferito per regolare i pagamenti nelle infrastrutture dei mercati finanziari (si veda, per esempio, *CPMI-IOSCO Principles for Financial Market Infrastructures*, 2012). Un'altra differenza risiede nella capacità della moneta della banca centrale di sostenere il sistema monetario nazionale fornendo un valore di riferimento con cui la moneta delle banche commerciali mantiene la piena convertibilità.

A parte le banche commerciali, altre entità private tentano occasionalmente di emettere moneta; le criptovalute sono solo il tentativo più recente. Ma a differenza dei depositi bancari, tale moneta non è comunemente accettata come mezzo di scambio. Questo vale anche per Bitcoin, la criptovaluta più ampiamente accettata. Un ostacolo all'utilità delle criptovalute come mezzo di scambio è l'elevata volatilità del loro valore. In risposta a questo problema sono emerse le criptovalute stabili, cosiddette «stablecoins». Le *stablecoin* generalmente tentano di stabilizzare il proprio valore in due modi: imitando le banche centrali (*stablecoin* algoritmiche) o imitando le banche commerciali e strumenti di investimento (*stablecoin* ancorate ad attivi).³

Le «*stablecoin* algoritmiche» si basano su algoritmi per regolare l'offerta della moneta. In altre parole, cercano di stabilizzarne il prezzo attraverso una «politica monetaria algoritmica». Esistono esempi di tali *stablecoin* (per esempio, Nubits), ma finora nessuna è riuscita a stabilizzare il proprio valore per molto tempo.

Le *stablecoin* «ancorate ad attivi» differiscono in base al tipo di attivo che utilizzano e ai diritti concessi ai possessori. I tipi di attivi generalmente utilizzati sono: valuta (riserve di banche centrali, banconote o depositi presso banche commerciali), materie prime (come l'oro), titoli e talvolta altre criptovalute. La capacità di un tale schema di stabilizzare il valore della moneta rispetto agli attivi sottostanti dipende in modo cruciale dai diritti legali acquisiti dai detentori della moneta. Se una *stablecoin* è riscattabile ad un prezzo fisso (per es. 1 moneta = 1 USD o 1 moneta = 1 oncia d'oro), la stabilità si può teoricamente ottenere.⁴ Tale strategia riproduce essenzialmente quella delle banche commerciali garantendo la convertibilità nell'attivo sottostante su richiesta. Tuttavia, a differenza dei depositi bancari, che in genere sono coperti solo parzialmente dalle riserve della banca centrale, le *stablecoin* sono spesso completamente garantite dalle riserve di attivi sottostanti al fine di evitare il rischio di liquidità, principalmente perché non dispongono di tutele pubbliche tali come l'assicurazione dei depositi e il prestatore di ultima istanza che offrono invece le banche regolamentate.

Le *stablecoin* che utilizzano le valute come attivi sono anche dette «stablecoin a valuta fiat». Detenere il 100% delle garanzie sotto forma di valuta (banconote o depositi bancari) non risulta però molto redditizio. Di conseguenza, i fornitori di *stablecoin* hanno un buon motivo per ri-spiarmiare sugli attivi passando ad un sistema di riserva frazionaria, proprio come hanno fatto le

³Per una tassonomia delle *stablecoin*, si veda Bullmann et al. (2019).

⁴Se possa stabilizzare il valore della *stablecoin* anche rispetto ai beni e servizi scambiati dipende essenzialmente da quanto sia stabile il valore degli attivi su cui poggia rispetto al valore dei beni e servizi.

banche commerciali.⁵ Ciò comporta la riduzione degli attivi meno redditizi al minimo ritenuto necessario per soddisfare il requisito di convertibilità e l'aumento degli attivi liquidi a rendimento più elevato come i titoli di stato. Questo migliora la redditività ma aumenta nel contempo il livello di rischio. Tuttavia, anche se una *stablecoin* fosse garantita interamente da depositi presso le banche commerciali, rimarrebbe comunque vulnerabile ai rischi di insolvenza del credito e di liquidità della relativa banca. Tale rischio può essere evitato effettuando i depositi presso la banca centrale in modo che siano le riserve di quest'ultima a garantire la *stablecoin*. Tali *stablecoin* sono state chiamate «CBDC sintetiche» (Adrian & Mancini-Griffoli, 2019). È importante sottolineare che queste *stablecoin* non sono moneta di banca centrale e quindi non costituiscono una CBDC in quanto non sono registrate come passività della banca centrale e, pertanto, rimangono soggette al rischio di controparte, ovvero al rischio di fallimento dell'emittente.

Se una *stablecoin* non è rimborsabile ad un prezzo fisso, la sua stabilità rispetto all'attivo sottostante non è garantita. Se la *stablecoin* rappresenta comunque una quota di proprietà dell'attivo sottostante, lo schema ricorda quello di un fondo comune di investimento chiuso o di un fondo indicizzato quotato (*Exchange-Traded Fund* - ETF) e si applicano i relativi rischi. Il valore della moneta dipenderà dal valore patrimoniale netto del fondo, ma il suo valore effettivo può variare. Se ci sono partecipanti autorizzati a creare e riscattare *stablecoin* e quindi ad agire come arbitraggisti, come nel caso degli ETF e come previsto per la Diem (Libra Association, 2020), la deviazione si presume minima.

Nel complesso, le *stablecoin* hanno maggiori possibilità di diventare moneta rispetto alle criptovalute, soprattutto se adeguatamente regolamentate, anche se la disponibilità di CBDC limiterebbe notevolmente la loro utilità.

3 Modelli generici di CBDC

Come abbiamo visto, la CBDC sarebbe una passività della banca centrale. Due modelli possibili che si trovano nella letteratura sull'argomento sono (a) CBDC basata su conti e (b) CBDC basata su token (o sul valore). Questi modelli corrispondono ai due tipi esistenti di moneta delle banche centrali e ai relativi sistemi di pagamento (Kahn & Roberds, 2009): riserve delle banche centrali (sistema basato su conti) e banconote (sistema basato su token). Un pagamento si verifica quando un'attivo monetario viene trasferito da un pagatore a un beneficiario. In un sistema basato su conti, il trasferimento avviene addebitando sul conto del pagatore e accreditando sul conto del beneficiario. In un sistema basato su token, il trasferimento avviene trasferendo il valore stesso o il token, ovvero un oggetto che rappresenta l'attivo monetario. Il miglior esempio di token è il contante (monete o banconote). Pagare in contanti equivale a consegnare una moneta o una banconota. Non è necessario registrare il trasferimento, il semplice possesso del token è sufficiente. Pertanto, le parti non sono tenute a rivelare la propria identità in nessun momento durante la transazione, entrambe possono rimanere anonime. Ciononostante, il beneficiario deve essere in grado di verificare l'autenticità del token. Questo è il motivo per cui le banche centrali investono notevoli risorse nelle caratteristiche di sicurezza delle banconote.

È stato suggerito che la distinzione tra sistemi basati su conti e quelli basati su token non sia applicabile alle monete digitali (Garratt et al., 2020). Noi al contrario riteniamo che ci sia una differenza significativa. La differenza essenziale risiede nelle informazioni contenute nell'attivo. In un sistema basato su conti, gli attivi (i conti) sono riconducibili ad una cronologia delle transazioni che include tutte le operazioni di credito e addebito dei conti. In un sistema basato su token, gli attivi (i token) contengono solo informazioni sul valore del token e sull'entità che lo ha emesso. I sistemi basati su token sono quindi l'unica possibilità per ottenere la stessa privacy nelle transazioni che offre il contante.⁶

⁵L'incertezza sulla garanzia delle *stablecoin* può essere uno dei motivi per cui vengono scambiate al di sotto del loro valore nel mercato parallelo (vedi Lyons & Viswanath-Natraj, 2020). Casi simili si sono storicamente verificati anche con le banconote, quando erano ancora emesse dalle banche commerciali. Le banconote venivano scambiate a prezzi scontati nel mercato parallelo prima che l'emissione fosse nazionalizzata e trasferita alle banche centrali come monopolio.

⁶Sebbene il termine «Bitcoin» suggerisca l'uso di token, Bitcoin è un sistema basato su conti. L'unica differenza tra un sistema tradizionale basato su conti e una *blockchain* è che i conti non sono conservati in un database centrale ma in un database decentralizzato di solo accodamento.

3.1 CBDC basata su conti

Il modo più semplice per avviare una CBDC sarebbe consentire al pubblico di detenere conti deposito presso la banca centrale. Ciò comporta che la banca centrale si facesse responsabile dei controlli per conoscere i propri clienti (*Know-Your-Customer* - KYC) e di garantire la conformità con i requisiti per la lotta al riciclaggio di denaro e al finanziamento del terrorismo. Ciò includerebbe non solo la gestione del processo iniziale di conoscenza del cliente, ma anche l'autenticazione dei clienti per le transazioni bancarie, la gestione delle frodi e delle autenticazioni false positive e false negative. Data la scarsa presenza fisica delle banche centrali nella società e il fatto che probabilmente oggi non siano disposte ad eseguire l'autenticazione dei cittadini su larga scala, qualsiasi CBDC basata su conti richiederebbe alla banca centrale di delegare questi compiti. Tutti i servizi di assistenza e manutenzione di tali conti potrebbero essere affidati ad operatori esterni (Bindseil, 2020), oppure le banche commerciali potrebbero essere obbligate per legge ad aprire conti presso la banca centrale per i propri clienti (Berentsen & Schär, 2018).

Una CBDC basata su conti darebbe potenzialmente alla banca centrale l'accesso a molti dati aggiuntivi. Uno dei motivi di preoccupazione è che i governi potrebbero facilmente mettere in atto una sorveglianza di massa e imporre sanzioni ai singoli titolari dei conti. La natura centralizzata di tali interventi li rende poco costosi e facili da applicare nei confronti di persone o gruppi. Ci sono molti esempi di sorveglianza abusiva contro critici e oppositori politici, anche nelle democrazie. Si potrebbe argomentare che le banche centrali indipendenti siano in grado di salvaguardare tali informazioni dall'intrusione del governo e dagli abusi politici, ma ciò aprirebbe comunque una nuova strada alle pressioni politiche che minacciano l'indipendenza delle banche centrali. Inoltre, un database centrale sarebbe un obiettivo cospicuo per gli attacchi: anche l'accesso in sola lettura ad una parte del database potrebbe creare rischi significativi per le persone i cui dati sarebbero esposti.

Se dovessero fornire conti bancari per il pubblico, le banche centrali entrerebbero in diretta concorrenza con le banche commerciali, competizione che comporterebbe due rischi. In primo luogo, potrebbe minacciare la base dei depositi delle banche e, all'estremo, portare alla disintermediazione bancaria. Ciò potrebbe influire negativamente sulla disponibilità di credito per il settore privato e, di conseguenza, sull'attività economica (Agur et al., 2019). La disintermediazione delle banche potrebbe anche condurre alla centralizzazione dell'allocazione del credito all'interno della banca centrale, con ripercussioni negative sulla produttività e sulla crescita economica. In secondo luogo, la possibilità per le persone di trasferire i propri depositi nel porto sicuro di una banca centrale potrebbe accelerare le corse agli sportelli nei periodi di crisi economica.

Vi sono però argomentazioni contrarie. Brunnermeier & Niepelt (2019) sostengono che i trasferimenti di fondi dai depositi ai conti CBDC porterebbero alla sostituzione automatica del finanziamento mediante depositi con il finanziamento tramite la banca centrale, il che andrebbe ad esplicitare la garanzia finora implicita di prestatore di ultima istanza delle banche centrali. Berentsen & Schär (2018) sostengono che la concorrenza delle banche centrali potrebbe persino avere un effetto disciplinare sulle banche commerciali e quindi aumentare la stabilità del sistema finanziario, dato che queste ultime sarebbero costrette a consolidare la sicurezza dei propri modelli economici per evitane corse agli sportelli.

Esistono anche proposte per ridurre il rischio di disintermediazione restringendo o scoraggiando l'uso della CBDC come riserva di valore. Una delle proposte è di limitare la quantità di CBDC che si può possedere. Una seconda proposta consiste nell'applicare un tasso di interesse variabile ai conti in CBDC, in modo che il rendimento sia sempre sufficientemente inferiore a quello dei conti nelle banche commerciali, arrivando eventualmente fino a tassi negativi, in modo da rendere la CBDC meno attraente come riserva di valore (Kumhof & Noone, 2018; Bindseil, 2020). Oltre a ciò, per evitare le corse agli sportelli Kumhof & Noone (2018) suggeriscono che la CBDC non dovrebbe essere emessa a fronte di depositi bancari ma solo a fronte di obbligazioni come i titoli di stato. Nel complesso, una CBDC basata su conti richiederebbe un'analisi più approfondita di queste problematiche.

3.2 CBDC Basata su token e legata al hardware

In alternativa ai conti deposito, una banca centrale potrebbe emettere token elettronici. Tecnicamente ciò richiede un sistema per garantire che i token elettronici non possano essere copiati facilmente. Le funzioni fisicamente non clonabili (vedi Katzenbeisser et al., 2012) e le aree sicure

nell'hardware (vedi Alves & Felton, 2004; Pinto & Santos, 2019) sono due tecnologie possibili per la prevenzione della copia digitale. Le funzioni fisicamente non clonabili, tuttavia, non possono essere scambiate su Internet (eliminando di fatto l'uso principale delle CBDC) e le precedenti funzionalità di sicurezza nell'hardware per la prevenzione della copia sono state ripetutamente compromesse (si veda, ad esempio, Wojtczuk & Rutkowska, 2009; Johnston, 2010; Lapid & Wool, 2018).

Un vantaggio fondamentale delle CBDC basate su token rispetto a quelle basate su conti è che i sistemi tokenizzati funzionerebbero offline, ovvero, gli utenti potrebbero scambiare token (*peer-to-peer*) senza coinvolgere la banca centrale, proteggendo così la privacy e la libertà delle persone. Tuttavia, la disintermediazione che si verifica quando gli utenti possono scambiare token elettronici senza intermediari bancari che eseguano i controlli per la conoscenza dei clienti e le procedure per la lotta al riciclaggio di denaro e al finanziamento del terrorismo renderebbe difficile la lotta alla criminalità.

Le schede SIM sono oggi il mezzo più ampiamente disponibile per un sistema di pagamento sicuro basato su hardware, ma comportano anche dei rischi. L'esperienza (si veda, ad esempio, Soukup & Muff, 2007; Garcia et al., 2008; Kasper et al., 2010; CCC e.V., 2017) suggerisce che qualsiasi dispositivo economicamente riproducibile in grado di memorizzare token con valore monetario, che una persona possa possedere e che consenta transazioni offline — e quindi il furto mediante clonazione delle informazioni in esso contenute — sarà l'obiettivo di attacchi di contraffazione riusciti non appena il valore economico dell'attacco risulti sostanziale. Tali attacchi provengono anche da utenti che forzano il proprio hardware (vedi Allen et al., 2020). Per limitare l'impatto di una compromissione, i sistemi con carte di pagamento che sono stati precedentemente implementati dipendono dalla resistenza alle manomissioni in combinazione con il rilevamento delle frodi. Tuttavia, il rilevamento delle frodi richiede la capacità di identificare i pagatori e tenere traccia dei clienti, il che non è compatibile con la privacy nelle transazioni.

4 Una CBDC basata su token progettata per tutelare la privacy

La CBDC qui proposta è di tipo «solo software», semplicemente un'applicazione per smartphone che non richiede alcun hardware aggiuntivo. Il design fa affidamento su eCash e GNU Taler. Taler fa parte del progetto GNU, il cui fondatore, Richard Stallman, ha coniato il termine «*Software Libero*», ora spesso indicato come *Free/Libre and Open Source Software* (FLOSS).⁷ Il software è considerato libero se la sua licenza concede agli utenti quattro libertà essenziali: la libertà di eseguire il programma come si desidera, la libertà di studiare il programma e modificarlo, la libertà di ridistribuire copie del programma e la libertà di distribuire copie delle versioni modificate del programma. Il software libero non impedisce la commercializzazione; fornire supporto tecnico per il software è un modello di business standard per il FLOSS.

Dato il gran numero di parti interessate coinvolte in una CBDC al dettaglio (la banca centrale, il settore finanziario, i venditori e i clienti) e l'importanza critica dell'infrastruttura, una CBDC al dettaglio deve essere basata sul FLOSS. Imporre una soluzione proprietaria, che comporta la dipendenza da un fornitore specifico, sarebbe probabilmente un ostacolo all'adozione fin dall'inizio. Con il FLOSS, tutte le parti interessate hanno accesso a ogni dettaglio della soluzione e il diritto di adattare il software alle proprie esigenze. Ciò facilita l'integrazione e migliora l'interoperabilità e la concorrenza tra i fornitori.⁸ Consente inoltre alla banca centrale di soddisfare i requisiti di trasparenza e responsabilità. I vantaggi del FLOSS riguardo la sicurezza sono anche ampiamente riconosciuti. La disponibilità del codice sorgente e la libertà di modificarlo facilitano l'identificazione degli errori e la loro rapida correzione.⁹

⁷Per ulteriori informazioni su GNU, si veda <https://www.gnu.org> e Stallman (1985). GNU Taler è rilasciato sotto la licenza libera *GNU Affero General Public License* del Progetto GNU. Altri programmi del progetto GNU noti tra gli economisti sono *R* e *GNU Regression, Econometrics and Time-series Library* (GRET). Per un'analisi dei vantaggi del FLOSS rispetto al software proprietario nel campo della ricerca, si veda Baiocchi & Distaso (2003), Yalta & Lucchetti (2008) e Yalta & Yalta (2010). Sulle licenze libere e open source, si veda Lerner & Tirole (2005).

⁸Tuttavia, l'hardware privato potrebbe avere un ruolo da svolgere. La protezione degli archivi delle chiavi e di alcune funzioni di controllo, ad esempio, può essere un'area dove l'hardware dedicato valutato solo da un numero limitato di esperti può presentare dei vantaggi, nella misura in cui tale sicurezza sia solo additiva.

⁹Ad esempio, un bollettino sulla sicurezza informatica emesso dall'Agenzia per la sicurezza nazionale degli Stati Uniti (NSA) nell'aprile 2020 esorta gli utenti a dare la priorità al software libero nella scelta e nell'utilizzo

Nell'architettura che proponiamo, tutte le interazioni tra consumatori e venditori si fanno con le banche commerciali, ma la creazione di moneta e il database sono forniti esclusivamente dalla banca centrale. Le banche commerciali autenticano i clienti quando ritirano CBDC così come i venditori o beneficiari quando le ricevono. Quando spendono CBDC, invece, i clienti o pagatori devono solo autorizzare le transazioni senza bisogno di identificarsi. I pagamenti risultano più economici, più facili e più veloci, evitando al contempo interferenze con la privacy (Dold, 2019). L'autenticazione dei clienti quando ritirano CBDC, nonché dei venditori o beneficiari quando le ricevono, consente altresì di adempire alle normative sulla conoscenza dei clienti e sulla lotta al riciclaggio di denaro e al finanziamento del terrorismo.

La CBDC che si propone in questo documento è un vero e proprio strumento digitale al portatore perché quando l'utente preleva una somma di denaro sotto forma di numero, tale numero viene «accecato» o nascosto dallo smartphone con un'apposita crittografia. Nel sistema stesso, una moneta è una coppia di chiavi pubblica-privata dove la chiave privata è nota solo al proprietario della moneta.¹⁰ La moneta trae il suo valore finanziario dalla firma della banca centrale apposta sulla chiave pubblica della moneta. La banca centrale firma con la propria chiave privata e detiene più coppie di chiavi di valore per apporre la firma cieca su monete di diverso valore unitario. Il venditore può utilizzare la corrispondente «chiave pubblica» della banca centrale per verificare la firma. Tuttavia, al fine di garantire che la moneta non sia stata copiata e già ritirata da un altro beneficiario (cioè che non sia stata «spesa due volte»), il venditore deve depositare la moneta affinché la banca centrale possa confrontarla con un archivio di monete ritirate. Poiché né la banca commerciale né la banca centrale vedono il numero della moneta durante il prelievo, in seguito, quando il venditore deposita la moneta, non si sa quale utente l'abbia ritirata. L'acceccamento e la privacy che ne deriva fanno di questa tipologia di CBDC un vero e proprio strumento digitale al portatore.

Nell'analisi che segue forniamo una panoramica approfondita della tecnologia e mostriamo come si può integrare con il sistema bancario esistente per creare una CBDC. Dold (2019) fornisce ulteriori dettagli.

4.1 Componenti fondamentali

Di seguito si descrivono i componenti principali del protocollo, comprese le basi matematiche per una delle possibili rappresentazioni delle primitive crittografiche utilizzate, allo scopo di illustrare in che modo potrebbe funzionare un'implementazione. Considerando che esistono altri modelli matematici equivalenti per ciascun componente, presentiamo solo la più semplice delle soluzioni sicure a noi note.

Firme digitali. L'idea che sta alla base delle firme digitali in uno schema di firma a chiave pubblica è quella di garantire che il titolare della chiave privata sia l'unico in grado di firmare un messaggio, mentre la chiave pubblica consente a chiunque di verificare la validità della firma.¹¹ Il risultato della funzione di verifica della firma è la dichiarazione binaria «vero» o «falso». Se il messaggio è firmato con la chiave privata che appartiene alla chiave pubblica di verifica, il risultato è «vero», altrimenti è «falso». Nella nostra proposta il messaggio è una moneta o una banconota con un numero di serie, e la firma della banca centrale ne attesta la validità. Sebbene GNU Taler utilizzi per impostazione predefinita le moderne firme EdDSA (vedi Bernstein et al., 2012), qui presentiamo un semplice schema di firma crittografica basato su RSA (Rivest et al., 1978), un sistema crittografico ben studiato.¹² Tuttavia, in linea di principio, è possibile utilizzare qualsiasi tecnologia di firma crittografica (DSA, ECDSA, EdDSA, RSA, ecc.)

Per generare una chiave RSA, il firmatario prende prima due grandi numeri primi indipendenti p e q e calcola $n = pq$, nonché la funzione phi di Eulero $\phi(n) = (p - 1)(q - 1)$. Quindi, si può utilizzare qualsiasi e con $1 < e < \phi(n)$ e $\gcd(e, \phi(n)) = 1$ per definire una chiave pubblica (e, n) . La condizione che il massimo comune denominatore (MCD) di e e $\phi(n)$ debba essere 1 (cioè, che devono essere primi tra loro) assicura che l'inverso di $e \bmod \phi(n)$ esista. Questo inverso è la

dei servizi collaborativi per le comunicazioni su Internet: «Lo sviluppo open source garantisce trasparenza sulla robustezza del codice e la sua conformità alle migliori pratiche di programmazione, evitando l'introduzione di vulnerabilità o punti deboli che potrebbero mettere a rischio utenti e dati» (U/OO/134598-20).

¹⁰In Bitcoin, un sistema basato su conti, la coppia di chiavi è un conto dove la chiave pubblica rappresenta l'«indirizzo» e quindi una sorta di «identità», anche se pseudonimo.

¹¹La crittografia a chiave pubblica è stata introdotta da Diffie & Hellmann (1976) e le prime implementazioni di firme digitali sono state quelle di Rivest et al. (1978).

¹²Per un'analisi della lunga storia del crittosistema RSA e uno studio degli attacchi a questo sistema, si veda Boneh (1999).

corrispondente chiave privata d . Data $\phi(n)$, la chiave privata d può essere calcolata mediante l'algoritmo esteso di Euclide tale che $d \cdot e \equiv 1 \pmod{\phi(n)}$.

Data la chiave privata d e la chiave pubblica (e, n) , una semplice firma RSA s su un messaggio m è $s \equiv m^d \pmod{n}$. Per verificare la firma si calcola $m' \equiv s^e \pmod{n}$. Se m' e m corrispondono, la firma è valida e dimostra che il messaggio è stato firmato con la chiave privata che corrisponde alla chiave pubblica di verifica (autenticazione del messaggio) e che il messaggio non è stato modificato durante il transito (integrità del messaggio). In pratica, le firme vengono poste sull'hash dei messaggi piuttosto che sui messaggi stessi. Le funzioni di hash calcolano le impronte digitali dei messaggi (*digest*), che sono identificatori univoci e brevi per i messaggi. Firmare un hash breve è molto più veloce che firmare un messaggio di grandi dimensioni, e la maggior parte degli algoritmi di firma funzionano solo su input relativamente brevi.¹³

Firme cieche. Utilizziamo le firme cieche introdotte da Chaum (1983) per tutelare la privacy degli acquirenti. Una firma cieca viene utilizzata per creare una firma crittografica per un messaggio senza rivelare al firmatario il contenuto del messaggio. Nella nostra proposta, ciò impedisce alle banche commerciali e alla banca centrale di poter risalire all'acquirente tracciando gli acquisti. In linea di principio, la nostra proposta funziona con qualsiasi sistema di firma cieca, ma la soluzione migliore rimane la variante basata su RSA descritta da Chaum (1983).

L'acceccamento viene eseguito dai clienti, che accecano le proprie monete prima di trasmetterle alla banca centrale per la firma. I clienti non devono quindi affidare alla banca centrale la tutela della propria privacy. Inoltre, l'acceccamento con RSA fornirebbe protezione della privacy anche contro gli attacchi informatici quantistici. La banca centrale, dal canto suo, predispone più coppie di chiavi di valore per apporre la firma cieca su monete di diverso valore unitario, e fornisce le corrispondenti chiavi pubbliche (e, n) per tali valori.

Sia f il valore di hash di una moneta e quindi l'identificatore univoco per questa moneta. Il cliente che preleva la moneta prima genera un fattore di acceccamento casuale b e calcola $f' \equiv fb^e \pmod{n}$ con la chiave pubblica della banca centrale per quel valore. La moneta accecata f' viene quindi trasmessa alla banca centrale per la firma. La banca centrale firma f' con la sua chiave privata d calcolando la firma cieca $s' \equiv (f')^d \pmod{n}$, appone la firma s' alla moneta accecata f' e restituisce la coppia (s', f') al cliente. Il cliente può quindi rimuovere l'acceccamento della firma calcolando $s \equiv s'b^{-1} \pmod{n}$. Ciò è possibile perché $(f')^d = f^d b^{ed} = f^d b$, e quindi moltiplicando s' con b^{-1} si ottiene f^d , che è una firma RSA valida su f come prima: $s^e \equiv f^{de} \equiv f \pmod{n}$.

Nella proposta originale di Chaum, le monete erano dei semplici gettoni. Quel che vogliamo, invece, è che i consumatori possano utilizzare le firme digitali per stipulare contratti. A tal fine, ogni volta che un portafoglio digitale preleva una moneta, in primo luogo crea per la moneta una chiave privata casuale c e calcola la corrispondente chiave pubblica C per creare firme digitali con i normali sistemi di firma crittografica (come DSA, ECDSA, EdDSA e RSA). Quindi si deriva f mediante una funzione di hash crittografica dalla chiave pubblica C , prima che la banca centrale ne apponga la firma cieca (utilizzando un nuovo fattore di acceccamento casuale per ciascuna moneta). Ora il cliente può utilizzare c per firmare elettronicamente gli acquisti, spendendo così la moneta.

Come visto sopra, la banca centrale andrebbe a predisporre coppie di chiavi diverse per ogni valore unitario di moneta e pubblicherebbe le chiavi pubbliche che i clienti userebbero per prelevare denaro. Queste chiavi di valore, e quindi le monete, avrebbero una data di scadenza prima della quale dovrebbero essere spese o scambiate con monete nuove. Ai clienti verrebbe concesso un certo periodo di tempo per scambiare le monete. Un processo simile esiste per le banconote fisiche, dove le serie di banconote vengono regolarmente rinnovate per essere dotate delle più recenti caratteristiche di sicurezza, tranne per il fatto che le banconote generalmente rimangono in circolazione per decenni anziché per pochi anni o mesi.¹⁴

Da un punto di vista tecnico, una data di scadenza offre due vantaggi. In primo luogo, migliora l'efficienza del sistema perché la banca centrale può cancellare i dati scaduti, evitando così di dover archiviare e poi cercare in un elenco sempre crescente di monete (spese) per rilevare una doppia spesa. In secondo luogo, riduce i rischi per la sicurezza dato che la banca centrale non deve preoccuparsi di attacchi alle proprie chiavi (private) di valore (d) scadute. Inoltre,

¹³Nel caso del crittosistema RSA, il limite di lunghezza è di $\log_2 n$ bit.

¹⁴In Svizzera, ad esempio, la Banca nazionale svizzera ha iniziato a ritirare dalla circolazione l'ottava serie di banconote nell'aprile 2016. Questa serie era stata messa in circolazione alla fine degli anni novanta. Dal 1 gennaio 2020, tuttavia, tutte le banconote a partire dalla sesta serie (emesse nel 1976) fino alle serie future restano valide e possono essere scambiate a tempo indeterminato con banconote correnti.

anche se una chiave privata venisse compromessa, il periodo durante il quale l'attaccante può utilizzarla è breve. In aggiunta, l'addebito di una commissione di cambio consentirebbe alla banca centrale di applicare tassi di interesse negativi, se ritenuto necessario. La banca centrale potrebbe anche, se lo desidera, fissare un limite di conversione per cliente in considerazione dell'antiriciclaggio e l'antiterrorismo (soglia di «contante») o per motivi di stabilità finanziaria (per prevenire accaparramenti e corse agli sportelli).

Protocollo di scambio di chiavi. GNU Taler utilizza un protocollo di scambio di chiavi in un modo particolare per fornire un collegamento tra la moneta originale e il resto reso per quella stessa moneta. Ciò garantisce che il resto possa sempre essere reso senza compromettere la trasparenza del reddito e la privacy dei consumatori. Lo stesso meccanismo si può utilizzare per i rimborsi anonimi ai clienti. Il protocollo gestisce anche i guasti alla rete e ai componenti, assicurando che i pagamenti siano andati a buon fine o siano stati definitivamente annullati e che tutte le parti abbiano una prova crittografica dell'esito. Questo corrisponde all'incirca agli scambi atomici nei protocolli *interledger* o allo scambio equo nei tradizionali sistemi *e-cash*.

La costruzione matematica più comune per un protocollo di scambio di chiavi è la costruzione Diffie & Hellmann (1976), che consente a due parti di derivare una chiave segreta condivisa. A tale scopo, condividono due parametri di dominio p e g , che possono essere pubblici, dove p è un numero primo grande e g è una radice primitiva modulo p .¹⁵ Ora, le due parti scelgono le loro chiavi private a e b , che sono due numeri interi grandi. Con queste chiavi private e i parametri di dominio, generano le rispettive chiavi pubbliche $A \equiv g^a \pmod p$ e $B \equiv g^b \pmod p$. Ciascuna parte può ora utilizzare la propria chiave privata e la chiave pubblica dell'altra parte per calcolare la chiave segreta condivisa $k \equiv (g^b)^a \equiv (g^a)^b \equiv g^{ab} \pmod p$.¹⁶

Per ottenere il resto, il cliente parte dalla chiave privata della moneta parzialmente spesa c . Sia C la chiave pubblica corrispondente, per esempio $C = g^c \pmod p$. Quando la moneta fu parzialmente spesa in precedenza, la banca centrale registrò la transazione relativa a C nel proprio database. Per semplicità, assumiamo che esista un valore unitario che corrisponda esattamente a questo valore residuo. In caso contrario, il protocollo si riavvia finché non viene reso tutto il resto. Sia (e, n) la chiave di valore per il resto da rendere.

Per ottenere il resto, l'acquirente crea prima κ chiavi di trasferimento private t_i per $i \in \{1, \dots, \kappa\}$ e calcola le corrispondenti chiavi pubbliche T_i . Queste chiavi di trasferimento κ sono semplicemente coppie di chiavi pubbliche-private che consentono al cliente di eseguire localmente il protocollo di scambio di chiavi, con il cliente che gioca su entrambi i lati del processo, κ volte tra c e ogni t_i . Se si usa Diffie-Hellman come protocollo per lo scambio di chiavi, si ottiene $T_i \equiv g^{t_i} \pmod p$.

Il risultato è composto da tre trasferimenti $K_i \equiv KX(c, t_i)$. Il protocollo di scambio di chiavi può essere utilizzato in diversi modi per ottenere lo stesso valore $K_i \equiv KX(C, t_i) = KX(c, T_i)$. Data K_i , il cliente utilizza una funzione crittografica hash H per ricavare i valori $(b_i, c_i) \equiv H(K_i)$, dove b_i è un fattore di accecamento valido per la chiave di valore (e, n) e c_i è una chiave privata per la nuova moneta da ottenere come resto. c_i deve essere adatta sia per creare firme crittografiche sia per un uso futuro con il protocollo di scambio di chiavi (come c , per ottenere resto a partire dal resto). Sia C_i la chiave pubblica corrispondente a c_i . Il cliente chiede quindi alla banca centrale di creare una firma cieca su C_i per $i \in \{1, \dots, \kappa\}$.¹⁷ In questa richiesta, il cliente si impegna anche con le chiavi pubbliche T_i . La richiesta è autorizzata mediante una firma effettuata con la chiave privata c .

Invece di restituire direttamente la firma cieca, la banca centrale chiede prima al cliente di dimostrare che ha utilizzato correttamente la costruzione di cui sopra fornendo $\gamma \in \{1, \dots, \kappa\}$. Il cliente deve quindi mostrare alla banca centrale la t_i per $i \neq \gamma$. La banca centrale può quindi

¹⁵Un intero g è una radice primitiva modulo p se per ogni intero a coprimo a p esiste un intero k per il quale $g^k \equiv a \pmod p$. In pratica, g dovrebbe essere una radice primitiva $(p-1)$ -esima, detta anche generatore, al fine di prevenire attacchi a sottogruppi come quelli Pohlig-Hellman (vedi Lim & Lee, 1997).

¹⁶Lo stesso meccanismo potrebbe essere utilizzato per garantire che le monete non vengano trasferite a terzi durante il prelievo. A questo scopo, gli utenti devono salvaguardare una chiave di identità a lungo termine. Il processo di prelievo potrebbe quindi essere costruito allo stesso modo di quello utilizzato da GNU Taler per dare il resto, tranne per il fatto che quando si preleva dal conto bancario del cliente verrebbe utilizzata la chiave d'identità a lungo termine del cliente al posto della moneta originale. Tuttavia, le garanzie sulla privacy potrebbero decadere se il cliente non protegge la chiave d'identità a lungo termine, con il conseguente rischio di furto di tutte le monete residue. Dato che il rischio nei trasferimenti a terzi quando si prelevano monete è basso, non è chiaro se questa riduzione del rischio possa essere un buon compromesso.

¹⁷Se dovesse essere utilizzato il crittosistema RSA per le firme cieche, useremmo $f \equiv FDH_n(C_i)$, dove $FDH_n()$ è l'hash del dominio completo sul dominio n .

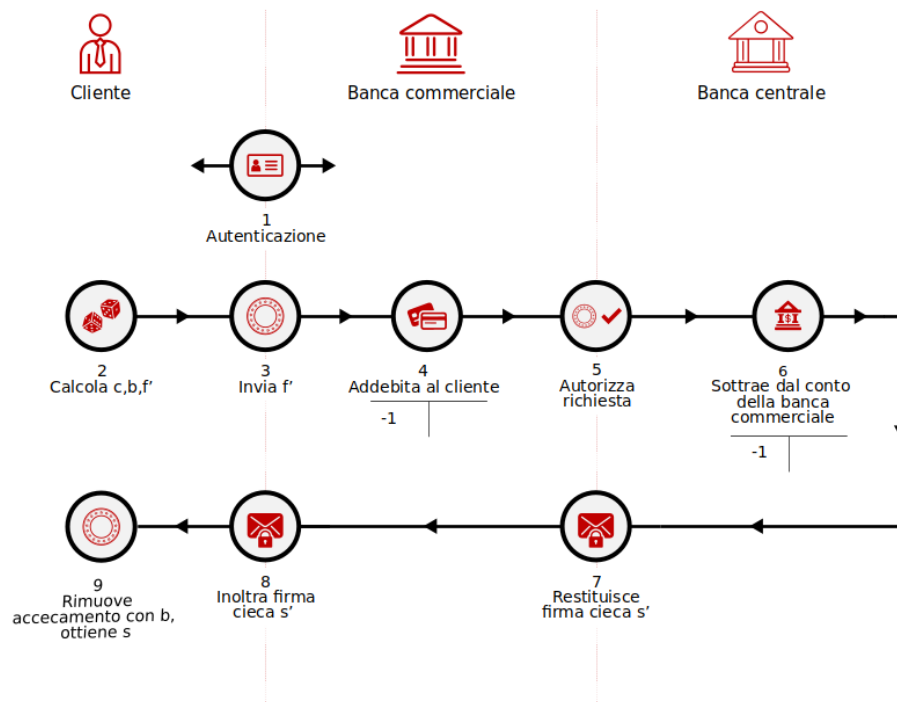
calcolare $K_i \equiv KX(C, t_i)$ e ricavare i valori (b_i, c_i) . Se per tutte le $i \neq \gamma$ la t_i fornita dimostra che il cliente ha utilizzato correttamente la costruzione, la banca centrale restituisce la firma cieca su C_γ . Se il cliente non fornisce una prova corretta, il valore residuo della moneta originale viene perso. Questo penalizza efficacemente coloro che tentano di eludere la trasparenza del reddito con un'aliquota fiscale stimata di $1 - \frac{1}{\kappa}$.

Per evitare che un cliente cospiri con un venditore che sta tentando di evadere il fisco, la banca centrale consente a chiunque conosca C di ottenere, in qualsiasi momento, i valori di T_γ e le firme cieche di tutte le monete collegate alla moneta originaria C . Ciò permette al possessore della moneta originaria, che conosce c , di calcolare $K_\gamma \equiv KX(c, T_\gamma)$ e da lì ricavare (b_i, c_i) per, infine, rimuovere la firma cieca. Di conseguenza, un venditore che nasconde il proprio reddito in questo modo formerebbe solo un'accordo economico limitato con il cliente invece di ottenere il controllo esclusivo.

4.2 Architettura del sistema

Uno degli obiettivi principali della nostra architettura è garantire che le banche centrali non debbano interagire direttamente con i clienti né conservare alcuna informazione su di loro, ma solo tenere un elenco delle monete spese. L'autenticazione è delegata alle banche commerciali, che dispongono già dell'infrastruttura necessaria. I protocolli di prelievo e deposito raggiungono la banca centrale tramite una banca commerciale in qualità di intermediaria. Dal punto di vista del cliente, il processo è analogo al prelievo di contanti da un bancomat. La transazione tra la banca commerciale dell'utente e la banca centrale avviene in background. La procedura per il prelievo di CBDC è illustrata nel diagramma 1.

Diagramma 1. Prelievo di CBDC



1

Diagramma 1: Prelievo di CBDC

Il cliente (1) invia i dati di accesso alla propria banca commerciale utilizzando le relative procedure di autenticazione e autorizzazione. Quindi il telefono (o il computer) del cliente ottiene la chiave di valore pubblica (e, n) fornita dalla banca centrale per quel valore; (2) calcola quindi una coppia di chiavi per la moneta, con una chiave privata c e una chiave pubblica C , e sceglie un fattore di accecamento b . La chiave pubblica della moneta viene quindi sottoposta a hash ($\rightarrow f$) e accecata ($\rightarrow f'$). Quindi il dispositivo del cliente (3) invia f' insieme all'autorizzazione a prelevare la moneta e ad addebitarla dal conto del cliente presso la banca commerciale tramite un

canale sicuro stabilito. La banca commerciale (4) addebita quindi l'importo dal conto deposito del cliente, (5) autorizza digitalmente la richiesta utilizzando la firma digitale specifica della propria filiale e inoltra la richiesta e la moneta accecata alla banca centrale per la firma. La banca centrale (6) sottrae il valore della moneta dal conto della banca commerciale, appone la firma cieca sulla moneta utilizzando la chiave privata che detiene per il relativo valore e (7) restituisce la firma cieca s' alla banca commerciale. La banca commerciale (8) inoltra la firma cieca s' al portafoglio elettronico del cliente. Infine, il dispositivo del cliente (9) utilizza b per rimuovere l'accecamento dalla firma ($\rightarrow f$) e salva la moneta appena coniata (c, s) .

Per spendere CBDC, la procedura è analoga al pagamento in contanti. Tuttavia, per consolidare la transazione, il venditore deve depositare la moneta. La procedura per spendere CBDC è illustrata nel diagramma 2.

Diagramma 2. Spendere e depositare CBDC

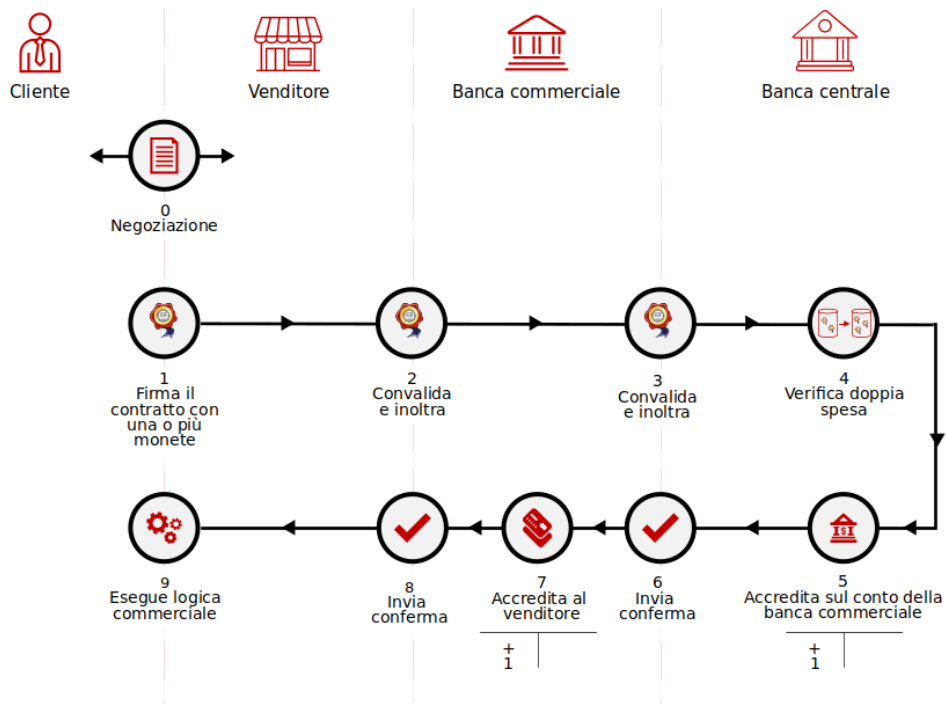


Diagramma 2: Spendere e depositare CBDC

Un cliente e un venditore negoziano un contratto commerciale. Il cliente (1) utilizza una moneta elettronica per firmare il contratto o l'atto di vendita con la chiave privata c della moneta e trasmette la firma al venditore. La firma di una moneta su un contratto con una moneta valida è l'istruzione del cliente di pagare il venditore, che è identificato dal conto bancario nel contratto. Se una singola moneta non fosse sufficiente per coprire l'importo totale, i clienti possono firmare il contratto con più monete. Il venditore (2) convalida quindi la firma della moneta sul contratto e la firma s della banca centrale su f , che corrisponde a quella della moneta C con le rispettive chiavi pubbliche, e inoltra la moneta firmata (insieme alle informazioni sul conto del venditore) alla banca commerciale del venditore. La banca commerciale del venditore (3) conferma che il venditore è un suo cliente e inoltra la moneta firmata alla banca centrale. La banca centrale (4) verifica le firme e controlla il proprio database per accertarsi che la moneta non sia già stata spesa. Se tutto è in ordine, la banca centrale (5) aggiunge la moneta all'elenco delle monete spese, l'accredita sul conto della banca commerciale presso la banca centrale e (6) invia una conferma in tal senso alla banca commerciale. Quindi la banca commerciale (7) accredita la moneta sul conto del venditore e (8) gli invia una notifica. Il venditore (9) consegna il prodotto o servizio al cliente. L'intera operazione richiede poche centinaia di millisecondi.

4.3 Considerazioni sulla sicurezza

Nella nostra proposta, occorre che la banca centrale gestisca un database e un servizio online ad alta disponibilità. Poiché le monete elettroniche possono essere copiate dagli utenti, solo con i controlli online si può prevenire in modo efficace la doppia spesa. Sebbene nella teoria esistano soluzioni per identificare a posteriori gli utenti che effettuano una doppia spesa (vedi Chaum et al., 1990), queste soluzioni creano rischi economici sia per gli utenti che per la banca centrale a causa del ritardo nell'identificazione di transazioni fraudolente. Il rilevamento online della doppia spesa elimina questo rischio, ma significa anche che sarà impossibile effettuare le transazioni se la connessione Internet alla banca centrale non è disponibile.

La banca centrale dovrà anche proteggere la riservatezza delle chiavi private che utilizza per firmare le monete e altri messaggi di protocollo. Se le chiavi di firma della banca centrale dovessero essere compromesse, ad esempio da un computer quantistico, da un attacco fisico ai *datacenter* o anche da qualche nuovo algoritmo impreveduto, è possibile rimborsare agli utenti — in tutta sicurezza e senza compromettere la privacy — tutte le monete non spese. La banca centrale annuncerebbe la revoca della chiave tramite l'*Application Programming Interface* (API), che verrebbe rilevata dai portafogli, avviando quindi il seguente protocollo di aggiornamento: l'utente svela alla banca centrale la chiave pubblica C della moneta, la firma s della banca centrale e il fattore di accecamento b , consentendo così alla banca centrale di verificare il legittimo prelievo dell'utente e di rimborsare il valore della moneta non spesa. Per rilevare una possibile compromissione della propria chiave, la banca centrale può monitorare il database in cerca di depositi che eccedano i prelievi.

4.4 Scalabilità e costi

Lo schema che proponiamo sarebbe efficiente ed economico quanto i moderni sistemi RTGS attualmente utilizzati dalle banche centrali.

La scalabilità si riferisce al costo di aumentare la potenza di calcolo in modo che si possa concludere un numero crescente di transazioni in tempi adeguati. Il costo complessivo del sistema può essere basso in quanto la CBDC qui proposta si basa interamente su software. Le monete spese devono essere conservate fino alla scadenza della coppia di chiavi di valore utilizzata per firmare le monete, ad esempio tramite un ciclo annuale continuo, che mantiene limitata la dimensione del database. La potenza di calcolo e la larghezza di banda necessarie aumentano della stessa quantità per ogni transazione, spesa o deposito addizionali, dato che le transazioni sono intrinsecamente indipendenti l'una dall'altra. Questa ulteriore potenza si ottiene semplicemente aggiungendo più hardware, una pratica spesso conosciuta come partizionamento o *sharding*. Grazie al cosiddetto *consistent hashing*, le aggiunte di hardware non risultano dirompenti. Si può anche utilizzare qualsiasi tipo di database.

Più nello specifico, la logica del *front-end* presso la banca centrale deve solo eseguire poche operazioni di firma, e un singolo processore può eseguirne alcune migliaia al secondo (vedi Bernstein & Lange, 2020). Se un unico sistema non fosse sufficiente, è facile aggiungere altri server *front-end* e invitare le varie banche commerciali a bilanciare le loro richieste nella *server farm* o utilizzare un sistema di bilanciamento del carico per distribuire le richieste all'interno dell'infrastruttura della banca centrale.

I server *front-end* devono comunicare con un database per effettuare le transazioni e prevenire la doppia spesa. Un unico server di database moderno dovrebbe essere in grado di gestire in modo affidabile decine di migliaia di operazioni al secondo. Le operazioni possono essere facilmente distribuite su più server di database semplicemente assegnando a ciascuno un intervallo di valori da gestire. Tale configurazione garantisce che le singole transazioni non incrocino mai le partizioni. Pertanto, anche i sistemi *back-end* dovrebbero scalare in modo lineare con le risorse di calcolo messe a disposizione, partendo sempre da una solida base di riferimento per un singolo sistema.

I *front-end* devono anche comunicare con i *back-end* per mezzo di un'interconnessione. Queste interconnessioni possono supportare un gran numero di transazioni al secondo. La dimensione di una singola transazione è in genere di circa 1–10 kilobyte. Pertanto, i *datacenter* di oggi, che scambiano informazioni a 400 Gbit/s, possono supportare milioni di transazioni al secondo.

Infine, il costo totale del sistema è basso. Probabilmente il costo principale è rappresentato dall'archiviazione sicura per molti anni di 1–10 kilobyte per transazione. Gli esperimenti su un

prototipo di GNU Taler che utilizzava i prezzi di *Amazon Web Service* hanno stabilito che il costo del sistema (archiviazione, larghezza di banda e capacità di calcolo) su larga scala sarebbe inferiore a 0,0001 USD per transazione (per i dettagli sui dati, si veda Dold, 2019).

5 Considerazioni normative e politiche

Nella soluzione che proponiamo, la banca centrale non conosce l'identità dei consumatori o dei venditori né l'importo totale delle transazioni, ma vede solo il momento in cui le monete elettroniche vengono rilasciate e quando vengono riscattate. Le banche commerciali continuano a fornire l'autenticazione cruciale di consumatori e venditori e, in particolare, custodiscono le informazioni che acquisiscono per la conoscenza dei clienti (KYC). Le banche commerciali osservano quando i venditori ricevono fondi e, se necessario, possono limitare la quantità di CBDC per transazione che un singolo venditore può ricevere. Inoltre, le transazioni sono collegate ai relativi contratti con i clienti. La conseguente trasparenza del reddito consente al sistema di soddisfare i requisiti delle normative sulla lotta al riciclaggio di denaro e al finanziamento del terrorismo (AML e CFT). In caso vengano rilevate anomalie nei redditi dei venditori, la banca commerciale e l'autorità fiscale o giudiziaria possono ottenere e ispezionare i contratti relativi ai pagamenti sospetti al fine di verificarne la legittimità. La trasparenza del reddito risultante è anche una forte misura contro l'evasione fiscale perché i venditori non possono sottodichiarare il proprio reddito o evadere le tasse sulle vendite. Nel complesso, il sistema implementa gli approcci *privacy-by-design* e *privacy-by-default* (come richiesto, ad esempio, dal Regolamento generale sulla protezione dei dati dell'UE, GDPR). I venditori non apprendono necessariamente l'identità dei propri clienti, le banche possiedono solo le informazioni necessarie sulle attività dei propri clienti e la banca centrale non ha accesso ai dettagli sulle attività dei cittadini.

In alcuni paesi le normative impongono limiti per i prelievi e i pagamenti in contanti. Tali restrizioni possono essere implementate anche per la CBDC nel progetto proposto. Ad esempio, è possibile stabilire una soglia per l'importo giornaliero che i consumatori possono prelevare, oppure limitare l'importo totale di CBDC che le banche commerciali possono convertire.

La disintermediazione del settore bancario è uno dei rischi di instabilità finanziaria spesso sollevato per quanto riguarda la CBDC al dettaglio. In particolare, una CBDC al dettaglio potrebbe facilitare l'accumulo di ingenti somme di denaro della banca centrale, il che potrebbe avere un impatto negativo sul finanziamento alle banche mediante depositi perché il pubblico deterrebbe meno denaro sotto forma di depositi bancari. Per i paesi le cui valute fungono da valute rifugio, ciò potrebbe anche portare ad un aumento degli afflussi di capitali durante i periodi globali di avversione al rischio, dando luogo ad ulteriori pressioni sui tassi di cambio. Quello che quindi potrebbe rappresentare un serio problema nel caso di una CBDC basata su conti, lo sarebbe molto meno con una CBDC basata su token. Innanzitutto, l'accumulo di una CBDC basata su token comporta rischi di furto o perdita simili a quelli legati all'accumulo di contanti. Tenere poche centinaia di dollari su uno smartphone è probabilmente un rischio accettabile per molti, ma detenere una somma molto alta è probabilmente un rischio meno accettabile. Pertanto, non ci aspettiamo un accaparramento significativamente maggiore rispetto a quello del denaro fisico.

Tuttavia, se l'accumulo o la massiccia conversione dei depositi bancari in CBDC dovessero destare preoccupazione, la banca centrale avrebbe diverse opzioni. Come si è spiegato, secondo il progetto proposto le banche centrali fissano una data di scadenza per tutte le chiavi di firma, il che implica che in una data prestabilita le monete firmate con quelle chiavi diventano non valide. Alla scadenza delle chiavi di valore, i consumatori devono scambiare con monete nuove le monete che erano state firmate con le vecchie chiavi; l'autorità di regolamentazione può facilmente fissare una soglia di conversione per cliente per creare un limite rigido alla quantità di CBDC che ogni individuo può accumulare. Inoltre, la banca centrale potrebbe addebitare commissioni, se necessario. Una commissione di aggiornamento quando le monete stanno per scadere significherebbe nella pratica tassi di interesse negativi sulla CBDC per limitare il suo fascino come riserva di valore, come suggerisce Bindseil (2020). Si tratterebbe infatti della diretta attuazione dell'idea di Silvio Gesell di applicare una tassa di possesso sulla moneta, notoriamente citata da Keynes (1936) e ripresa da Goodfriend (2000), Buiters & Panigirtzoglou (2003) e Agarwal & Kimball (2019).

Per quanto riguarda le implicazioni in termini di politica monetaria, non dovrebbero esserci cambiamenti reali perché la nostra CBDC è progettata per replicare il contante piuttosto

che i depositi bancari. L'emissione, il prelievo e il deposito della nostra CBDC corrispondono esattamente all'emissione, al prelievo e al deposito di banconote. È possibile che la velocità di circolazione di una CBDC al dettaglio sia diversa da quella del contante fisico, ma questo non dovrebbe rappresentare un problema significativo per la politica monetaria.

6 Lavori correlati

Come segnalato in precedenza, la CBDC che si propone in questo documento si basa su eCash e GNU Taler.¹⁸ A partire dalla proposta originale e-Cash di Chaum, la ricerca si è concentrata su tre questioni principali. In primo luogo, nella proposta originale di Chaum le monete avevano un valore fisso e potevano essere spese solo nella loro totalità. Pagare grandi somme con monete denominate in centesimi sarebbe stato poco efficiente; quindi Okamoto (1995), Camenisch et al. (2005), Canard & Gouget (2007) e Dold (2019) idearono modi per affrontare il problema. Queste soluzioni comprendono protocolli per dare il resto o rendere divisibili le monete.

Un secondo problema riguarda gli errori nelle transazioni dovuti ad interruzioni della rete. In questo caso, il sistema deve garantire che i fondi rimangano in possesso del consumatore senza pregiudicare la privacy. L'*Endorsed E-Cash* proposto da Camenisch et al. (2007), così come da Dold (2019), affrontano entrambi questo problema. Molte delle soluzioni violano le garanzie sulla privacy per i clienti che utilizzano queste funzionalità e tutte, tranne Taler, violano il requisito della trasparenza del reddito.

La terza questione importante, spesso trascurata, è la trasparenza del reddito e quindi la conformità con i requisiti AML e KYC. Fuchsbauer et al. (2009) hanno deliberatamente progettato il loro sistema di disintermediazione per fornire una semantica più simile al contante. Tuttavia, la disintermediazione totale è in genere difficile da conciliare con le normative AML e KYC dato che diventa impossibile raggiungere qualsiasi livello di responsabilità. Un esempio di tale architettura è ZCash, un registro distribuito (*ledger*) che nasconde dalla rete le informazioni sul pagatore, sul beneficiario e sull'importo della transazione, rendendolo quindi il sistema di pagamento perfetto per la criminalità online. Solo Taler offre sia una privacy costante per i clienti che la trasparenza del reddito, fornendo al contempo un sistema di resto efficiente, scambi atomici (vedi Camenisch et al., 2007) e la possibilità di ripristinare i portafogli dal backup.

Per quanto riguarda i sistemi di pagamento per le CBDC, Danezis & Meiklejohn (2016) hanno progettato un *ledger* scalabile per RSCoin. Si tratta fondamentalmente di un sistema RTGS che viene protetto utilizzando la stessa crittografia che si usa in Bitcoin. Come Taler, il design utilizza lo *sharding* del database per consentire la scalabilità lineare. Tuttavia, la soluzione di Danezis e Meiklejohn non prevede alcuna disposizione per la privacy e manca di elementi per l'integrazione pratica del design con i sistemi e i processi bancari esistenti.

L'EUROchain della Banca Centrale Europea (vedi European Central Bank, 2019) è un altro prototipo di CBDC con registro distribuito. Simile all'architettura proposta in questo documento, EUROchain utilizza un'architettura a due livelli in cui le banche commerciali agiscono come intermediari. Una differenza cruciale è il modo in cui i sistemi cercano di combinare privacy e conformità con la normativa antiriciclaggio (AML). Mentre nel nostro progetto l'autorità di regolamentazione può imporre un limite alla somma di denaro elettronico che un titolare di conto bancario può prelevare in un determinato periodo di tempo, EUROchain emette un numero limitato di «voucher di anonimato» che garantiscono al destinatario un numero limitato di transazioni senza controlli AML. Poiché questi voucher sembrano essere privi di qualsiasi token di valore, non è chiaro come il design possa impedire l'emergere di un mercato nero per i «voucher di anonimato». Inoltre, la nozione di anonimato di EUROchain è molto diversa, in quanto i loro «voucher di anonimato» eliminano solo alcuni controlli AML, preservando la capacità delle banche commerciali di sapere in che modo i clienti spendono il denaro elettronico. Laddove chi paga utilizzando Taler interagisce direttamente con i venditori per spendere il proprio contante elettronico, il sistema EUROchain chiede ai pagatori di istruire le proprie banche commerciali per accedere alle CBDC. Pertanto, EUROchain non emette direttamente token di valore ai consumatori, affida invece ai consumatori il compito di autenticarsi presso la propria banca commerciale per accedere alle CBDC che la banca centrale detiene effettivamente in deposito a garanzia.

¹⁸L'implementazione di eCash da parte della società DigiCash negli anni novanta è documentata su <https://www.chaum.com/ecash>.

Non è quindi evidente quali siano i vantaggi di EUROchain in termini di privacy, prestazioni o sicurezza rispetto all'attuale denaro in deposito.

7 Conclusione

Con l'emergere di Bitcoin e valute digitali come Diem (già nota come Libra) recentemente proposte dai colossi del web, le banche centrali affrontano una crescente concorrenza da parte di operatori privati che offrono la propria alternativa digitale al contante fisico. Le decisioni delle banche centrali sull'emissione o meno di una CBDC dipendono dalla loro valutazione dei benefici e dei rischi di una CBDC. È probabile che questi vantaggi e rischi, nonché le circostanze giurisdizionali specifiche che definiscono l'ambito di applicazione di una CBDC al dettaglio, differiscano da un paese all'altro.

Se una banca centrale decide di emettere una CBDC al dettaglio, proponiamo una CBDC basata su token che combina la privacy delle transazioni con la conformità alle normative KYC, AML e CFT. Tale CBDC non sarebbe in concorrenza con i depositi presso le banche commerciali, replicherebbe piuttosto il contante fisico, limitando quindi i rischi di stabilità finanziaria e di perturbazione della politica monetaria.

Abbiamo dimostrato che lo schema qui proposto sarebbe efficiente ed economico quanto i moderni sistemi RTGS gestiti dalle banche centrali. I pagamenti elettronici con la nostra CBDC richiederebbero solo un semplice database e minuscole quantità di larghezza di banda per le transazioni. L'efficienza e l'economicità di questa soluzione, insieme alla maggiore facilità d'uso da parte del consumatore determinata dal passaggio dall'autenticazione all'autorizzazione, rendono questo schema probabilmente il primo a supportare l'annoso obiettivo dei micropagamenti online. Inoltre, l'uso di monete per firmare crittograficamente contratti elettronici consente anche l'impiego di contratti intelligenti. Ciò potrebbe anche portare all'emergere di applicazioni completamente nuove per i sistemi di pagamento. Sebbene il nostro sistema non sia basato su DLT, può essere facilmente integrato con tali tecnologie se richiesto dalle future infrastrutture del mercato finanziario.

Altrettanto importante, una CBDC al dettaglio deve rimanere, come il contante fisico, un bene rispettoso della privacy sotto il controllo individuale dei cittadini. Lo schema proposto in questo studio soddisfa questo criterio e consente alle banche centrali di evitare gravi sfide alla loro politica monetaria e alla stabilità finanziaria sfruttando al contempo i vantaggi del passaggio al digitale.

Riferimenti bibliografici

- Adrian, T. & Mancini-Griffoli (2019), «The Rise of Digital Money», *IMF Fintech Note* **19/01**.
- Agarwal, R. & Kimball, M. S. (2019), «Enabling Deep Negative Rates to Fight Recessions: A Guide», *IMF Working Paper* **19/84**.
- Agur, I., Ari, A. & Dell’Ariccia, G. (2019), «Designing Central Bank Digital Currencies», *IMF Working Paper* **19/252**.
- Allen, S., Čapkun, S., Eyal, I., Fanti, G., Ford, B. A., Grimmelmann, J., Juels, A., Kostianen, K., Meiklejohn, S., Miller, A., Prasad, E., Wüst, K. & Zhang, F. (2020), «Design Choices for Central Bank Digital Currency: Policy and Technical Considerations», *NBER Working Paper* **27634**.
- Alves, T. & Felton, D. (2004), «Trustzone: Integrated hardware and software security», *ARM IQ* **3(4)**, 18–24.
- Auer, R. & Böhme, R. (2020), «The technology of retail central bank digital currency», *BIS Quarterly Review* pp. 85–96.
- Auer, R., Cornelli, G. & Frost, J. (2020), «Taking stock: ongoing retail CBDC projects», *BIS Quarterly Review* pp. 97–98.
- Baiocchi, G. & Distaso, W. (2003), «GRETLM: Econometric Software for the GNU Generation», *Journal of Applied Econometrics* **18**, 105–110.
- Bank of England (2020), «Central Bank Digital Currency: Opportunities, Challenges and Design. Discussion Paper».
- Bech, M. & Garratt, R. (2017), «Central bank cryptocurrencies», *BIS Quarterly Review* pp. 55–70.
- Berentsen, A. & Schär, F. (2018), «The Case for Central Bank Electronic Money and the Non-case for Central Bank Cryptocurrencies», *Federal Reserve Bank of St. Louis Review* **100(2)**, 97–106.
- Bernstein, D. J., Duif, N., Lange, T., Schwabe, P. & Yang, B.-Y. (2012), «High-speed high-security signatures», *Journal of Cryptographic Engineering* **2**, 77–89.
- Bernstein, D. J. & Lange, T. (2020), «eBACS: ECRYPT Benchmarking of Cryptographic Systems».
URL: <https://bench.cr.yp.to>, consultato il 17 marzo 2020
- Bindseil, U. (2020), «Tiered CBDC and the financial system», number 2351 in «ECB Working Paper», European Central Bank.
- Boar, C., Holden, H. & Wadsworth, A. (2020), «Impending arrival - a sequel to the survey on central bank digital currency», *BIS Papers* **107**.
- Boneh, D. (1999), «Twenty Years of Attacks on the RSA Cryptosystem», *Notices of the AMS* **42(2)**, 202–213.
- Bordo, M. D. & Levin, A. T. (2017), «Central bank digital currency and the future of monetary policy», number 23711 in «NBER Working Paper Series», National Bureau of Economic Research.
- Brunnermeier, M. & Niepelt, D. (2019), «On the Equivalence of Private and Public Money», *Journal of Monetary Economics* **106**, 27–41.
- Buiter, W. H. & Panigirtzoglou, N. (2003), «Overcoming the Zero Bound on Nominal Interest Rates with Negative Interest on Currency: Gesell’s Solution», *The Economic Journal* **113(490)**, 723–746.
- Bullmann, D., Klemm, J. & Pinna, A. (2019), «In search for stability in crypto-assets: are stablecoins the solution?», number 230 in «ECB Occasional Paper Series», European Central Bank.

- Camenisch, J., Hohenberger, S. & Lysyanskaya, A. (2005), «Compact E-Cash», in E. di Ronald Cramer, ed., *Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2005: 24th Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Aarhus, Denmark.
- Camenisch, J., Lysyanskaya, A. & Meyerovich, M. (2007), «Endorsed E-Cash», in *2007 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP'07)*, pp. 101–115.
- Canard, S. & Gouget, A. (2007), «Divisible e-cash systems can be truly anonymous», in *Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques*, pp. 482–497.
- CCC e.V. (2017), «Chaos Computer Club hacks e-motor charging stations», 34c3.
- Chapman, J., Garratt, R., Hendry, S., McCormack, A. & McMahon, W. (2017), «Project Jasper: Are Distributed Wholesale Payment Systems Feasible Yet?», *Financial System Review* pp. 59–69.
- Chaum, D. (1983), «Blind signatures for untraceable payments», in *Advances in Cryptology: Proceedings of Crypto '82*, pp. 199–203.
- Chaum, D., Fiat, A. & Naor, M. (1990), «Untraceable electronic cash», in *Advances in Cryptology: Proceedings of CRYPTO '88*, pp. 319–327.
- Danezis, G. & Meiklejohn, S. (2016), «Centrally Banked Cryptocurrencies», in *23rd Annual Network and Distributed System Security Symposium, NDSS2016*, The Internet Society, San Diego, California, USA.
- Diffie, W. & Hellmann, M. (1976), «New Directions in Cryptography», *IEEE Trans. on Inf. Theory, IT-22* pp. 644–654.
- Dold, F. (2019), *The GNU Taler System: Practical and Provably Secure Electronic Payments*. PhD Thesis, PhD thesis, University of Rennes 1.
- European Central Bank (2019), «Exploring anonymity in central bank digital currencies», *In Focus* (4).
- Fuchsbaauer, G., Pointcheval, D. & Vergnaud, D. (2009), «Transferable constant-size fair e-cash», in *International Conference on Cryptology and Network Security*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 226–247.
- Garcia, F., de Koning Gans, G., Muijers, R., van Rossum, P., Verdult, R., Schreur, R. W. & Jacobs, B. (2008), «Dismantling MIFARE Classic», in *European Symposium on Research in Computer Security*.
- Garratt, R., Lee, M., Malone, B. & Martin, A. (2020), «Token- or Account-Based? A Digital Currency Can Be Both», *Liberty Street Economics* .
- Goodfriend, M. (2000), «Overcoming the Zero Bound on Interest Rate Policy», *Journal of Money, Credit, and Banking* **32**(4), 1007–1035.
- Johnston, C. (2010), «Ps3 hacked through poor cryptography implementation», *Ars Technica* .
- Jordan, T. J. (2019), «Valute, moneta e token digitali», https://www.snb.ch/it/mmr/speeches/id/ref_20190905_tjn/source/ref_20190905_tjn.it.pdf. Discorso in occasione del 30^o anniversario del Centro di scienze economiche (WWZ) e dell'Associazione degli economisti basilesi (VBÖ).
- Kahn, C. M., McAndrews, J. & Roberds, W. (2005), «Money is Privacy», *International Economic Review* **46**(2), 377–399.
- Kahn, C. M. & Roberds, W. (2009), «Why Pay? An Introduction to Payments Economics», *Journal of Financial Intermediation* (18), 1–23.
- Kasper, T., Silbermann, M. & Paar, C. (2010), «All you can eat or breaking a real-world contactless payment system», *Financial Cryptography and Data Security, Lecture Notes in Computer Science* **6052**, 343–50.

- Katzenbeisser, S., Ünal Kocabaş, Rožić, V., Sadeghi, A.-R., Verbauwhede, I. & Wachsmann, C. (2012), «PUFs: Myth, Fact or Busted? A Security Evaluation of Physically Unclonable Functions (PUFs) Cast in Silicon», in *Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2012. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 7428, pp. 283–301.
- Keynes, J. M. (1936), *The General Theory of Employment, Interest and Money*, Macmillan.
- Kiff, J., Alwazir, J., Davidovic, S., Farias, A., Khan, A., Khiaonarong, T., Malaika, M., Monroe, H., Sugimoto, N., Tourpe, H. & Zhou, P. (2020), «A Survey of Research on Retail Central Bank Digital Currency», *IMF Working Paper* **20/104**.
- Kumhof, M. & Noone, C. (2018), «Central bank digital currencies - design principles and balance sheet implications», number 725 in «Staff Working Paper», Bank of England.
- Lapid, B. & Wool, A. (2018), «Cache-Attacks on the ARM TrustZone Implementations of AES-256 and AES-256-GCM via GPU-Based Analysis», in *International Conference on Selected Areas in Cryptography. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 11349.
- Lerner, J. & Tirole, J. (2005), «The Scope of Open Source Licensing», *Journal of Law, Economics & Organization* **21**, 20–56.
- Libra Association (2020), «Libra White Paper v2.0».
URL: <https://libra.org/en-US/white-paper>
- Lim, C. H. & Lee, P. J. (1997), «A key recovery attack on discrete log-based schemes using a prime order subgroup», in *CRYPTO 1997. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1294.
- Lyons, R. K. & Viswanath-Natraj, G. (2020), «What Keeps Stablecoins Stable?», number 27136 in «NBER Working Paper Series», National Bureau of Economic Research.
- Mancini-Griffoli, Peria, M. S. M., Agur, I., Ari, A., Kiff, J., Popescu, A. & Rochon, C. (2018), «Casting Light on Central Bank Digital Currency», *IMF Staff Discussion Notes* **18/08**.
- Nakamoto, S. (2008), «Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System».
URL: <https://www.bitcoin.com/bitcoin.pdf>
- Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A. & Goldfeder, S. (2016), *Bitcoin and Cryptocurrency Technologies: A Comprehensive Introduction*, Princeton University Press.
- Niepelt, D. (2020), «Digital money and central bank digital currency: An executive summary for policymakers», <https://voxeu.org/article/digital-money-and-central-bank-digital-currency-executive-summary>.
- Okamoto, T. (1995), «An Efficient Divisible Electronic Cash Scheme», in E. di Don Coppersmith, ed., *Advances in Cryptology — CRYPTO'95: 15th Annual International Cryptology Conference Santa Barbara, California, USA, 27–31 agosto, 1995 Proceedings*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 438–451.
- Pinto, S. & Santos, N. (2019), «Demystifying ARM TrustZone: A Comprehensive Survey», *ACM Computing Surveys* **51**(6), 1–31.
- Rivest, R. L., Shamir, A. & Adleman, L. (1978), «A Method for Obtaining Digital Signatures and Public Key Cryptosystems», *Comm. ACM* **21**(2).
- Solove, D. J. (2011), *Nothing to Hide: The false tradeoff between privacy and security*, New Haven & London: Yale University Press.
- Soukup, M. & Muff, B. (2007), «Die Postcard lässt sich fälschen», *Sonntagszeitung*.
- Stallman, R. (1985), «The GNU manifesto», *Dr. Dobb's Journal of Software Tools* **10**(3), 30–35.
- Sveriges Riksbank (2020), «The Riksbank's e-krona project», Technical report, Sveriges Riksbank.
URL: <https://www.riksbank.se/globalassets/media/rapporter/e-krona/2019/the-riksbanks-e-krona-pilot.pdf>
- Wojtczuk, R. & Rutkowska, J. (2009), «Attacking Intel Trusted Execution Technology», BlackHat-DC 2009.

- Yalta, A. T. & Lucchetti, R. (2008), «The GNU/Linux Platform and Freedom Respecting Software for Economists», *Journal of Applied Econometrics* **23**, 279–286.
- Yalta, A. T. & Yalta, A. Y. (2010), «Should Economists Use Open Source Software for Doing Research?», *Computational Economics* **35**, 371–394.