

Cómo Emitir una Moneda Digital del Banco Central

David Chaum*
xx Network

Christian Grothoff**
BFH*** y Proyecto GNU

Thomas Moser****
Banco Nacional de Suiza

Esta versión: octubre 2021
Primera versión: mayo 2020

Resumen

Con la aparición de Bitcoin y monedas estables propuestas recientemente por grandes empresas tecnológicas como Diem (antes Libra), los bancos centrales se enfrentan a la creciente competencia de particulares que ofrecen su propia alternativa digital al dinero en efectivo. No abordamos la cuestión normativa de si un banco central debería o no emitir una moneda digital del banco central (Central Bank Digital Currency – CBDC). Contribuimos en cambio al actual debate de investigación mostrando de qué manera un banco central podría hacerlo si así lo deseara. Proponemos un sistema basado en tokens sin tecnología de libro mayor distribuido, y mostramos que el efectivo electrónico ya implementado solo mediante software se puede mejorar para preservar la privacidad en las transacciones, cumplir con los requisitos reglamentarios de modo convincente y ofrecer un nivel de protección de resistencia cuántica contra los riesgos sistémicos que amenazan la privacidad. Ni la política monetaria ni la estabilidad financiera se verían materialmente afectadas porque una CBDC con este diseño replicaría el efectivo físico en lugar de los depósitos bancarios.

JEL: E42, E51, E52, E58, G2

Keywords: Monedas digitales, banco central, CBDC, firmas ciegas, monedas estables

Agradecimientos

Agradecemos a Michael Barczay, Roman Baumann, Morten Bech, Nicolas Cuche, Florian Dold, Andreas Fuster, Stefan Kügel, Benjamin Müller, Dirk Niepelt, Oliver Sigrist, Richard Stallman, Andreas Wehrli, y tres colaboradores anónimos por sus comentarios y sugerencias. Las ideas, opiniones, investigaciones y conclusiones o recomendaciones expresadas en este documento pertenecen estrictamente a los autores. No reflejan necesariamente los puntos de vista del Banco Nacional de Suiza (BNS). El BNS no asume ninguna responsabilidad por errores u omisiones ni por la exactitud de la información contenida en este documento.

Traducción: Javier Sepulveda & Dora Scilipoti

* david@chaum.com

** christian.grothoff@bfh.ch

*** Universidad de Ciencias Aplicadas de Berna

**** thomas.moser@snb.ch

1. Introducción

Desde la aparición de los ordenadores personales en los años ochenta, y especialmente desde que en 1991 la National Science Foundation quitara las restricciones al uso de Internet para propósitos comerciales, se ha buscado crear dinero digital para realizar pagos en línea. La primera propuesta la realizó Chaum (1983). A pesar de que tales métodos fueron implementados, no prosperaron. Fueron en cambio los sistemas con tarjeta de crédito los que se convirtieron en el método dominante para pagos en línea. La propuesta de Nakamoto (2008) para un sistema P2P de dinero digital y el posterior lanzamiento exitoso de Bitcoin desataron una nueva era de investigación sobre el tema y desarrollo de dinero digital. CoinMarketCap enumera más de 5.000 criptomonedas. Recientemente los bancos centrales han empezado a considerar, o al menos estudiar, la emisión de monedas digitales (véase Auer & Böhme 2020, Auer et al. 2020, Boar et al. 2020, Kiff et al. 2020, Mancini-Griffoli et al. 2018).

Actualmente los bancos centrales emiten dos tipos de dinero: (i) reservas en forma de cuentas de liquidación en los bancos centrales para determinados participantes del mercado financiero y (ii) moneda en forma de billetes disponibles para el público. En consecuencia, la bibliografía sobre la moneda digital del banco central (CBDC) distingue entre (a) venta de CBDC al por mayor, con acceso limitado, y (b) venta de CBDC al por menor, accesible al público (véase, p. ej. Bech & Garratt 2017). Una CBDC al por mayor sería menos disruptiva para el sistema actual debido a que los bancos y los participantes seleccionados del mercado financiero ya tienen acceso a dinero digital del banco en forma de cuentas del banco central, que utilizan para liquidar pagos interbancarios. La cuestión aquí es si la tokenización del dinero de un banco central y la tecnología de libro mayor distribuido (Distributed Ledger Technology - DLT) ofrecen beneficios netos en comparación con los sistemas de liquidación bruta en tiempo real (Real-Time Gross Settlement - RTGS). Hasta el momento, la conclusión es que no es así, al menos cuando se trata de pagos interbancarios nacionales (véase Chapman et al. 2017).

Una CBDC al por menor, que sería una nueva forma de dinero del banco central a disposición del público, podría ser más disruptiva para el sistema actual, dependiendo de su diseño. Cuanto más compita una CBDC de este tipo con los depósitos bancarios comerciales, mayor será la amenaza para la financiación bancaria, con un posible impacto adverso en el crédito bancario y la actividad económica (véase Agur et al. 2019). Sin embargo, una CBDC al por menor podría también tener beneficios (véase Bordo & Levin 2017, Berentsen & Schär 2018, Bindseil 2020, Niepelt 2020, Sveriges Riksbank 2020, Bank of England 2020). Poner a disposición de todos el dinero electrónico del banco central sin riesgo de contrapartida podría mejorar la estabilidad y la resistencia del sistema de pago al por menor. También podría proporcionar una infraestructura de pago neutral para promover la competencia, la eficiencia y la innovación. En general, es probable que los costos y beneficios de una CBDC al por menor difieran de un país a otro. Para conocer la opinión del Banco Nacional de Suiza, que no tiene planes de emitir una CBDC al por menor (véase Jordan 2019).

El presente documento se centra en una CBDC al por menor, pero no abordamos la cuestión de si un banco central *debería o no* emitir una moneda CBDC. Nos centramos en cambio en el diseño potencial de una CBDC. Recientemente ha habido un creciente interés en el diseño de monedas CBDC ((véase p. ej. Allen et al. 2020, Bank of England 2020)). El diseño que proponemos difiere significativamente de otras propuestas. Nuestro sistema se basa en la tecnología eCash descrita por Chaum Chaum (1983), Chaum et al. (1990), mejorándola. En particular, proponemos un sistema para CBDC basado en tokens y solo mediante software, sin blockchain para la DLT. La DLT es un diseño interesante en ausencia de un actor principal o si las entidades que interactúan no concuerdan en nombrar un actor central de confianza. Sin embargo, este no es el caso de una CBDC al por menor emitida por un *banco central*. Distribuir el libro mayor del banco central con una blockchain solo aumenta los costes de transacción, no proporciona beneficios tangibles en una implementación por parte de un banco central. Utilizar la DLT para emitir dinero digital puede ser útil si no hay un banco central para empezar (p. ej. el proyecto Sovereign de las Islas Marshall) o si la intención explícita es prescindir de un banco central (p. ej. Bitcoin).¹

La CBDC basada en tokens que se propone aquí permite también la preservación de una cualidad clave del dinero físico: la privacidad en la transacción. Usualmente se argumenta que las protecciones criptográficas para la privacidad exigen tantos recursos computacionales que su utilización en dispositivos móviles no es factible (véase Allen et al. 2020). Si bien esto puede ser cierto en el contexto de la DLT, donde la rastreabilidad pública de las transacciones es necesaria para prevenir el doble gasto Narayanan et al. (2016), no es cierto para el protocolo de firma ciega de tipo Chaum con un banco central que se propone en el presente documento. Nuestra CBDC, basada en firmas ciegas y arquitectura de dos niveles, garantiza una perfecta privacidad de resistencia cuántica en las transacciones, al mismo tiempo que proporciona protecciones sociales tales como impedir el lavado de dinero (Anti-Money Laundering - AML) y financiar la lucha contra el terrorismo (Counter Terrorism Financing - CFT), protecciones que de hecho tienen mayor fuerza que con los billetes.

¹ Puede haber buenos casos de uso para la DLT en el caso de infraestructura de mercado financiero, tal como los intercambios digitales, donde surge la cuestión de como obtener dinero del banco central en la DLT a efectos de liquidación. Sin embargo en esas situaciones, los beneficios potenciales de la DLT, por ejemplo menos costes o reconciliación automática, no surgen de una emisión descentralizada del dinero del banco central.

La privacidad en las transacciones es importante por tres razones. Primero, porque protege a los usuarios frente al escrutinio y el abuso de vigilancia gubernamental. Los programas de vigilancia masiva son problemáticos incluso si las personas creen que no tienen nada que esconder, simplemente por la posibilidad de error y abuso, particularmente si los programas carecen de transparencia e imputabilidad (véase Solove 2011). Segundo, porque la privacidad en las transacciones protege a los usuarios frente a la explotación de datos por parte de los proveedores de servicios de pago. Tercero, porque protege a los usuarios frente a la contraparte en la transacción, descartando la posibilidad de un posterior comportamiento oportunista, o frente a riesgos de seguridad debido a fallos o negligencia en la protección de los datos del cliente (véase Kahn et al. 2005).

Este documento está estructurado como sigue: en la sección 2 explicamos la diferencia entre el dinero del banco central y otro dinero. En la sección 3 analizamos los diseños de CBDC comunes y simplistas, antes de proponer nuestro diseño en la sección 4. Luego comentamos consideraciones políticas y normativas (5) y trabajos relacionados (6); en fin, concluimos (7).

2. ¿Qué es el dinero del banco central?

El dinero es un activo que puede ser usado para comprar bienes y servicios. Para ser considerado dinero, este activo debe ser aceptado por otras entidades distintas del emisor. Este es el motivo por el que los vales, por ejemplo, no se consideran dinero. El dinero genuino tiene que ser aceptado *comúnmente* como medio de intercambio. Si bien el dinero tiene otras funciones, por ejemplo como unidad de cuenta y depósito de valor, la característica que lo distingue es su función como medio de intercambio. Normalmente, la unidad de cuenta (p. ej. cómo se cotizan los precios y cómo se registran las deudas) coincide con el medio de intercambio por razones de conveniencia. La separación puede ocurrir, sin embargo, si el valor del medio de intercambio carece de estabilidad en relación a los bienes y servicios comercializados.² El dinero debe también ser un depósito de valor para poder actuar como medio de intercambio, porque debe preservar su poder de compra desde el momento en que se recibe hasta el momento en que se gasta. Sin embargo, varios otros activos sirven como depósito de valor, como por ejemplo acciones, bonos, metales preciosos e inmuebles. Por tanto, la característica como depósito de valor no es distintiva del dinero.

En la economía moderna, el público usa dos tipos diferentes de dinero: (a) dinero estatal y (b) dinero privado. El dinero estatal lo emite típicamente un banco central, que actúa como agente del Estado. El dinero del banco central está disponible para determinadas instituciones financieras en forma de depósitos en el banco central (reservas) y para el público en forma de moneda (billetes y monedas), también llamado “efectivo”. En una economía moderna con dinero fiduciario, tal dinero no tiene valor intrínseco. Legalmente es una obligación del banco central, aunque no es canjeable.

En la mayoría de los países, el dinero del banco central se define como moneda de curso legal, lo cual significa que debe ser aceptado como pago de una deuda monetaria, incluyendo impuestos y multas legales. Si bien esto garantiza que el dinero del banco central tenga algún valor, el estatus de moneda de curso legal es insuficiente para que el dinero del banco central mantenga un valor estable. Más bien, es la política monetaria de los bancos centrales la que mantiene el valor del dinero. Mantener la estabilidad de los precios, es decir, un valor estable del dinero en relación con el valor de los bienes y servicios comercializados, es una de las principales responsabilidades de los bancos centrales.

En una economía moderna, la mayoría de los pagos se hacen con dinero privado emitido por bancos comerciales. Tal dinero se compone de depósitos a la vista que la gente tiene en los bancos comerciales. A estos depósitos bancarios se puede acceder con cheques, tarjetas de débito, tarjetas de crédito, u otros medios para transferir dinero. Son una obligación del respectivo banco comercial. Una característica fundamental de los depósitos bancarios es que los bancos comerciales garantizan la convertibilidad, bajo demanda, en dinero del banco central a un precio fijo, es decir, a la par. Los depositantes pueden retirar sus fondos en efectivo o transferirlos a una tasa fija de 1:1. Los bancos comerciales mantienen estable el valor de su dinero vinculándolo al dinero del banco central.

No obstante, en un sistema de reserva fraccionado, un banco comercial – incluso siendo solvente – puede no contar con la liquidez necesaria para cumplir su promesa de convertir los depósitos bancarios en dinero del banco central (p. ej. en caso de una caída bancaria) de manera tal que los clientes no puedan retirar su dinero. Un banco también puede llegar a ser insolvente e ir a la bancarrota, y como resultado los clientes pueden perder su dinero. Así, los bancos comerciales están regulados para mitigar estos riesgos.

Una diferencia significativa entre el dinero de un banco central y el dinero emitido privadamente por un banco comercial es, por lo tanto, que este último conlleva un riesgo para la contraparte. Un banco central puede siempre cumplir con sus obligaciones usando su propio dinero no reembolsable. El dinero del banco central es el único

²Esto puede ocurrir espontáneamente en un entorno de alta-inflación, p. ej. cuando los precios se fijan en USD pero los pagos se realizan en divisa local. Lo mismo es cierto para los pagos en Bitcoin, donde los precios usualmente se fijan en USA u otras divisas locales debido a la alta volatilidad de Bitcoin. Una separación también puede ocurrir por el diseño, p. ej. en la Unidad de Fomento (UF) de Chile o la Special Drawing Right (SDR) del fondo monetario internacional (IMF). Sin embargo, también entonces el propósito es tener una unidad de cuenta más estable.

activo monetario de una economía nacional sin riesgo crediticio o de liquidez. Por lo tanto, es el activo que típicamente se prefiere para los pagos en las infraestructuras del mercado financiero (véase p. ej. CPMI-IOSCO *Principles for Financial Market Infrastructures*, 2012). Otra diferencia es que el dinero del banco central afianza el sistema monetario nacional al proporcionar una referencia de valor con la que el dinero de los bancos comerciales mantiene una convertibilidad a la par.

Aparte de los bancos comerciales, otras entidades privadas ocasionalmente intentan emitir dinero, las criptomonedas son solo el intento más reciente. Pero a diferencia de los depósitos bancarios, tal dinero no es comúnmente aceptado como medio de intercambio. Esto también sucede con Bitcoin, la criptomoneda más aceptada. Un impedimento a su utilidad como medio de intercambio es la alta volatilidad de su valor. Una respuesta reciente a este problema fue la aparición de las llamadas monedas estables. Las monedas estables generalmente intentan estabilizar su valor en una de las dos maneras siguientes: o bien imitando a los bancos centrales (monedas estables algorítmicas) o bien imitando a los bancos comerciales o a los medios de inversión (monedas estables con respaldo de activos).³

Las “monedas estables algorítmicas” dependen de algoritmos para regular su suministro. En otras palabras, intentan alcanzar la estabilidad de su precio con sus propias “políticas monetarias algorítmicas”. Hay ejemplos de tales monedas estables (p. ej. Nubits), pero hasta ahora ninguna ha estabilizado su valor por largo tiempo.

Las monedas estables “respaldadas con activos” difieren en función del tipo de activos que usan y de los derechos legales que adquieren los titulares de monedas estables. Los tipos de activos que típicamente se usan son: dinero (reservas del banco central, billetes o depósitos en bancos comerciales), productos básicos (p. ej. oro), valores y a veces otras criptomonedas. Cuán bien tal esquema estabilice el valor de las monedas en relación al activo o los activos subyacentes depende de manera crucial de los derechos legales que adquieran los titulares de las monedas estables. Si una moneda estable es canjeable a un precio fijo (p. ej. 1 moneda = 1 USD, o 1 moneda = 1 onza de oro), tal estabilidad teóricamente se conseguirá.⁴ Lo que el esquema esencialmente hace es replicar a los bancos comerciales garantizando la convertibilidad al activo subyacente a la vista. Sin embargo, a diferencia de los depósitos bancarios, que típicamente están solo parcialmente respaldados por las reservas monetarias del banco central, las monedas estables generalmente están respaldadas completamente por las reservas del activo subyacente para evitar el riesgo de liquidez, principalmente porque carecen de beneficios públicos tales como el soporte de seguros de depósito y prestamistas de última instancia, que se aplican en cambio a los bancos regulados.

Las monedas estables respaldadas con dinero se llaman también monedas estables fiduciarias. Sin embargo, mantener el 100% de garantía en dinero (billetes o depósitos bancarios) no es muy rentable. En consecuencia, los proveedores de monedas estables tienen un incentivo para economizar su tenencia de activos y trasladarse hacia un sistema de reserva fraccionado, tal como lo hicieron los bancos comerciales.⁵ Esto implica que reducen su tenencia de activos de bajo rendimiento al mínimo que se considere necesario para satisfacer el requisito de convertibilidad. Añadiendo en cambio activos líquidos de alto rendimiento tales como bonos del Estado. Esto mejora la rentabilidad pero también incrementa el nivel de riesgo.

Sin embargo, incluso si una moneda estable está garantizada al 100% por un depósito en un banco comercial, sigue expuesta a los riesgos de crédito y liquidez del banco subyacente. Este riesgo se puede eliminar si los depósitos se mantienen en el banco central para que la moneda estable esté respaldada por las reservas del banco central. Tales monedas estables han sido llamadas “CBDC sintéticas” Adrian & Mancini-Griffoli (2019). Es importante señalar, sin embargo, que tales monedas estables no son dinero del banco central y por lo tanto no son CBDC, ya que no constituyen obligaciones del banco central y, por lo tanto, siguen expuestas al riesgo de contraparte, es decir, el riesgo de que el emisor de la moneda estable se declare en quiebra.

Si una moneda estable no es canjeable a un precio fijo, su estabilidad no está garantizada por el activo subyacente. Si la moneda estable a pesar de esto representa una participación en la propiedad del activo subyacente, el esquema se asemeja a un fondo de inversión fijo o a un fondo cotizado en bolsa (Exchange-Traded Fund - ETF), y se aplican los correspondientes riesgos. El valor de la moneda dependerá del valor neto de los activos del fondo, pero su valor real puede desviarse. Si hay participantes autorizados que puedan crear y canjear monedas estables y así actuar como arbitristas, como en el caso de los ETF y como estaba previsto para Diem Libra Association (2020), es probable que la desviación sea mínima.

En general, las monedas estables tienen una mayor probabilidad de llegar a convertirse en dinero que las criptomonedas, especialmente si se regulan adecuadamente. Sin embargo, la disponibilidad de CBDC limitaría significativamente su utilidad.

³Para más detalles sobre la taxonomía y descripción de las monedas estables véase Bullmann et al. (2019).

⁴Si también estabilice o no el valor de las monedas estables en relación con los bienes y servicios negociados depende de la estabilidad del valor del respectivo activo en relación con el valor de los bienes y servicios.

⁵La incertidumbre sobre si una moneda estable está totalmente garantizada puede ser una de las razones por las que una moneda estable puede negociarse por debajo de la par en el mercado secundario (véase Lyons & Viswanath-Natraj 2020). Este fue también históricamente el caso con los billetes cuando eran emitidos por los bancos comerciales. Tales billetes solían negociarse con diversos descuentos en el mercado secundario antes de que la emisión de billetes fuera nacionalizada y transferida al monopolio de los bancos centrales.

3. Diseños simplistas de CBDC

Como se ha señalado, una CBDC sería una obligación del banco central. Dos posibles diseños que se analizan en la literatura son: (a) una CBDC basada en cuentas y (b) una CBDC basada en tokens (o basada en valor). Estos diseños corresponden a los dos tipos existentes de dinero de un banco central y sus correspondientes sistemas de pago (Kahn & Roberds 2008): las reservas de un banco central (en un sistema basado en cuentas) y billetes (en un sistema basado en tokens). Un pago se produce si un activo monetario se transfiere de un pagador a un beneficiario. En un sistema basado en cuentas, una transferencia se produce cobrándole a la cuenta del pagador y transfiriendo el crédito a la cuenta del beneficiario. En un sistema basado en tokens, la transferencia se produce transfiriendo el valor en sí o el token, es decir, un objeto que representa el activo monetario. El mejor ejemplo de un token es el efectivo – monedas o billetes. Pagar con efectivo significa entregar una moneda o un billete. No es necesario registrar la transferencia, la posesión del token es suficiente. Por lo tanto, las partes no están obligadas a revelar sus identidades en ningún momento durante la transacción, ambas pueden permanecer anónimas. De todas maneras, el beneficiario tiene que poder verificar la autenticidad del token. Esta es la razón por la que los bancos centrales invierten mucho en elementos de seguridad para los billetes.

Ha habido sugerencias de que la distinción entre los sistemas basados en cuentas y los sistemas basados en tokens no es aplicable a las monedas digitales Garratt et al. (2020). Nosotros tenemos una opinión diferente porque creemos que hay una diferencia significativa. La distinción fundamental es la información contenida en el activo. En un sistema basado en cuentas, los activos (las cuentas) se asocian con los historiales de las transacciones, que incluyen todas las operaciones de crédito y débito de las cuentas. En un sistema basado en tokens, los activos (tokens) incluyen información acerca de su valor y de la entidad que emitió el token. Por tanto, la única posibilidad de lograr la propiedad de privacidad de la transacción como la que se obtiene con el dinero efectivo reside en los sistemas basados en tokens.⁶

3.1. CBDC basada en cuentas

La forma más simple de lanzar una CBDC sería permitir que el público tenga cuentas de depósito en el banco central. Esto implica que el banco central sería responsable de llevar a cabo verificaciones para conocer a sus clientes (Know-Your-Customer - KYC) y asegurar el cumplimiento del AML y CFT. Esto incluiría no solo realizar el proceso inicial del KYC, sino también autenticar a los clientes para las transacciones bancarias, gestionar el fraude y lidiar con los falsos positivos y las autenticaciones de los falsos negativos. Dada la limitada presencia física de bancos centrales en la sociedad, y el hecho de que la autenticación del ciudadano es algo que probablemente en la actualidad los bancos no estén preparados para hacer a gran escala, cualquier CBDC basada en cuentas requeriría que el banco central delegara estas verificaciones. Todo el servicio y mantenimiento de tales cuentas podría asignarse a proveedores externos Bindseil (2020), o la legislación podría obligar a los bancos comerciales a abrir cuentas bancarias en el banco central para sus clientes Berentsen & Schär (2018).

Tal CBDC basada en cuentas daría potencialmente a un banco central mucha información. Una posible preocupación podría ser que esto permitiera a los gobiernos realizar fácilmente vigilancia masiva e imponer sanciones a los titulares de cuentas individuales. Su naturaleza centralizada hace que tales intervenciones sean económicas y fáciles de aplicar contra individuos o grupos. Incluso en las democracias, hay muchos ejemplos de abusos de vigilancia dirigidos a críticos y opositores políticos. Se podría argumentar que los bancos centrales independientes puedan salvaguardar tal información del escrutinio del gobierno y el abuso político, pero esto solo abriría una nueva vía para la presión política, amenazando la independencia del banco central. Además, la base de datos central sería un objetivo importante para los atacantes: incluso el acceso de solo lectura a partes de la base de datos podría crear riesgos significativos para las personas cuyos datos fueran expuestos.

Proveyendo cuentas bancarias al público, un banco central estaría también en competencia directa con los bancos comerciales. Esta competencia implicaría dos riesgos. Primero, podría amenazar la base de depósitos de los bancos y, en el extremo, desintermediar el sector bancario. Esto podría afectar de manera adversa la disponibilidad de crédito para el sector privado y, como resultado, la actividad económica Agur et al. (2019). La desintermediación de los bancos también podría conducir a la centralización del proceso de asignación de crédito dentro del banco central, lo que afectaría negativamente la productividad y el crecimiento económico. En segundo lugar, permitir que la gente traslade sus depósitos al refugio seguro de un banco central podría acelerar las caídas bancarias durante crisis financieras.

Existen sin embargo argumentos contrarios. Brunnermeier & Niepelt (2019) argumentan que la transferencia de fondos desde un depósito hacia una cuenta de CBDC conduciría a una sustitución automática de la financiación

⁶Si bien el término “Bitcoin” sugiere el uso de tokens, Bitcoin es un sistema basado en cuentas. La única diferencia entre un sistema tradicional basado en cuentas y una blockchain es que las cuentas no se guardan en una base de datos central, sino en una base de datos descentralizada del tipo “solo por anexión”.

de depósitos por la financiación del banco central, simplemente haciendo explícita la garantía implícita del banco central como prestamista de última instancia. Berentsen & Schär (2018) sostienen que la competencia de los bancos centrales podría incluso tener un efecto disciplinario sobre los bancos comerciales y, por lo tanto, incrementar la estabilidad del sistema financiero, ya que los bancos comerciales tendrían que hacer sus modelos de negocio más seguros para evitar las caídas bancarias.

También hay propuestas para mitigar el riesgo de la desintermediación que tienen como objetivo limitar o desincentivar el uso de CBDC como depósito de valor. Una propuesta es limitar la cantidad de CBDC que se puede poseer. Una segunda propuesta es aplicar una tasa de interés ajustable a las cuentas de CBDC, de manera que la remuneración esté siempre lo bastante por debajo de la remuneración de las cuentas de los bancos comerciales (posiblemente incluyendo un rendimiento negativo) para hacer que las CBDC resulten menos atractivas como depósitos de valor Kumhof & Noone (2018), Bindseil (2020). Además, para disuadir las caídas bancarias, Kumhof & Noone (2018) sugieren que las CBDC no deberían ser emitidas contra depósitos bancarios, sino solo contra valores tales como bonos del Estado. En general, una CBDC basada en cuentas requeriría un análisis más profundo de estas cuestiones.

3.2. CBDC basada en tokens y dependiente del hardware

Un banco central podría también emitir tokens electrónicos en lugar de cuentas. Técnicamente esto requiere de un sistema para asegurar que los tokens electrónicos no se puedan copiar fácilmente. Las funciones físicamente imposibles de clonar (véase Katzenbeisser et al. 2012) y las zonas seguras en el hardware (véase Alves & Felton 2004, Pinto & Santos 2019) son dos tecnologías potenciales para la prevención de la copia digital. Las funciones físicas imposibles de clonar, sin embargo, no se pueden intercambiar a través de Internet (eliminando así el uso principal de las CBDC), y anteriores funciones de seguridad en el hardware para la prevención de copias se han visto comprometidas repetidamente (véase p. ej. Wojtczuk & Rutkowska 2009, Johnston 2010, Lapid & Wool 2018).

Una ventaja fundamental de las CBDC basadas en tokens sobre las basadas en cuentas del banco central es que los sistemas basados en tokens funcionarían sin conexión, es decir, los usuarios podrían intercambiar tokens (peer-to-peer) sin involucrar al banco central, lo que protegería la privacidad y la libertad de las personas. Sin embargo, la desintermediación que se produce cuando los usuarios pueden intercambiar tokens electrónicos sin los bancos como intermediarios que realizan los controles KYC, AML y CFT dificultarían la limitación de los abusos por parte de delincuentes.

Las tarjetas SIM son actualmente las candidatas más extensivamente disponibles para un sistema de pago seguro basado en hardware, pero estas también conllevan riesgos. La experiencia (véase p. ej. Soukup & Muff 2007, Garcia et al. 2008, Kasper et al. 2010, CCC e.V. 2017) sugiere que cualquier dispositivo económicamente producible que almacene tokens con un valor monetario en posesión de una persona, y que permita transacciones sin conexión – y por tanto el robo de la información que contiene – será el objetivo de ataques de falsificación exitosos tan pronto como el valor económico del ataque fuera lo suficientemente elevado. Tales ataques incluyen usuarios que atacan su propio hardware (Allen et al. 2020, véase también). Los sistemas de pago con tarjeta que se han desplegado previamente dependen de la resistencia a la manipulación en combinación con la detección del fraude para limitar el impacto de una situación de peligro. Sin embargo, la detección del fraude requiere la habilidad de identificar a los pagadores y seguir la pista de los clientes, lo cual no es compatible con la privacidad de la transacción.

4. Diseño de CBDC basado en tokens para salvaguardar la privacidad

La CBDC que se propone aquí es de tipo “solo software”, simplemente una aplicación para teléfonos inteligentes que no requiere ningún hardware adicional por parte de los usuarios. La CBDC se basa en eCash y GNU Taler. Taler es parte del Proyecto GNU, cuyo fundador, Richard Stallman, acuñó el término *Software Libre*, actualmente denominado *Software Libre y de Código Abierto* (Free/Libre Open Source Software – FLOSS).⁷ Un programa se considera “Software Libre” si la licencia otorga a los usuarios cuatro libertades esenciales: la libertad de ejecutar el programa como deseen, la libertad de estudiar el programa y modificarlo, la libertad de redistribuir copias del programa y la libertad de distribuir copias de las versiones modificadas del programa. El software libre no tiene

⁷Para más información sobre GNU, véase <https://www.gnu.org> y Stallman (1985). GNU Taler se publica gratuitamente bajo la Licencia Pública General Affero del Proyecto GNU. Otros programas del Proyecto GNU populares entre los economistas son «R» y “GNU Regression, Econometrics and Time-series Library” (GRET). Un análisis de los beneficios del FLOSS en comparación con el software privativo en el campo de la investigación puede consultarse en Baiocchi & Distaso (2003), Yalta & Lucchetti (2008) y Yalta & Yalta (2010). Sobre el licenciamiento de código abierto véase Lerner & Tirole (2005).

por qué ser no comercial: proporcionar soporte técnico para software es un modelo de negocio estándar para el FLOSS.

Dado el gran número de partes interesadas involucradas en una CBDC al por menor (el banco central, el sector financiero, comerciantes y clientes) y la importancia crítica de la infraestructura, una CBDC al por menor debe basarse en el FLOSS. Imponer una solución propietaria que requiera la dependencia de un proveedor en particular sería probablemente un obstáculo para la adopción desde el principio. Con el FLOSS, todas las partes interesadas tienen acceso a cada detalle de la solución y el derecho de adaptar el software a sus necesidades. Esto conduce a una integración más fácil y una mejor interoperabilidad y competencia entre proveedores.⁸ Además, permite que el banco central cumpla con los requisitos de transparencia y responsabilidad. Los beneficios del FLOSS para la seguridad son también ampliamente reconocidos. La disponibilidad del código fuente y el derecho a modificarlo facilitan la detección de fallos y su rápida solución.⁹

En esta nuestra arquitectura que proponemos todas las interacciones del consumidor y el comerciante son con bancos comerciales. Sin embargo, la creación de dinero y la base de datos las proporcionan exclusivamente el banco central. Los bancos comerciales autentican a los clientes cuando retiran CBDC y a los comerciantes/beneficiarios cuando reciben CBDC, pero cuando gastan CBDC, los clientes/pagadores solo tienen que autorizar sus transacciones y no necesitan identificarse. Esto hace que los pagos resulten más baratos, fáciles y rápidos, y evita una fácil interferencia con la privacidad Dold (2019). Además, autenticar a los clientes cuando retiran CBDC y a los comerciantes/beneficiarios cuando reciben CBDC garantiza el cumplimiento del KYC, AML y CFT.

La CBDC que se propone en el presente documento es un auténtico instrumento digital al portador porque cuando el usuario retira una suma de dinero en forma de número, el número es “cegado” u ocultado por el teléfono inteligente con un cifrado especial. En el sistema real, una moneda es un par de claves pública / privada, y la clave privada solo la conoce el propietario de la moneda.¹⁰ La moneda deriva su valor financiero de la firma del banco central en la clave pública de la moneda. El banco central hace la firma con su clave privada y dispone de múltiples pares de claves de denominación para la firma ciega de monedas de diferentes valores. Un comerciante puede utilizar la correspondiente “clave pública” del banco central para verificar la firma. Sin embargo, para asegurarse de que la moneda no haya sido copiada y ya canjeada por otro beneficiario (es decir, que no se haya “gastado dos veces”), el comerciante debe depositar la moneda para que el banco central pueda comparar la moneda con un archivo de monedas canjeadas. Debido a que ni el banco comercial ni el banco central ven el número de la moneda durante el retiro, más tarde, cuando el comerciante deposita la moneda, se desconoce qué usuario la retiró. El cegamiento y la privacidad resultante son los que hacen de este tipo de CBDC un verdadero instrumento digital al portador.

En el análisis que sigue proporcionamos una introducción de alto nivel a la tecnología y demostramos cómo se puede integrar con el sistema bancario existente para crear una CBDC. Dold (2019) describe detalles adicionales.

4.1. Componentes fundamentales

A continuación describimos los principales componentes del protocolo, incluido el trasfondo matemático para una posible instanciación de las primitivas criptográficas utilizadas, para ilustrar cómo podría funcionar una implementación. Observamos que existen diseños matemáticos alternativos y equivalentes para cada componente, y simplemente presentamos los diseños seguros más sencillos de los que tenemos conocimiento.

Firmas digitales. La idea básica de las firmas digitales en un esquema de firma con clave pública es que el propietario de una clave privada es el único que puede firmar un mensaje, mientras que la clave pública permite a cualquiera verificar la validez de la firma.¹¹ El resultado de la función de verificación es la declaración binaria “verdadero” o “falso”. Si el mensaje está firmado con la clave privada que pertenece a la clave pública de verificación, el resultado es verdadero, de lo contrario es falso. En nuestra propuesta, el mensaje es una “moneda” o “billete” con un número de serie, y la firma del banco central confirma su validez. Si bien GNU Taler usa por defecto firmas EdDSA modernas (véase Bernstein et al. 2012), presentamos un esquema de firma criptográfica simple basado en el bien estudiado sistema criptográfico RSA Rivest et al. (1978).¹² Sin embargo, en principio se

⁸Sin embargo, puede haber otros roles para hardware privado. Por ejemplo, proteger los depósitos de claves y ciertas funciones de auditoría, en la medida en que tal seguridad pueda demostrarse solo como aditiva, puede ser un área donde el hardware dedicado evaluado por solo un número limitado de expertos podría tener ventajas.

⁹Por ejemplo, un boletín de seguridad cibernética emitido por la Agencia de Seguridad Nacional de EE. UU. en abril de 2020 insta a los usuarios a priorizar el software de código abierto en la selección y el uso de servicios de colaboración para la comunicación por Internet: “El desarrollo de código abierto puede proporcionar confiabilidad de que el código está escrito para asegurar las mejores prácticas de programación y no es probable que introduzca vulnerabilidades o debilidades que puedan poner en riesgo a los usuarios y los datos” (U/OO/134598-20).

¹⁰En Bitcoin, que es un sistema basado en cuentas, el par de claves es una cuenta, siendo la clave pública la “dirección” de la cuenta y por tanto un tipo de “identidad”, incluso si se trata de un pseudónimo.

¹¹La criptografía de clave pública fue introducida por Diffie & Hellmann (1976), y la primera implementación de firmas digitales fue introducida por Rivest et al. (1978).

¹²Para un análisis de la larga historia del criptosistema RSA y un estudio de los ataques al criptosistema RSA, consulte Boneh (1999).

puede utilizar cualquier esquema de firma criptográfica (DSA, ECDSA, EdDSA, RSA, etc.).

Para generar las claves RSA, el firmante elige primero dos grandes e independientes números primos p y q y calcula $n = pq$ así como la función totient de Euler $\phi(n) = (p-1)(q-1)$. Entonces, cualquier e con $1 < e < \phi(n)$ y $\gcd(e, \phi(n)) = 1$ se puede usar para definir una clave pública (e, n) . La condición de que el máximo común divisor (greatest common divisor - gcd) de e y $\phi(n)$ tiene que ser 1 (p. ej., que deben ser relativamente primos) asegura que la inversa de e mód $\phi(n)$ existe. Esta inversa es la correspondiente clave privada d . Dado $\phi(n)$, la clave privada d se puede calcular usando el algoritmo extendido Euclídeo de modo que $d \cdot e \equiv 1 \pmod{\phi(n)}$.

Dada la clave privada d y la clave pública (e, n) , una firma simple RSA s sobre un mensaje m es $s \equiv m^d \pmod{n}$. Para verificar la firma, se calcula $m' \equiv s^e \pmod{n}$. Si m' y m coinciden, la firma es válida, lo que prueba que el mensaje fue firmado con la clave privada que pertenece a la clave pública de verificación (autenticación de mensaje) y que ese mensaje no ha sido cambiado en tránsito (integridad de mensaje). En la práctica, las firmas se colocan sobre los hashes de los mensajes en vez de los propios mensajes. Las funciones hash calculan el resumen de los mensajes, que son identificadores únicos y cortos para los mensajes. Firmar un hash corto es mucho más rápido que firmar un mensaje largo, y la mayoría de los algoritmos de firma solo funcionan con entradas relativamente cortas.¹³

Firmas ciegas. Usamos firmas ciegas, introducidas por Chaum (1983), para proteger la privacidad de los compradores. Una firma ciega se usa para crear una firma criptográfica para un mensaje sin que el firmante conozca el contenido del mensaje que se firma. En nuestra propuesta, esto evita que los bancos comerciales y el banco central puedan rastrear las compras identificando a los compradores. Nuestra propuesta funciona en principio con cualquier esquema de firma ciega, pero la mejor solución es la variante basada en RSA descrita por Chaum (1983).

El cegamiento lo realizan los clientes, quienes ciegan sus monedas antes de transmitirlos al banco central para ser firmadas. Los clientes por tanto no necesitan confiar al banco central la protección de su privacidad. Además, el cegamiento RSA proveería de protección de la privacidad incluso contra ataques informáticos cuánticos. El banco central, por su parte, establece múltiples denominaciones de pares de claves disponibles para realizar la firma ciega de monedas con diferentes valores, y publica/provee las correspondientes claves públicas (e, n) para estos valores.

Sea f el valor hash de una moneda y por tanto un identificador único para esta moneda. El cliente que retira la moneda primero genera un factor ciego aleatorio b y calcula $f' \equiv fb^e \pmod{n}$ con la clave pública del banco central para ese valor. La moneda cegada f' se transmite luego al banco central para ser firmada. El banco central firma f' con su clave privada d calculando la firma ciega $s' \equiv (f')^d \pmod{n}$ y devuelve s' al cliente. El cliente puede entonces des-cegar la firma calculando $s \equiv s'b^{-1} \pmod{n}$. Esto funciona porque $(f')^d = f^d b^{ed} = f^d b$ y, así, multiplicar s' con b^{-1} produce f^d , que es una firma RSA válida sobre f como antes: $s^e \equiv f^{de} \equiv f \pmod{n}$.

En la propuesta original de Chaum, las monedas eran solo tokens. Sin embargo, nosotros queremos que los consumidores puedan realizar contratos usando firmas digitales. Para lograrlo, cuando una billetera digital retira una moneda, primero crea una clave privada aleatoria c y calcula la correspondiente clave pública C de esta moneda para crear firmas digitales con esquemas de firma criptográfica regulares (como DSA, ECDSA, EdDSA y RSA). Entonces, se deriva f usando una hash criptográfica de la clave pública C , que luego es firmada en modalidad ciega por el banco central (usando un factor aleatorio ciego actualizado para cada moneda). Ahora el cliente puede usar c para firmar compras electrónicamente, gastando así la moneda.

Como se ha señalado anteriormente, el banco central establecería pares de claves para los diferentes valores de las monedas y publicaría las claves públicas que los clientes podrían usar para retirar dinero. Estas claves de denominación, y por tanto las monedas, tendrían una fecha de vencimiento antes de la cual deberían ser gastadas o intercambiadas por nuevas monedas. A los clientes se les daría una cierta cantidad de tiempo durante el cual podrían intercambiar sus monedas. Un proceso similar existe para los billetes físicos, donde las series de los billetes se renuevan regularmente para que los billetes vayan equipados con las últimas características de seguridad, excepto que los billetes generalmente permanecen en circulación durante décadas en vez de por unos pocos meses o años.¹⁴

Desde un punto de vista técnico, una fecha de vencimiento tiene dos ventajas. Primero, mejora la eficiencia del sistema porque el banco central puede descartar entradas vencidas y no tiene que almacenar y buscar una lista siempre creciente de monedas (gastadas) para detectar el doble gasto. Segundo, reduce los riesgos de seguridad porque el banco central no tiene que preocuparse sobre ataques contra sus claves (d) de denominación (privadas) vencidas. Además, incluso si una clave privada se ve comprometida, el tiempo durante el cual el atacante puede usar la clave es limitado. Además cobrar una comisión por el cambio permitiría al banco central implementar tasas de interés negativas, si se considera necesario. El banco central podría también imponer un límite de conversión por cliente en consideración del AML y el CFT (límites de “efectivo”) o por razones de estabilidad financiera (para prevenir el acaparamiento o las caídas bancarias), si así se deseara.

¹³En el caso del criptosistema RSA el límite de la longitud es $\log_2 n$ bits.

¹⁴En Suiza, por ejemplo, el Swiss National Bank empezó la eliminación paulatina la serie octava de billetes en abril de 2016. Estos billetes fueron puestos en circulación al final de los 90. A partir del día 1 de enero de 2020, sin embargo, todos los billetes que empiezan por la serie sexta emitidos en 1976, así como cualquier futura serie, permanecen válidas y se pueden cambiar por billetes actuales de forma indefinida.

Protocolo de intercambio de claves. GNU Taler utiliza un protocolo de intercambio de claves de manera inusual para proporcionar un vínculo entre la moneda original y el cambio (también llamado “vuelto”) entregado por esa moneda original. Esto asegura que siempre se pueda entregar el cambio sin comprometer la transparencia de los ingresos o la privacidad del consumidor. El mismo mecanismo se puede usar también para realizar devoluciones anónimas a los clientes. El protocolo también maneja fallos en la red y en los componentes, asegurando que los pagos se hayan realizado definitivamente o se hayan cancelado definitivamente y que todas las partes tengan una prueba criptográfica del resultado. Esto es aproximadamente equivalente a los intercambios atómicos de los protocolos *interledger* o al intercambio justo en sistemas tradicionales de efectivo electrónico.

La construcción matemática más común para un protocolo de intercambio de claves es la construcción Diffie-Hellman Diffie & Hellmann (1976). Esta permite que dos partes puedan derivar una clave secreta compartida. Para hacerlo, comparten dos parámetros del dominio p y g , que pueden ser públicos, donde p es un número primo grande y g es una raíz primitiva módulo p .¹⁵ Ahora, las dos partes eligen sus claves privadas a y b , que son dos números enteros grandes. Con estas claves privadas y los parámetros del dominio, generan sus respectivas claves públicas $A \equiv g^a \pmod{p}$ y $B \equiv g^b \pmod{p}$. Cada una de las partes ahora puede usar su propia clave privada y la clave pública de la otra parte para calcular la clave secreta compartida $k \equiv (g^b)^a \equiv (g^a)^b \equiv g^{ab} \pmod{p}$.¹⁶

Para obtener el cambio (también llamado “vuelto”), el cliente empieza con la clave privada de la moneda c . gastada parcialmente. Sea C la correspondiente clave pública, p. ej. $C = g^c \pmod{p}$. Cuando la moneda se gastó parcialmente, el banco central grabó en su base de datos la transacción en la que se incluye a C . Para simplificar, daremos por sentado que existe una denominación que coincide exactamente con el valor residual. De no ser así, se puede simplemente ejecutar repetidamente el protocolo de cambio hasta obtener todo el cambio necesario. Sea (e, n) la clave de denominación para el cambio que se tiene que emitir.

Para obtener el cambio, el cliente primero crea κ claves de transferencia privada t_i para $i \in \{1, \dots, \kappa\}$ y calcula las correspondientes claves públicas T_i . Estas claves de transferencia κ son simplemente pares de claves pública-privada que permiten al cliente ejecutar localmente el protocolo de intercambio de claves – con el cliente jugando en ambos lados – κ veces entre c y cada t_i . Si se usa Diffie-Hellman para el protocolo de intercambio de claves, tendremos $T_i \equiv g^{t_i} \pmod{p}$.

El resultado son tres secretos de transferencia $K_i \equiv KX(c, t_i)$. El protocolo de intercambio de claves se puede usar de diferentes maneras para llegar al mismo valor $K_i \equiv KX(C, t_i) = KX(c, T_i)$. Dada K_i , el cliente usa una función criptográfica hash H para derivar valores $(b_i, c_i) \equiv H(K_i)$, donde b_i es un factor ciego válido para la clave de denominación (e, n) y c_i es una clave privada para obtener la moneda recién creada como cambio. c_i debe ser adecuada tanto para crear firmas criptográficas como para su futuro uso con el protocolo de intercambio de claves (como c , para obtener cambio a partir del cambio). Sea C_i la clave pública correspondiente a c_i . El cliente solicita entonces al banco central que cree una firma ciega sobre C_i para $i \in \{1, \dots, \kappa\}$.¹⁷ En esta petición, el cliente también se compromete a las claves públicas T_i . La petición es autorizada usando una firma hecha con la clave privada c .

En lugar de devolver directamente la firma ciega, el banco central primero desafía al cliente para comprobar que el cliente haya usado correctamente la construcción mencionada anteriormente proveyendo $\gamma \in \{1, \dots, \kappa\}$. El cliente debe entonces revelar al banco central la t_i para $i \neq \gamma$. El banco central puede entonces calcular $K_i \equiv KX(C, t_i)$ y derivar los valores de (b_i, c_i) . Si para todas las $i \neq \gamma$ la t_i provista demuestra que el cliente usó la construcción correctamente, el banco central devuelve la firma ciega sobre C_γ . Si el cliente no provee una prueba correcta, se pierde el valor residual de la moneda original. Esto penaliza efectivamente a quienes intentan evadir la transparencia de sus ingresos con una tasa de impuestos estimada de $1 - \frac{1}{\kappa}$.

Para evitar que un cliente conspire con un comerciante que está tratando de ocultar sus ingresos, el banco central permite que cualquiera que conozca C pueda obtener, en cualquier momento, los valores de T_γ y las correspondientes firmas ciegas de todas las monedas vinculadas a la moneda original C . Esto permite que el propietario de la moneda original – que conoce c – calcule $K_\gamma \equiv KX(c, T_\gamma)$ y, a partir de allí, pueda derivar (b_i, c_i) y descifrar la firma ciega. En consecuencia, un comerciante que oculte sus ingresos de este modo formaría básicamente una unión económica limitada con el cliente en lugar de obtener un control exclusivo.

¹⁵Un entero g es una raíz primitiva módulo p si para cada entero a coprimo a p hay algún entero k para el cual $g^k \equiv a \pmod{p}$. En la práctica, g debería ser tal raíz primitiva $p - 1$, que se llama también generador, para prevenir ataques de subgrupo tales como ataques Pohlig-Hellman (véase Lim & Lee 1997).

¹⁶El mismo mecanismo también se podría usar para garantizar que las monedas no se transfieran a un tercero durante el retiro. Para lograr esto, los consumidores tendrían que salvaguardar una clave de identidad a largo plazo. Luego, el proceso de retiro podría usar la misma construcción que usa GNU Taler para obtener el cambio, excepto que se usaría la clave de identidad a largo plazo de un cliente en lugar de la moneda original cuando se retira de la cuenta bancaria del cliente. Sin embargo, si el cliente no protege la clave de identidad a largo plazo las garantías de privacidad podrían quedar anuladas con consecuente riesgo de robo de todas las monedas restantes. Dado el riesgo limitado en las transferencias a terceros al retirar monedas, no está claro si esta mitigación sería una buena compensación.

¹⁷Si se usara el criptosistema RSA para firmas ciegas, usaríamos $f \equiv FDH_n(C_i)$, donde $FDH_n()$ es el hash de dominio completo sobre el dominio n .

4.2. Arquitectura del sistema

El objetivo principal de nuestra arquitectura es asegurar que los bancos centrales no tengan que interactuar directamente con los clientes o guardar ninguna información sobre ellos, sino simplemente mantener una lista de las monedas que se gastan. La autenticación se delega a los bancos comerciales, que tienen ya la infraestructura necesaria. Los protocolos de retiro y depósito llegan al banco central a través del banco comercial como intermediario. Desde el punto de vista del cliente, el proceso es análogo a retirar dinero efectivo desde un cajero automático. La transacción entre el banco comercial del usuario y el banco central tiene lugar en segundo plano. El procedimiento para retirar CBDC sería como se muestra en la Figura 1.

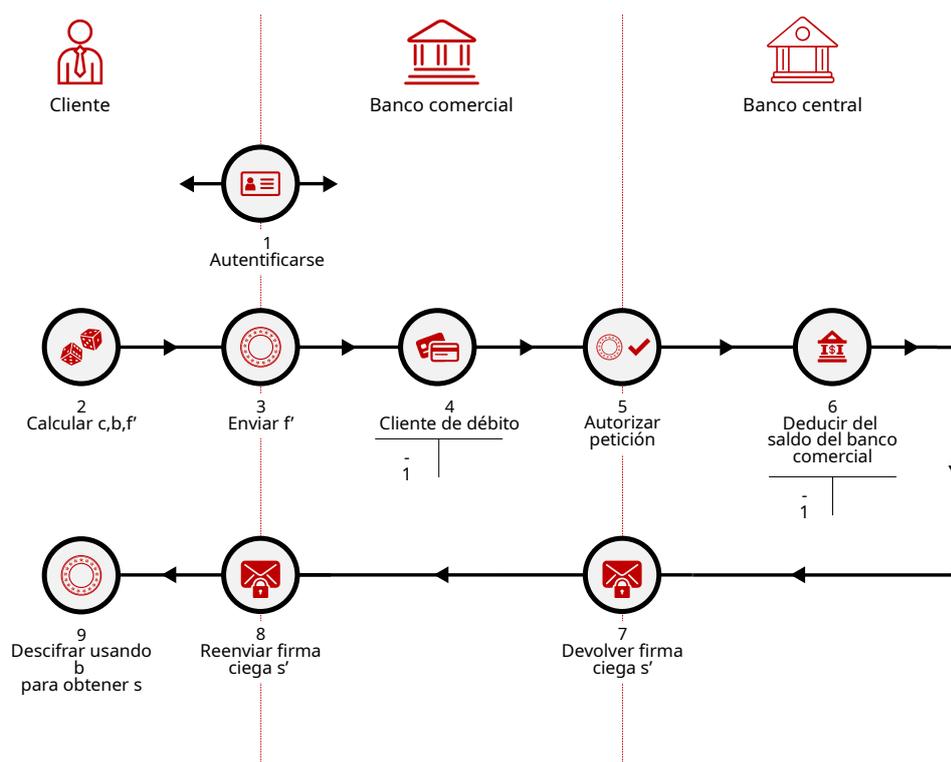


Figura 1: Retiro de CBDC

Un cliente (1) proporciona autenticación a su banco comercial usando la autenticación respectiva del banco comercial y los procedimientos de autorización. A continuación, el teléfono (u ordenador) del cliente obtiene la clave de denominación (e, n) provista por el banco central para ese valor; calcula entonces (2) un par de claves para una moneda, con la clave privada c y la clave pública C , y elige un factor de cegado b . A la clave pública de la moneda se le aplica una función hash $(\rightarrow f)$ y es cegada $(\rightarrow f')$. A continuación, (3) el teléfono del cliente envía f' junto con una autorización para retirar la moneda y debitar de la cuenta del cliente en el banco comercial a través de un canal seguro establecido. El banco comercial entonces (4) debita la cantidad en la cuenta de depósito del cliente, (5) autoriza digitalmente la petición con la propia firma digital de su sucursal bancaria y reenvía la petición y la moneda cegada al banco central para su firma. El banco central (6) deduce el valor de la moneda en la cuenta del banco comercial, firma la moneda de forma ciega con la clave privada del banco central para el valor respectivo, y (7) devuelve la firma ciega s' al banco comercial. (8) reenvía la firma ciega s' a la billetera electrónica del cliente. Finalmente, el teléfono del cliente (9) usa b para descifrar la firma $(\rightarrow f)$ y almacena la moneda recién acuñada (c, s) .

Cuando se gastan CBDC, el proceso es análogo a pagar al vendedor en efectivo. Sin embargo, para asegurar el acuerdo, el vendedor debe depositar las monedas. El procedimiento para gastar CBDC se indica en la Figura 2.

Un cliente y un vendedor negocian un contrato comercial, y (1) el cliente usa una moneda electrónica para firmar el contrato o factura de venta con la clave privada c de la moneda y transmite la firma al vendedor. La firma de una moneda en un contrato con una moneda válida es una instrucción del cliente para pagar al vendedor que

es identificado por la cuenta bancaria en el contrato. Los clientes pueden firmar contratos con múltiples monedas en caso de que una sola moneda fuera insuficiente para pagar la cantidad total. El vendedor (2) valida entonces la firma de la moneda sobre el contrato y la firma s del banco central sobre f que corresponde a la C de la moneda con las respectivas claves públicas y reenvía la moneda firmada (junto con la información de la cuenta del vendedor) al banco comercial del vendedor. El banco comercial del vendedor (3) confirma que el vendedor es uno de sus clientes y envía la moneda firmada al banco central. El banco central (4) verifica las firmas y comprueba su base de datos para asegurar que la moneda no haya sido previamente gastada. Si todo está en orden, (5) el banco central añade la moneda a la lista de monedas gastadas, acredita la cuenta del banco comercial en el banco central y (6) envía la confirmación al banco comercial a tal efecto. A continuación, (7) el banco comercial acredita la cuenta del vendedor e (8) informa al vendedor. El vendedor (9) entrega el producto o servicio al cliente. Todo el proceso dura solo unos pocos milisegundos.

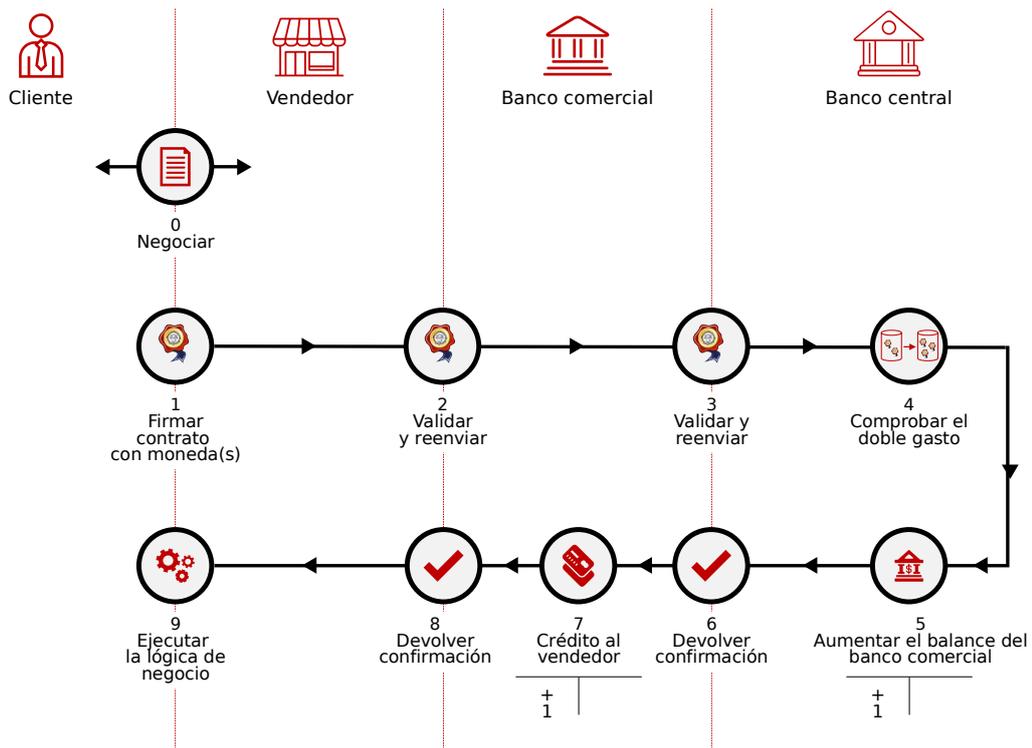


Figura 2: Gastar y depositar CBDC

4.3. Consideraciones acerca de la Seguridad

Nuestra propuesta requiere que el banco central opere un servicio en línea y una base de datos de alta disponibilidad. Debido a que los usuarios pueden copiar las monedas electrónicas, solo los controles en línea pueden prevenir eficientemente el doble gasto. Si bien existen soluciones teóricas para identificar de manera retroactiva a usuarios que se dediquen al doble gasto (véase Chaum et al. 1990), tales soluciones crean un riesgo económico tanto para los usuarios como para el banco central, debido al retraso en la identificación de transacciones fraudulentas. La detección del doble gasto en línea elimina este riesgo, pero a su vez implica que las transacciones serán imposibles de realizar si la conexión con el banco central no estará disponible.

El banco central también tendrá que proteger la confidencialidad de las claves privadas que utiliza para firmar las monedas y otros mensajes del protocolo. De manera que si las claves de las firmas del banco central se vieran en algún momento comprometidas, como por ejemplo por una computadora cuántica, un ataque físico en su centro de datos, o quizás por algún nuevo algoritmo imprevisto, los usuarios puedan de forma segura, y sin comprometer su privacidad, ser reembolsados con todas las monedas que no han gastado. El banco central anunciaría la revocación de clave mediante la API (Application Programming Interface), que sería detectada por las billeteras e iniciarían el siguiente protocolo de actualización: el usuario revela al banco central la clave pública C de la moneda, la firma s

del banco central, y el factor ciego b , posibilitando así que el banco central verifique el retiro legítimo del usuario y devuelva el valor de la moneda no gastada. Para detectar un posible compromiso de esta clave, el banco central puede monitorear la base de datos en busca de casos de depósitos que superen los retiros.

4.4. Escalabilidad y Costes

El esquema que proponemos sería tan eficiente y rentable como los modernos sistemas RTGS que utilizan actualmente los bancos centrales.

La escalabilidad se refiere al costo de aumentar la capacidad de procesamiento para que se pueda procesar un número cada vez mayor de transacciones en un tiempo adecuado para la finalidad. El costo global del sistema puede ser bajo, ya que la CBDC que se propone aquí se basa en software solamente. Las monedas gastadas deben guardarse hasta que caduque el par de claves de denominación que se usó para firmar las monedas; por ejemplo, mediante un calendario anual renovable, que mantiene limitado el tamaño de la base de datos. La cantidad de potencia de procesamiento adicional y ancho de banda necesarios aumenta en la misma cantidad por cada transacción, gasto o depósito adicional, porque las transacciones son esencialmente independientes una de la otra. Esta potencia adicional se logra simplemente añadiendo más hardware, comúnmente llamado partición o fragmentación. Con el llamado hash consistente, las adiciones de hardware no tienen por qué ser disruptivas. Se puede utilizar cualquier tecnología de base de datos subyacente.

Más concretamente, la lógica del front-end en el banco central solo tiene que realizar unas cuantas operaciones de firma, y un único procesador puede hacer miles de operaciones por segundo (véase Bernstein & Lange 2020). Si un solo sistema es insuficiente, es fácil desplegar servidores front-end adicionales y solicitar a los varios bancos comerciales que balanceen sus peticiones en la granja de servidores o que utilicen un balanceador de carga para distribuir las peticiones dentro de la infraestructura del banco central.

Los servidores front-end deben comunicarse con una base de datos para hacer transacciones y prevenir el doble gasto. Un solo servidor moderno para la base de datos debería ser suficiente para manejar de manera fiable decenas de miles de estas operaciones por segundo. Las operaciones se reparten fácilmente entre varios servidores de bases de datos simplemente asignando a cada servidor un rango de valores de los que es responsable. Este diseño asegura que las transacciones individuales nunca crucen fragmentos. Así, se espera que también los sistemas de back-end escalen linealmente con los recursos computacionales disponibles, de nuevo partiendo de una línea de base alta para un solo sistema.

Los front-end también deben comunicarse con los back-end mediante una interconexión. Las interconexiones pueden soportar grandes cantidades de transacciones por segundo. El tamaño de una transacción individual suele ser de 1-10 kilobytes aproximadamente. Así, las interconexiones de un centro de datos moderno, con velocidades de conmutación de 400 Gbit/s, pueden soportar millones de transacciones por segundo.

En fin, el costo total del sistema es bajo. Es probable que el almacenamiento seguro de 1 a 10 kilobytes por transacción durante muchos años sea el costo predominante del sistema. Utilizando los precios de Amazon Web Services, experimentamos con un prototipo anterior de GNU Taler y descubrimos que el costo del sistema (almacenamiento, ancho de banda y computación) a escala estaría por debajo de USD 0,0001 por transacción (para obtener detalles sobre los datos, consulte Dold (2019)).

5. Consideraciones normativas y políticas

En el esquema propuesto, los bancos centrales no conocen la identidad de los consumidores o comerciantes ni los montos totales de las transacciones. Los bancos centrales solo ven cuándo se lanzan las monedas electrónicas y cuándo se canjean. Los bancos comerciales siguen proporcionando autenticación crucial de clientes y comerciantes y, en particular, siguen siendo los guardianes de la información del KYC. Los bancos comerciales observan cuándo los comerciantes reciben fondos y pueden limitar la cantidad de CBDC por transacción que un comerciante individual puede recibir, si así se requiere.

Además, las transacciones están asociadas con los contratos pertinentes de los clientes. La transparencia de ingresos que se obtiene permite que el sistema cumpla con los requisitos del AML y CFT. Si se detectan patrones inusuales de ingresos comerciales, el banco comercial, las autoridades fiscales o las fuerzas del orden pueden obtener e inspeccionar los contratos comerciales subyacentes a los pagos para determinar si la actividad sospechosa es ilegal. La transparencia de los ingresos que se obtiene es también una fuerte medida contra la evasión fiscal porque los comerciantes no pueden declarar menos ingresos o evadir los impuestos sobre las ventas. En general, el sistema implementa privacidad por diseño y privacidad por omisión (como lo exige, por ejemplo, el Reglamento General de Protección de Datos de la Unión Europea). Los comerciantes no infieren inherentemente la identidad de sus clientes, los bancos solo tienen la información necesaria sobre las actividades de sus propios clientes y los bancos centrales están felizmente divorciados del conocimiento detallado de las actividades de los ciudadanos.

Por razones reglamentarias, en algunos países existen límites para los retiros y pagos en efectivo. Dichas restricciones también podrían implementarse para la CBDC en el diseño propuesto. Por ejemplo, se podría limitar la cantidad que los consumidores puedan retirar por día, o limitar la cantidad total de CBDC que los bancos comerciales puedan convertir.

Un problema potencial de estabilidad financiera que a menudo se plantea con las CBDC al por menor es la desintermediación del sector bancario. En particular, la venta de CBDC al por menor podría facilitar el acaparamiento de grandes cantidades de dinero del banco central. Esto podría afectar negativamente a la financiación de depósitos de los bancos porque el público tendría menos dinero en forma de depósitos bancarios. Para los países cuyas monedas sirven como monedas de refugio seguro, podría conducir a un aumento de las entradas de capital durante períodos de riesgo global, lo que resultaría en presiones adicionales en la apreciación del tipo de cambio.

Si bien esto podría representar una preocupación seria en el caso de una CBDC basada en cuentas, la preocupación sería menor con una CBDC basada en tokens. En primer lugar, acumular una CBDC basada en tokens conlleva riesgos de robo o pérdida similares a los de acumular efectivo. Tener unos cientos de dólares en un teléfono inteligente es probablemente un riesgo aceptable para muchos, pero tener una cantidad muy grande es probablemente un riesgo menos aceptable. Por tanto, no esperaríamos un acaparamiento significativamente mayor que en el caso del efectivo físico.

Sin embargo, si el acaparamiento o la conversión masiva a CBDC de dinero proveniente de depósitos bancarios se convirtieran en un problema, los bancos centrales tendrían varias opciones. Como se señaló, en el diseño propuesto los bancos centrales configuran una fecha de vencimiento para todas las claves de firma, lo que implica que en una fecha establecida las monedas firmadas con esas claves dejan de ser válidas. Cuando las claves de denominación caducan y los clientes tienen que cambiar monedas firmadas con claves de denominación antiguas por monedas nuevas, el regulador podría fácilmente imponer un límite de conversión por cliente para hacer cumplir un límite estricto a la cantidad de CBDC que cualquier individuo puede acumular. Además, los bancos centrales podrían cobrar una tarifa si fuera necesario. Una tarifa de actualización de este tipo, cuando las monedas están programadas para caducar, implicaría de hecho tasas de interés negativas en la CBDC, y haría que la CBDC resultara menos atractiva como depósito de valor, tal como sugiere Bindseil (2020). De hecho, sería la implementación directa de la idea de Silvio Gesell de aplicar un “impuesto de posesión” sobre la moneda, al que hace célebremente referencia Keynes (1936), y reviven Goodfriend (2000), Buitter & Panigirtzoglou (2003) y Agarwal & Kimball (2019).

En cuanto a las posibles implicaciones para las políticas monetarias, no anticipamos efectos materiales porque nuestra CBDC está diseñada para replicar el dinero en efectivo en lugar de los depósitos bancarios. La emisión, retiro y depósito de nuestra CBDC corresponden exactamente a la emisión, retiro y depósito de billetes. Es posible que una CBDC al por menor tenga un ritmo de circulación diferente a la del efectivo físico, pero esto no sería un problema material para las políticas monetarias.

6. Trabajos relacionados

Como se señaló anteriormente, la CBDC propuesta en el presente documento se basa en eCash y GNU Taler.¹⁸ A partir de la propuesta original de Chaum para el efectivo electrónico, la investigación se ha centrado en tres cuestiones principales. Primero, en la propuesta original de Chaum las monedas tenían un valor fijo y solo podían gastarse en su totalidad. Pagar grandes cantidades con monedas denominadas en centavos sería ineficiente, por lo que Okamoto (1995), Camenisch et al. (2005), Canard & Gouget (2007) y Dold (2019) idearon formas de abordar este problema. Estas soluciones involucran protocolos para dar cambio o para posibilitar la divisibilidad de las monedas.

Una segunda cuestión es que las transacciones a veces fallan debido a caídas de la red, por ejemplo. En este caso, el sistema debe permitir que los fondos permanezcan con el consumidor sin impacto negativo sobre privacidad. Camenisch et al. (2007) y Dold (2019) abordan este tema en su propuesta de dinero electrónico respaldado. Varias de las soluciones anteriores violan las garantías de privacidad para los clientes que utilizan estas funciones, y todas, excepto Taler, violan el requisito de transparencia de ingresos.

La tercera cuestión importante, a menudo desatendida, es conservar la transparencia de los ingresos y, por lo tanto, el cumplimiento del AML y KYC. Fuchsbauer et al. (2009) diseñaron deliberadamente un sistema que posibilita la desintermediación para proporcionar una semántica más similar al efectivo. Sin embargo, la desintermediación ilimitada generalmente no concuerda con las regulaciones del AML y KYC, ya que no permite lograr ningún nivel de responsabilidad. Un ejemplo de tal diseño es ZCash, un libro mayor distribuido que oculta a la red la información sobre el pagador, el beneficiario y el monto de la transacción, siendo por lo tanto el sistema de pago perfecto para la delincuencia en línea. Solo Taler ofrece tanto la privacidad constante del cliente como la trans-

¹⁸La implementación de eCash por la compañía DigiCash en los años noventa está documentada en <https://www.chaum.com/ecash>.

parencia de los ingresos, al mismo tiempo que proporciona un cambio eficiente, intercambios atómicos (consulte Camenisch et al. 2007) y la capacidad de restaurar billeteras desde una copia de seguridad.

Con respecto a los sistemas de pago para las CBDC, Danezis & Meiklejohn (2016) diseñaron un libro mayor escalable con RSCoin. Básicamente es un sistema RTGS que es protegido utilizando la misma criptografía que se usa en Bitcoin. Al igual que Taler, el diseño utiliza la fragmentación de la base de datos para lograr una escalabilidad lineal. Sin embargo, el diseño de Danezis & Meiklejohn (2016) no tiene ninguna disposición para la privacidad y carece de consideraciones sobre cómo integrar prácticamente el diseño con los sistemas y procesos bancarios existentes.

La EUROchain del Banco Central Europeo (véase European Central Bank 2019) es otro prototipo para CBDC con libro mayor distribuido. Similar a la arquitectura propuesta en el presente documento, la EUROchain utiliza una arquitectura de dos niveles donde los bancos comerciales actúan como intermediarios. Una diferencia crucial es la manera en que los sistemas intentan combinar la privacidad y el cumplimiento del AML. En nuestro diseño, los reguladores podrían imponer un límite a la cantidad de efectivo electrónico que el titular de una cuenta bancaria puede retirar durante un cierto tiempo, mientras que la EUROchain emite un número limitado de “vales de anonimato” que conceden al receptor un número limitado de transacciones sin verificación del AML. Como estos vales parecen no tener ninguna relación con ningún token de valor, no queda claro de qué manera el diseño evitaría la aparición de un mercado negro de “vales de anonimato”. Además, la noción de anonimato de la EUROchain es muy diferente, ya que sus “vales de anonimato” simplemente eliminan ciertas verificaciones del AML, al mismo tiempo que preservan la capacidad de los bancos comerciales de ver cómo los consumidores gastan el efectivo electrónico. Mientras que los pagadores usuarios de Taler interactúan directamente con los comerciantes para gastar su efectivo electrónico, el sistema EUROchain requiere que los pagadores instruyan a sus bancos comerciales para que accedan a su CBDC. Por lo tanto, la EUROchain no emite tokens de valor directamente a los consumidores y, en cambio, depende de que los consumidores se autenticquen ellos mismos en sus bancos comerciales para acceder a la CBDC que el banco central mantiene efectivamente en custodia. Por lo tanto, no está claro qué ventajas de privacidad, rendimiento o seguridad tiene la EUROchain sobre el dinero existente en depósito.

7. Conclusión

Con la aparición de Bitcoin y monedas digitales recientemente propuestas por grandes empresas tecnológicas como Diem (antes Libra), los bancos centrales se enfrentan a una competencia cada vez mayor de actores que ofrecen su propia alternativa digital al efectivo físico. Las decisiones de los bancos centrales sobre la emisión o no de una CBDC dependen de cómo evalúen los beneficios y los riesgos de una CBDC. Estos beneficios y riesgos, así como las circunstancias jurisdiccionales específicas que definen el alcance de las CBDC al por menor, probablemente difieran de un país a otro.

Si un banco central decide emitir una CBDC al por menor, proponemos una CBDC basada en tokens que combina la privacidad de las transacciones con el cumplimiento del KYC, AML y CFT. Dicha CBDC no competiría con los depósitos de los bancos comerciales, sino que reproduciría el efectivo físico, lo que limitaría los riesgos de estabilidad financiera y políticas monetarias.

Hemos demostrado que el esquema propuesto aquí sería tan eficiente y rentable como los sistemas RTGS modernos operados por los bancos centrales. Los pagos electrónicos con nuestra CBDC solo necesitarían una simple base de datos para las transacciones y cantidades minúsculas de ancho de banda. La eficiencia y la rentabilidad, junto con la facilidad de uso mejorada para el consumidor provocada por el cambio de la autenticación a la autorización, hacen que este esquema sea probablemente el primero en respaldar el objetivo largamente previsto de los micropagos en línea. Además, el uso de monedas para firmar criptográficamente contratos electrónicos permitiría el uso de contratos inteligentes. Esto también podría conducir a la aparición de aplicaciones completamente nuevas para los sistemas de pago. Aunque nuestro sistema no se basa en la DLT, podría integrarse fácilmente con dichas tecnologías si así lo requirieran las infraestructuras del mercado financiero en el futuro.

Igualmente importante, sin embargo, es que una CBDC al por menor debe preservar el efectivo como un bien común respetuoso de la privacidad bajo el control individual de los ciudadanos. Esto se puede lograr con el esquema propuesto en este documento, y los bancos centrales pueden evitar perturbaciones significativas en sus políticas monetarias y estabilidad financiera cosechando al mismo tiempo los beneficios de la digitalización.

Referencias

- Adrian, T. & Mancini-Griffoli, T. (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>, accessed 17 March 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. by 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).
- Fuchsbauer, 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), 'Currencies, money and digital tokens', https://www.snb.ch/en/mmr/speeches/id/ref_20190905_tjn/source/ref_20190905_tjn.en.pdf. Speech given at the 30th anniversary of the WWZ and VBÖ.
- Kahn, C. M., McAndrews, J. & Roberds, W. (2005), 'Money is privacy', *International Economic Review* 46(2), 377–399.
- 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, T., 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’.
URL: <https://voxeu.org/article/digital-money-and-central-bank-digital-currency-executive-summary>
- Okamoto, T. (1995), An efficient divisible electronic cash scheme, in E. by Don Coppersmith, ed., ‘Advances in Cryptology — CRYPTO’95: 15th Annual International Cryptology Conference Santa Barbara, California, USA, August 27–31, 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. Dobbs’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.