

Enrique Martín Quilis*

MONEDAS DIGITALES EMITIDAS POR LOS BANCOS CENTRALES Y CRIPTOMONEDAS. UN ANÁLISIS DE TEORÍA DE LOS JUEGOS

Se examina la interacción entre las monedas digitales emitidas por el banco central y las criptomonedas, utilizando un modelo de teoría de los juegos que permite delimitar los diversos equilibrios en función de la probabilidad de éxito regulatorio. Se examina también el papel condicionante de los intermediarios financieros. El análisis sugiere una multiplicidad de equilibrios, cuya realización concreta depende de la capacidad regulatoria y de la interacción entre el banco central y los intermediarios financieros. Asimismo, los problemas de información a los que se enfrenta el banco central pueden generar asimetrías y situaciones inestables de difícil solución.

Central bank digital currencies and cryptocurrencies. A game theory analysis

The interaction between central bank digital currencies and cryptocurrencies is examined, using a game-theoretic model that allows the various equilibria to be delineated in terms of the probability of regulatory success. The conditioning role of financial intermediaries is also examined. The analysis suggests a multiplicity of equilibria, the concrete realization of which depends on the regulatory capacity and the interaction between the central bank and financial intermediaries. Furthermore, the information problems faced by the central bank can generate asymmetries and unstable situations that are difficult to resolve.

Palabras clave: dinero digital, medios de pago, mercados financieros, intermediarios financieros, regulación financiera, política fiscal y monetaria.

Keywords: digital money, means of payment, financial markets, financial intermediaries, financial regulation, fiscal and monetary policy.

JEL: C72, E42, E51, E52, E58.

* Servicio de Estudios Tributarios y Estadísticas de la Agencia Tributaria.

Contacto: enrique.martinq@correo.aeat.es

Agradezco las conversaciones mantenidas con A. Abad, M. Collado, R. Frutos, E. Gordo, C. Herrero, L. Navarro e I. M. Quilis. Las sugerencias y comentarios de un evaluador anónimo han contribuido notablemente a mejorar el texto. Las opiniones presentadas corresponden al autor, sin que coincidan de forma necesaria con las de la Agencia Tributaria.

Versión de diciembre de 2022.

<https://doi.org/10.32796/ice.2023.930.7574>

1. Introducción

Numerosos bancos centrales de las principales economías están considerando la emisión de monedas digitales (ECB, 2020; BoE, 2021; BIS, 2020; Federal Reserve, 2022; Soderberg *et al.*, 2022)¹. Estas monedas serían un pasivo del Banco Central (BC) que cumpliría todas las funciones clásicas del dinero (unidad de cuenta, medio de pago y depósito de valor), serían de naturaleza electrónica², de acceso universal³ y se añadirían al efectivo físico y a los depósitos electrónicos de los Intermediarios Financieros (IF) en el BC⁴ (Bordo y Levin, 2017; Bech y Garratt, 2017; Gouveia *et al.*, 2017; Bjerg, 2017; Mancini-Griffoli *et al.*, 2018; Wadsworth, 2018; Kumhof y Noone, 2018; Auer y Böhme, 2020; Auer *et al.*, 2020; Fernández-Villaverde *et al.*, 2020). La introducción de las MDBC tendría importantes efectos económicos, regulatorios, sociales y tecnológicos (Bhaskar *et al.*, 2022; Elsayed y Nasir, 2022). A continuación, se relacionan los más relevantes.

Desde el punto de vista de la política monetaria, las MDBC permitirían la aplicación a gran escala de tipos de interés negativos, salvando las limitaciones que plantea el límite inferior de los tipos de interés, debido al dominio del efectivo cuando se alcanza dicho límite (Eggertsson y Woodford, 2003; Buitier, 2009; Agarwal y Kimball, 2015; Kimball, 2015; Assenmacher y Krogstrup, 2018; IMF, 2017; Goodfriend, 2000). Desde la crisis de 2007-2008 esta limitación ha estado presente de forma prácticamente continua en la mayoría de las economías occidentales hasta fechas muy recientes.

La política fiscal se vería reforzada, posibilitando la introducción de estímulos directos a empresas y familias. Estos estímulos podrían adoptar una gran variedad

de formas: condicionales o incondicionales, con validez temporal o permanente, con valor nominal constante o variable, transferencias o préstamos, etc. Las posibilidades de realizar una adaptación a las características del receptor y a los usos de la ayuda abren un abanico de opciones realmente amplio (Barrdear y Kumhof, 2016).

La estabilidad del sistema financiero también se vería fortalecida, al carecer las cuentas directas de particulares en el BC de riesgo de contraparte, reduciendo la relevancia de los sistemas de garantía de depósitos y la probabilidad de pánicos bancarios. Esta mayor estabilidad podría verse compensada, total o parcialmente, por una mayor vulnerabilidad sistémica de los IF, debido a la contracción de sus balances como consecuencia del trasvase de depósitos desde estos al BC.

Socialmente, las MDBC podrían tener un carácter inclusivo, al permitir el acceso a los servicios financieros a colectivos que, bien por su nivel de renta o por su localización geográfica⁵, se encuentran en la actualidad fuera del sistema bancario (Sahm *et al.*, 2012; Sahm, 2019). En esta misma línea, la MDBC sería un soporte ideal para un sistema de renta básica universal.

Desde un punto de vista más general, la información generada por el sistema de MDBC permitiría una monitorización y supervisión de las condiciones económicas rápida y detallada, posibilitando la implementación de reglas de actuación en tiempo real (The Economist, 2021).

Naturalmente, un sistema de MDBC conlleva importantes consideraciones relativas a la privacidad y a la seguridad de las operaciones (Scorer, 2017; Forgac, 2020). Estos dos aspectos son muy importantes, ya que podrían afectar notablemente a la confianza y legitimidad de las MDBC por parte de los ciudadanos⁶.

Desde un punto de vista tecnológico, los BC consideran que el uso creciente de medios de pago digitales,

¹ Moneda Digital emitida por el Banco Central, MDBC en adelante.

² Esto es, anotaciones en sistemas de almacenamiento de información residentes en ordenadores, careciendo, por tanto, de una entidad física propia como la que tienen las monedas y billetes en circulación.

³ También se consideran esquemas de MDBC de tipo mayorista, cuyo acceso estaría restringido a un conjunto predeterminado de IF.

⁴ Reservas efectuadas por los IF en el BC y que sirven para la liquidación interbancaria, entre otras funciones.

⁵ Como es el caso de dos países que ya han emitido oficialmente MDBC o están a punto de hacerlo: Bahamas y la República de las Islas Marshall, ambos archipiélagos bastante dispersos.

⁶ Esta desconfianza ha dado lugar ya a iniciativas legislativas orientadas a evitar la emisión de MDBC (Roberts, 2022).

junto con la reducción del uso del efectivo⁷, son un argumento para extender el rango de opciones para los consumidores, reforzando de esta forma los aspectos inclusivos, financieramente estabilizadores y de mayor eficacia de la política económica antes citados.

Adicionalmente, la propia competencia entre países a la hora de emitir MDBC está siendo un poderoso acicate de este desarrollo. Previsiblemente, los primeros países en adoptar con éxito una MDBC gozarán de ventajas respecto a su uso como moneda de reserva internacional, dadas las características de escalabilidad, eficiencia e integridad que este éxito ha de llevar necesariamente aparejado.

En este sentido, destaca China, único país de gran tamaño que ya ha realizado ensayos reales a gran escala de una MDBC (Hoffman *et al.*, 2020). Este desarrollo obedece a un doble objetivo: contener la influencia de los IF privados domésticos que concentran la gestión del sistema de medios de pago y, por otro, impulsar un cambio en el sistema internacional de pagos, sistema en el que los Estados Unidos tienen un papel principal, debido a la preponderancia del dólar como moneda de reserva y pagos a nivel internacional (Carney, 2019; The Economist, 2020a,b). Naturalmente, estos desarrollos están influyendo en el interés de los BC de otros países por desarrollar de forma preventiva sus propias MDBC.

Por último, la digitalización creciente de los medios de pago y el desarrollo de las criptomonedas⁸ puede considerarse la fuerza esencial del creciente interés de los

BC en las MDBC. En particular, el anuncio efectuado en 2019 por parte de un consorcio liderado por Facebook⁹ de emitir una moneda digital¹⁰ llamada «Libra», ha sido el impulso más acuciante de dicho interés, dada la combinación de una amplia base de usuarios (más de 2.000 millones en 2019) y de empresas multinacionales de medios de pago (Mastercard, PayPal, PayU, Stripe y Visa).

Esta combinación podría haber acertado de forma notable las fases de penetración y adopción masiva de Libra, dando como resultado una moneda digital de amplio uso, emitida de forma privada y centralizada, combinando la naturaleza digital de las criptomonedas (pero no su naturaleza generalmente descentralizada) con la naturaleza *fiat* de las monedas oficiales sobre las que se asienta (pero no la rendición de cuentas a la que están sujetos los BC). De esta manera, hubiera aparecido una criatura híbrida de difícil control y supervisión, con características disruptivas del sistema internacional de pagos y afectando de manera directa a la capacidad de actuación de la política monetaria¹¹.

Todos estos desarrollos suscitan varias preguntas. ¿Cómo será la interacción entre las MDBC y las criptomonedas? ¿Predominará una de ellas o, por el contrario, coexistirán? ¿Será esta coexistencia apacible o tormentosa? ¿Compartirán un mismo espacio en el ecosistema monetario-financiero o cada una habitará en un nicho propio? ¿Qué otros elementos condicionarán esta interacción? En este trabajo se presenta

⁷ Proceso de ámbito mundial, siendo ejemplos destacados Kenya (McGath, 2018), China (Klein, 2019; Kennedy *et al.*, 2020) y Suecia (Arvidsson *et al.*, 2017).

⁸ La introducción de Bitcoin (Nakamoto, 2008) se considera el punto de partida de las criptomonedas, aunque ya se habían planteado esquemas similares con anterioridad (Chaum, 1983, 1985). Desde entonces se ha producido un proceso de desarrollo casi exponencial en el ámbito de las criptomonedas, tanto desde el punto de vista de su capitalización como de su número y variedad, si bien de una forma extremadamente volátil. Los desarrollos tecnológicos han estado orientados a la obtención de velocidades de procesamiento cada vez mayores, a la generación de entornos programables y, por lo general, al mantenimiento del enfoque descentralizado y anónimo, aunque trazable, de Bitcoin. Un análisis pormenorizado se encuentra en Antonopoulos (2017), Berentsen y Schär (2018), Goldman Sachs (2021) y Lipton y Treccani (2021).

⁹ El proyecto estuvo plagado de problemas, desde disputas sobre su propiedad intelectual (Cavalli, 2019) hasta el testimonio de Zuckerberg en el Congreso de los EE UU (Rev, 2019), un año después de que tuviera que declarar sobre el uso de datos en poder de Facebook en las elecciones presidenciales de 2016 (Domonoske, 2018). Como resultado de estas investigaciones y de la presión regulatoria, Facebook retiró el proyecto.

¹⁰ Técnicamente, una «moneda estable» (*stablecoin*): una combinación de activos denominados en diversas monedas *fiat* (dólar, euro, libra esterlina, yen, etc.) y detentada por Facebook como respaldo en proporción 1:1 de la emisión de Libra (Lipton *et al.*, 2018, 2020; Taskinsoy, 2019; Viswanath-Natraj y Eichengreen, 2020).

¹¹ En este sentido, dada la naturaleza digital de Libra, la posibilidad de sobrepasar la paridad respecto a las monedas *fiat*, que son su ancla, añade un elemento adicional de inestabilidad.

un análisis de estas cuestiones utilizando la teoría de los juegos, ya que permite un estudio pormenorizado y microfundamentado de esta interacción, al hacer explícitas las estrategias y preferencias de los agentes económicos que la determinan.

El análisis realizado en este artículo está centrado en la determinación del equilibrio de Nash, refinado con el concepto de perfección en subjuegos cuando es de información incompleta (Bonanno, 2018) y con el de Equilibrio No Miope (ENM) de la teoría de movimientos cuando el juego es de información completa (Brams, 1994).

Los ENM se determinan mediante la teoría de movimientos (Brams, 1994), que permite analizar la solución del juego en un contexto dinámico afín al de un juego repetido. Esta metodología es una rama de la teoría de juegos que analiza el desarrollo secuencial de un juego (forma extensiva), comenzando su dinámica a partir de cada uno de los posibles resultados del juego (forma normal). De esta manera, la teoría de movimientos proporciona un algoritmo para determinar ENM o de largo plazo: una situación en la cual los jugadores racionales se moverán (o permanecerán), anticipando todas las acciones y reacciones llevadas a cabo de forma racional (optimizadora) por parte de los mismos a partir de un estado inicial.

La teoría de los juegos ha sido utilizada para analizar diversos aspectos de las criptomonedas y de las MDBC. Así, Caginalp y Caginalp (2019) examinan el uso de las criptomonedas en un contexto en el que la autoridad monetaria puede efectuar confiscaciones de la moneda *fiat* que emite. Mou *et al.* (2021) exploran la emisión de MDBC por parte de los BC de países distintos. Este análisis es ampliado por Wang y Hausken (2022) y Cong y Mayer (2022) al considerar también las correspondientes monedas *fiat*, las criptomonedas y medidas de fortaleza macroeconómica (inflación y espacio fiscal). El modelo central que aquí se presenta utiliza también el concepto de equilibrio de Nash, pero en un contexto secuencial en vez de simultáneo y con información incompleta, con el fin de resaltar el papel

asimétrico del BC y de los consumidores, así como las dificultades a las que ambos se enfrentan en un contexto sin antecedentes históricos que permitan la estimación de los parámetros relevantes. Asimismo, se introduce de una manera explícita a los IF con el fin de resaltar su papel decisivo en la selección del equilibrio final del modelo.

El texto se organiza de la siguiente forma. En el apartado 2 se plantea un juego de tipo secuencial con información imperfecta entre un BC y su correspondiente sector privado doméstico. Se presenta una solución general que sirve para delimitar los distintos regímenes del modelo. La interacción entre el BC y los IF es examinada en el apartado 3. Esta interacción, cuyo desarrollo es paralelo al del juego central, puede afectar a la multiplicidad de equilibrios del juego básico. Esta relación se explora en el apartado 4, dedicada a problemas informativos. El apartado 5 profundiza en los aspectos tecnológicos y regulatorios de las MDBC. El texto termina con un apartado de conclusiones, centradas en las implicaciones para la política económica y regulatoria.

2. Interacción entre el banco central y el mercado

En este apartado se expone un modelo, basado en la teoría de los juegos, para analizar la interacción entre las criptomonedas y las MDBC. Se consideran dos agentes: el BC¹² y el «mercado», que representa al sector privado de la economía en su conjunto. El modelo es de tipo secuencial y con información completa pero imperfecta, con el fin de reflejar dos rasgos importantes de esta interacción. Por una parte, el papel asimétrico de los jugadores, actuando el BC como líder y el mercado como seguidor y, por otra, el papel decisivo de la incertidumbre existente sobre el éxito de las medidas regulatorias y, en el límite, prohibitivas.

¹² Para los fines de este trabajo, el BC desarrolla también funciones legales, regulatorias y de supervisión como las que realizan en España la Comisión Nacional del Mercado de Valores (CNMV), la D.G. de Tributos y la D.G. del Tesoro y Política Financiera.

Las acciones disponibles para el BC son dos: emitir o no MDBC¹³ y prohibir o permitir el uso de criptomonedas por parte del mercado¹⁴. Por su parte, el mercado puede adoptar las criptomonedas solo como depósito de valor («oro digital») o, adicionalmente, como medio de pago.

Para completar la representación, se asume un jugador ficticio (la Naturaleza) que determina, probabilísticamente, el éxito o el fracaso de la prohibición de las criptomonedas por parte del BC. Esta probabilidad está condicionada a la emisión previa de MDBC por parte del BC.

Los jugadores actúan de forma secuencial en un marco con información completa pero imperfecta, debido a la acción de la Naturaleza. Las probabilidades que determinan el comportamiento de la Naturaleza se consideran exógenas. En el subapartado siguiente se examinan algunos factores que pueden afectar a estas probabilidades.

Estructura secuencial

El juego completo consta de cuatro movimientos cuya secuencia es la siguiente:

- 1) El BC decide si emite o no MDBC.
- 2) El mercado decide cómo utilizar las criptomonedas: activo digital o activo y medio de pago.
- 3) Si el mercado opta por considerar a las criptomonedas como medio de pago y depósito de valor, el BC decide si prohibirlas o no.
- 4) Si la prohibición se lleva a término, la Naturaleza determina, probabilísticamente, el éxito de dicha prohibición.

La Figura 1 presenta la secuencia del juego. Esta secuencia da lugar a ocho posibles resultados que pueden ser agrupados de la siguiente forma:

- Criptomonedas como activo digital (en color amarillo en la Figura 1): el mercado las utiliza como depósito de valor, tanto si el BC emite MDBC como si no lo hace¹⁵.

- Coexistencia de las criptomonedas con la moneda *fiat* oficial: ambas son utilizadas como depósito de valor y como medio de pago, dando lugar a una suerte de patrón bimetálico. Esta coexistencia puede adoptar cuatro formas diferentes, atendiendo a la presencia o no de MDBC y a si el BC ha planteado o no una prohibición de las criptomonedas. De esta manera, la coexistencia podrá ser «pacífica» (en color naranja) o «conflictiva» (en color naranja y enmarcada en rojo).

- Desaparición de las criptomonedas (en color azul): como consecuencia de la adopción por parte del mercado de las criptomonedas como depósito de valor y medio de pago, el BC decide prohibirlas y tiene éxito al implementar dicha prohibición.

El éxito de la prohibición depende de forma crítica del comportamiento de la Naturaleza, que es una forma analíticamente conveniente de encapsular un amplio conjunto de factores de tipo legal, regulatorio y tecnológico cuya estimación es complicada e incierta. Además, la probabilidad de éxito de la prohibición está condicionada por la emisión previa de MDBC por el BC.

Preferencias del Banco Central

Las preferencias del BC se articulan en torno a tres ejes: emitir MDBC es preferible a no hacerlo, que el mercado considere las criptomonedas como «oro digital» y que la prohibición, si se lleva a término, sea exitosa. El factor reputacional asociado a una prohibición fallida¹⁶ es especialmente importante, haciendo que las situaciones de conflicto sean las peor valoradas. La Tabla 1 detalla estas preferencias.

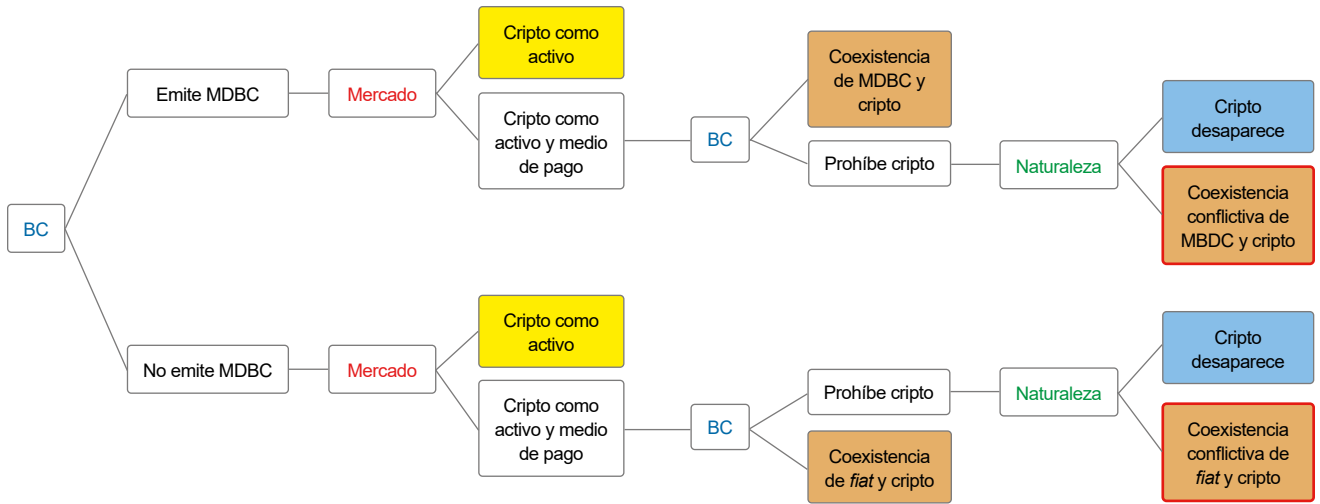
¹³ En este trabajo se asume que la MDBC es de tipo universal, minorista y que puede estar remunerada, tanto de forma positiva como negativa.

¹⁴ Con el fin de simplificar la exposición, se considera solo el caso límite definido por una prohibición. La argumentación es la misma para un marco regulatorio menos extremo y, previsiblemente, complejo y lleno de matices. El apartado 5 elabora con más detalle estos aspectos.

¹⁵ Situación similar a la actual, en la que coexisten sin fricciones la moneda oficial *fiat* con las criptomonedas, consideradas principalmente como activo (posiblemente especulativo) y sin que medie prohibición alguna de estas últimas.

¹⁶ Situación que lleva asociada una coexistencia conflictiva de la moneda oficial con las criptomonedas.

FIGURA 1
ESTRUCTURA SECUENCIAL DEL JUEGO



NOTA: Para abreviar la notación, *fiat* hace referencia a la moneda oficial en formato no digital, sin menoscabo de que la MBDC también es fiduciaria.
FUENTE: Elaboración propia.

Preferencias del mercado

Por su parte, los inversores prefieren un papel limitado del BC, tanto en lo que concierne a la emisión de la MDBC como a la prohibición de las criptomonedas, así como un uso lo más amplio posible de estas últimas. La Tabla 2 detalla la ordenación de estas preferencias.

Solución del juego

El juego se resuelve mediante inducción retrospectiva, para lo que se procede de la siguiente forma (Bonanno, 2018):

- En primer lugar, el BC (que es el último jugador en mover) decide si prohibir o no las criptomonedas, tomando como dato las probabilidades de éxito de dicha prohibición.
- Dada la decisión del BC, el mercado considera a las criptomonedas solo como depósito de valor (oro

digital) o también como medio de pago, aproximándose a la función de las monedas *fiat* de curso legal¹⁷.

- Finalmente, en función de la decisión del mercado, el BC decide si emitir o no MDBC.

Dependiendo de las probabilidades de éxito, condicionadas a su vez a la emisión o no de MDBC, se plantean tres tipos de equilibrio: «oro digital», «coexistencia» y «dominio de las criptomonedas». Su delimitación depende de los umbrales para dichas probabilidades a partir de los cuales el BC decide prohibir las criptomonedas. Asumiendo una valoración cardinal de sus preferencias, estos umbrales se pueden estimar en 0,14 si ha habido emisión de MDBC y 0,33 si no la ha habido. La Figura 2 delimita los tres tipos de equilibrio.

Dada su estructura de preferencias, el BC se sentirá impulsado a prohibir las criptomonedas incluso con probabilidades de éxito relativamente bajas. Si el BC

¹⁷ Sobre el oro como activo, en general, y su relación con las criptomonedas, véase Buiter (2014), Middelkoop (2016) y Davies (2020).

TABLA 1
PREFERENCIAS DEL BC

Prohibición de las criptomonedas				
Orden	Emisión de MDBC	Aplicación	Éxito	Estado final
8	Sí	Sí	Sí	MDBC dominante
7	Sí	No	-	MDBC + oro digital
6	No	Sí	Sí	<i>Fiat</i> no digital dominante
5	No	No	-	<i>Fiat</i> no digital + oro digital
4	No	No	-	Coexistencia pacífica de <i>fiat</i> no digital y cripto
3	Sí	No	-	Coexistencia pacífica de MDBC y cripto
2	No	Sí	No	Coexistencia conflictiva de <i>fiat</i> no digital y cripto
1	Sí	Sí	No	Coexistencia conflictiva de MDBC y cripto

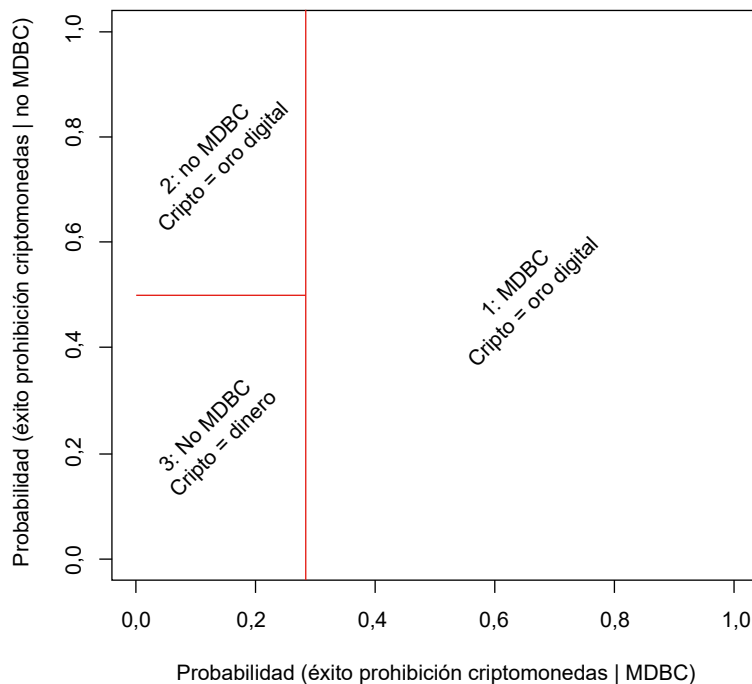
FUENTE: Elaboración propia.

TABLA 2
PREFERENCIAS DEL MERCADO

Prohibición de las criptomonedas				
Orden	Emisión de MDBC	Aplicación	Éxito	Estado final
8	No	No	-	Coexistencia pacífica de <i>fiat</i> no digital y cripto
7	No	No	-	<i>Fiat</i> no digital + oro digital
6	Sí	No	-	Coexistencia pacífica de MDBC y cripto
5	Sí	No	-	MDBC + oro digital
4	No	Sí	No	Coexistencia conflictiva de <i>fiat</i> no digital y cripto
3	Sí	Sí	No	Coexistencia conflictiva de MDBC y cripto
2	No	Sí	Sí	<i>Fiat</i> no digital dominante
1	Sí	Sí	Sí	MDBC dominante

FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA 2
EQUILIBRIOS DEL MODELO



FUENTE: Elaboración propia.

decide prohibir las criptomonedas, el mercado las adoptará solo como depósito de valor, independientemente de si se han emitido o no MDBC. Finalmente, si el mercado adopta las criptomonedas como depósito de valor, el BC optará por emitir MDBC. Esta es la región más amplia de la Figura 2.

La segunda región más amplia es aquella en la que las probabilidades de éxito de la prohibición son asimétricas: baja si se ha emitido MDBC y alta en caso contrario. En este equilibrio el BC optará por no emitir MDBC y el mercado utilizará las criptomonedas solo como depósito de valor.

El último régimen se caracteriza por ser bajas ambas probabilidades de éxito de la prohibición. En este régimen el BC no emitirá MDBC y las criptomonedas terminarán operando como monedas, dando lugar a un

régimen afín a un patrón bimetálico, coexistiendo una moneda *fiat* convencional (no MDBC) y las criptomonedas. Esta es la región más pequeña, próxima a la esquina inferior izquierda de la Figura 2.

Naturalmente, en la realidad es muy difícil estimar estas probabilidades, dada la limitada experiencia existente tanto sobre las MDBC como sobre las propias criptomonedas, cuyas características están en continua evolución. A continuación, se analizan algunos factores que pueden incidir sobre estas probabilidades.

3. Interacción entre el banco central y los intermediarios financieros

En muchos países el sistema de pagos es del tipo «depósito por anticipado»: los saldos disponibles en las

cuentas corrientes de los agentes actúan como medio de pago, instrumentados mediante transferencias, órdenes de cobro/pago, cheques y extracciones de efectivo. Por esta razón, los IF son el núcleo del sistema de pagos y tienen un papel crítico en su digitalización (Ryan-Collins *et al.*, 2012; McLeay *et al.*, 2014; Ali *et al.*, 2014).

La introducción de una MDBC modificaría radicalmente este sistema, al ofrecer a los agentes la posibilidad de mantener cuentas corrientes sin riesgo de contrapartida. Este desplazamiento podría reducir de forma notable el tamaño del balance de los IF, haciendo que su volumen de operaciones y beneficios se contrajera.

Estos desplazamientos tendrían una naturaleza marcadamente procíclica, lo que obligaría a los IF a mantener reservas adicionales, con el consiguiente impacto negativo sobre su rentabilidad. Por otra parte, desde el punto de vista de los precios, los IF deberían mantener un diferencial de tipos respecto a las MDBC que reduciría, *ceteris paribus*, su margen de intermediación. Por todo ello y con el fin de reducir estos impactos adversos, los IF podrían ofrecer productos y servicios denominados en criptomonedas¹⁸, con el fin de ampliar su captación de recursos, dando lugar a dos acciones posibles: adoptar o no adoptar las criptomonedas.

En este juego, el BC posee una estrategia dominante: emitir MDBC, debido a la presión de emisores privados centralizados (p. ej., Facebook), de BC extranjeros (p. ej., China) y de sus ventajas operativas para la política monetaria (p. ej., elusión del límite inferior de tipos de interés). Además, si se considera que las probabilidades de éxito de la prohibición se distribuyen uniformemente, la emisión de MDBC forma parte del régimen de equilibrio más probable¹⁹. Finalmente, a igualdad de condiciones, el BC prefiere que los IF no ofrezcan productos y servicios en criptomonedas.

¹⁸ Además de los que ya vienen ofreciendo en las monedas *fiat* oficiales.

¹⁹ Cuando la incertidumbre es muy elevada, los agentes pueden terminar estimando las probabilidades de forma uniforme, al menos en torno a una región amplia alrededor de su valor mediano.

Los IF, por el contrario, no disponen de una estrategia dominante, dependiendo su reacción de la decisión del BC: si no emite MDBC, se mantienen fuera del sistema de criptomonedas, siendo su opción preferida. Por el contrario, si el BC emite MDBC, los IF prefieren ofrecer también productos denominados en criptomonedas. Su posición menos preferida es aquella en la que el BC emite MDBC y ellos no adoptan las criptomonedas. Por último, la situación en la que el BC no emite MDBC, pero ellos sí adoptan las criptomonedas es la segunda menos preferida.

La Figura 3 muestra el juego en forma estratégica, así como su solución de corto plazo (equilibrio de Nash) y de largo plazo (Equilibrio No Miope, ENM).

La solución de este modelo es especialmente robusta: tanto el equilibrio de Nash como el ENM se encuentran en el estado en el que el BC emite MDBC y los IF ofrecen servicios ligados a las criptomonedas. Adicionalmente, el juego de anticipación también sostiene este resultado y su naturaleza cooperativa no ofrece incentivos para negociar un acuerdo alternativo mutuamente ventajoso²⁰.

4. Información imperfecta: problemas de percepción por parte del banco central

La probabilidad de éxito de la prohibición de las criptomonedas por parte del BC está condicionada a la emisión previa de MDBC, lo que da lugar a las dos variables críticas que delimitan los regímenes del modelo. Estas probabilidades no son directamente observables y han de ser estimadas de forma claramente imperfecta, habida cuenta de la limitada experiencia con este tipo de regulación²¹.

²⁰ Nótese que ambos jugadores están a un paso de su posición más preferida.

²¹ India proporciona una experiencia muy relevante para las economías desarrolladas, por ser un país democrático. Tras imponer severas limitaciones al uso de las criptomonedas de forma casi consecutiva (2020 y 2021), posteriormente dejó de aplicarlas. Adicionalmente, en ambas ocasiones no quedó claro si la motivación era regulatoria o tributaria (Rodrigues *et al.*, 2022). El tema sigue siendo objeto de debate público y no está cerrado, incluyendo su influencia en la aceleración del proyecto de MDBC (eRupia) de su BC.

FIGURA 3
INTERACCIÓN ENTRE EL BC Y LOS INTERMEDIARIOS FINANCIEROS

BC →		
Intermediarios financieros	Emite MDBC	No emite MDBC
Adopta cripto	<u>(3 3)</u> <u>[3 3]</u>	(2 1) [3 3]
No adopta cripto	(1 4) [3 3]	Statu Quo (4 2) [3 3]

NOTAS: (x, y) = (pago de los IF, pago del Banco Central) en el juego original. [x, y] = [pago de los IF, pago del Banco Central] en el juego anticipatorio*. 4 = Mejor; 3 = Siguiete mejor; 2 = Siguiete peor; y 1 = Peor. Los equilibrios de Nash del juego original y del anticipatorio están subrayados y en negrita. Los Equilibrios No Miopes (ENM) están resaltados en gris. Los estados cooperativos ([4,4], [4,3], [3,4] o [3,3]) están marcados en color verde.

* El juego anticipatorio (*preplay game*) de un juego dado está descrito por una matriz de pagos cuyas entradas, definidas entre corchetes [x, y], son los equilibrios no miopes (ENM) del juego original que arranca en ese resultado.

FUENTE: Elaboración propia.

Esta dificultad en la estimación abre la puerta a una posible percepción errónea de dichas probabilidades por parte del BC, dando lugar a una secuencia de acciones y reacciones que llevaría a los agentes fuera de una posición de equilibrio.

Se consideran tres estados: subyacente (basado en las probabilidades reales), percibido (basado en las probabilidades estimadas de forma errónea) y final (basado en las decisiones tomadas en el estado percibido pero aplicadas al subyacente). Si las probabilidades son estimadas sin error, el estado subyacente coincide con el percibido, haciendo que el estado final coincida con la solución del juego examinada en el apartado 2.

Estado subyacente

La interacción entre el BC y los IF analizada en el apartado 3 sugiere:

[1]

Probabilidad (éxito de la prohibición | no MDBC) → 1

Probabilidad (éxito de la prohibición | MDBC) → 0

Esta asimetría es el resultado de la estrategia contingente de los IF respecto a la emisión del MDBC por parte del BC. En este estado, al no mediar una percepción incorrecta de las probabilidades, el BC

optaría por no emitir MDBC y el mercado adoptaría las criptomonedas como depósito de valor. La economía se encontraría en el régimen 2, afín al existente en la actualidad.

Estado percibido

Por otra parte, como ya se ha señalado, la interacción con un BC extranjero más implicado en el desarrollo de su MDBC (p. ej., China), las posibilidades teóricas de intervención que brinda la MDBC y el éxito regulatorio obtenido frente a emisores digitales privados y centralizados (p. ej., Facebook y su proyecto de moneda digital Libra), puede hacer que el BC adopte una percepción optimista de estas probabilidades:

[2]

Probabilidad (éxito de la prohibición | no MDBC) → 1

Probabilidad (éxito de la prohibición | MDBC) → 1

En este caso, el BC optaría por emitir MDBC, creyendo que el mercado adoptaría a las criptomonedas como depósito de valor. La economía se encontraría en el régimen 1, con una clara división de funciones entre MDBC y criptomonedas.

Estado final

El BC emitiría MDBC pero, siendo un proceso irreversible y dado que la probabilidad real de éxito es próxima a cero como consecuencia de la acción de los IF, el mercado terminaría adoptando de forma amplia a las criptomonedas, tanto como depósito de valor como medio de pago.

El BC, dada su estimación optimista de la probabilidad de éxito, se inclinaría a prohibir las criptomonedas, dando lugar a una coexistencia conflictiva entre estas y la MDBC.

Ambos jugadores se encuentran claramente peor que si la percepción del BC hubiera sido menos optimista: [3, 1] frente a [7, 5], ([pago del mercado, pago

del BC]), destacando que el BC se encuentra en su posición menos preferida.

Esta situación no es un equilibrio del juego sin problemas de percepción, por lo que el BC ha de asumir una pérdida global de bienestar: si no hubiera emitido MDBC en primer lugar, todos los jugadores se habrían encontrado mejor y en equilibrio (en el régimen 2). En este sentido, la MDBC es «una solución a la búsqueda de un problema» (Waller, 2021).

Naturalmente, a medida que el proceso de aprendizaje hace converger las probabilidades estimadas a las subyacentes, el BC dejará de prohibir las criptomonedas, llegándose a una situación de coexistencia pacífica entre ambas monedas, resultando en una mejora para ambos jugadores: [6, 4] frente a [3, 1], ([pago del mercado, pago del BC]).

Alternativamente, el BC puede tener una percepción errónea de las probabilidades en el sentido opuesto: subestimando la probabilidad de éxito de la prohibición de las criptomonedas. Esta subestimación puede reflejar un problema informativo o una actitud deliberadamente conservadora de tipo «peor de los casos posibles». Estas percepciones llevarían a la economía a su régimen 2: coexistencia pacífica de *fiat* (no MDBC) y criptomonedas, la primera como dinero y la segunda como activo. Este error de percepción por subestimación del éxito (o prudencia extrema) es mucho menos costoso para todos los agentes que el contrario (sobrestimación del éxito): [3,1] frente a [8, 4], ([pago del mercado, pago del BC]).

5. Aspectos tecnológicos y regulatorios

La emisión de una MDBC debe solventar numerosos problemas tecnológicos, relativos a su fiabilidad, integridad y funcionamiento. Estos problemas son especialmente importantes en un contexto de uso continuo (24/7/365) en el que ha de satisfacer las necesidades de millones de usuarios relativas a operaciones de muy diverso tipo, desde compras de bienes y servicios de reducido valor hasta adquisiciones de activos reales, incluyendo operaciones diferidas o condicionadas.

Adicionalmente, todo ello ha de conseguirse sin impacto significativo sobre el medioambiente, fundamentalmente minimizando sus requerimientos energéticos. Por otra parte, el carácter esencial y centralizado de una MDBC le hace especialmente atractivo para ciberrataques, tanto con fines de lucro ilícito, terrorismo o confrontación geopolítica. Posiblemente, estos requisitos tan exigentes son los que están moviendo a los BC de todo el mundo a seguir un proceso gradual y con distintos niveles.

Los aspectos regulatorios también son muy relevantes. Con el fin de simplificar la exposición, se ha asumido un caso extremo, la prohibición del uso y tenencia de las criptomonedas por parte del BC. Esta prohibición completa es recomendada y eventualmente aplicada sobre la base de consideraciones relativas al carácter especulativo de buena parte de la actividad en los mercados de criptomonedas, a la carencia de una red de seguridad para sus inversores y a su vinculación con actividades ilícitas (Gechev, 2022).

No obstante, teniendo en cuenta que las criptomonedas son protocolos digitales residentes en millones de ordenadores distribuidos por todo el mundo, su prohibición o eliminación total es virtualmente imposible y, en todo caso, extremadamente costosa, intrusiva y limitadora de actividades ajenas a las mismas. Por estas razones, las propuestas regulatorias suelen descartar la prohibición total y se basan en formas indirectas de regulación mediante la supervisión y colaboración de los IF (Nabilou y Prüm, 2019; Carvalho *et al.*, 2021). Esta regulación menos extrema es más probable que tenga éxito, sustentando con mayor verosimilitud el régimen 1 del modelo (emisión de MDBC y tratamiento de las criptomonedas como «oro digital»).

6. Conclusiones

El análisis realizado en este artículo aconseja una actitud decididamente gradual y prudente tanto en lo que concierne a la implementación de las MDBC como al uso de medidas regulatorias de carácter extremo relativas al

uso y posesión de las criptomonedas. La multiplicidad de equilibrios, el carácter no lineal de la interacción del BC con los IF y las dificultades informativas a la hora de estimar la capacidad regulatoria del BC pueden generar situaciones de desequilibrio, en particular, si el BC es excesivamente optimista respecto a su capacidad regulatoria y los IF han apostado decididamente por las criptomonedas.

El modelo de teoría de los juegos presentado en el apartado 2 sugiere que el equilibrio más probable es aquel en el que el BC emite una MDBC, el mercado adopta las criptomonedas como activo (oro digital) y no se lleva a término prohibición alguna de las criptomonedas²². De esta manera, las criptomonedas y la MDBC habitarían en nichos funcionalmente diferenciados, sin que surgieran interferencias entre ambas. No obstante, la estabilidad de este equilibrio dista de estar garantizada debido al incentivo que los IF tienen para promover un uso lo más amplio posible de las criptomonedas como estrategia compensatoria o, en el límite, de supervivencia²³. Estos incentivos son extremadamente sensibles a la introducción de una MDBC. Otros factores adicionales a tener en cuenta son:

- Si la introducción de la MDBC es muy rápida y agresiva, los IF pueden verse muy afectados por la reducción de los depósitos de los consumidores. De esta manera, se produciría una reducción de la oferta global de crédito, de la inversión agregada y, eventualmente, del propio producto potencial de la economía. Adicionalmente, su menor tamaño podría afectar negativamente el acceso a los mercados de capitales, haciendo que las crisis de liquidez se transformen en crisis de solvencia con mayor facilidad.

²² Aunque esta prohibición no se materialice, su presencia es disuasoria por ser creíble, ya que lleva al BC a una posición mejor que si no la lleva a término (racionalidad).

²³ Muchos IF, especialmente los más vinculados con la banca comercial y minorista, son especialmente vulnerables a una reducción masiva de los depósitos de los consumidores, especialmente en un contexto en el que su rentabilidad a largo plazo está comprometida por la digitalización acelerada de las operaciones financieras, el exceso de capacidad y la intensa competencia por parte de IF de reducido tamaño y elevadísima mecanización (Lee, 2015; Mackenzie, 2018).

- Si la introducción de la MDBC es acompañada por la eliminación del dinero en efectivo, se aceleraría la digitalización de los medios de pago en general, tanto mediante MDBC como mediante criptomonedas. La proporción concreta dependería de las ventajas relativas de ambas pero no generaría, de forma mecánica, una adopción de la MDBC²⁴.

- La prohibición del uso de las criptomonedas podría ser interpretada de forma negativa por el mercado, como indicador adelantado de medidas de represión financiera o confiscación, especialmente en un contexto macroeconómico adverso (p. ej., en condiciones de estanflación).

- El propio diseño de la MDBC es relevante. Un esquema mayorista estaría mucho más próximo al entorno actual en el que operan los IF, haciendo que su reacción frente a la introducción de la MBDC fuera cooperativa en vez de competitiva. Igualmente, un esquema no remunerado que mantuviera a la MDBC a la par con el efectivo, facilitaría su adopción por los consumidores. Finalmente, garantías de privacidad y anonimidad similares a las que rigen con el uso del efectivo, reducirían la percepción de las MBDC como un elemento intrusivo e incluso coercitivo²⁵.

- La naturaleza fiduciaria de la MDBC hace que sus fundamentos macroeconómicos sean muy importantes: una inflación baja y estable bajo condiciones de sostenibilidad fiscal la harán más atractiva frente a cualquier competidor, incluyendo a las criptomonedas.

- El carácter centralizado de la MDBC y el amparo del Estado hace que las consideraciones regulatorias sean también muy relevantes. Todo lo que aleje la posibilidad de represión financiera o de confiscación alentarán su uso y adopción.

- La existencia de MDBC emitidas por otros países cuyos fundamentos macroeconómicos sean superiores, incluyendo la facilidad para ser utilizada como moneda internacional de reserva, es un factor decisivo. En este sentido, la existencia de una MDBC total o parcialmente respaldada por mercancías y emitida por un país macroeconómicamente fuerte es particularmente relevante (Pozsar, 2022).

Por todo ello, desde el punto de vista de la política económica y regulatoria, se recomienda una actitud extremadamente gradual²⁶, progresiva y consensuada respecto a la emisión de una MDBC, examinando su conveniencia desde un marco realista que sea compatible con los incentivos de los agentes económicos privados y no solo su viabilidad puramente técnica.

La receta clásica (inflación baja y estable en un contexto fiscalmente sostenible, regulatoriamente predecible, no confiscatorio ni represivo) sigue siendo la mejor forma de asegurar la viabilidad de la MDBC, manteniendo contenido el uso de las criptomonedas y de las MDBC emitidas por otros países. Afortunadamente, este es el esquema que, en lo esencial, se viene aplicando en los países occidentales y que conviene retener.

Asimismo, las medidas destinadas a orientar la capacidad potencial del sector financiero-tecnológico (*fintech*) en la dirección de mejorar la desintermediación y el acceso de empresas y consumidores a los mercados financieros, harán que el potencial de los métodos criptográficos fructifique, corrigiendo los excesos especulativos que lo han caracterizado en los últimos años.

Finalmente, este artículo puede ser extendido en múltiples direcciones. Especialmente relevante es una consideración más detallada de las criptomonedas, especialmente incidiendo en su valoración: respaldadas por activos reales (p. ej., oro, materias primas),

²⁴ La misma tecnología digital que debe sustentar una MDBC facilitaría el uso de las criptomonedas, ya que comparten un mismo espacio (digital) y tecnología (electrónica mediante aplicaciones en ordenadores, teléfonos móviles y dispositivos especializados).

²⁵ La propuesta de Danezis y Meiklejohn (2015) de una MDBC con dos niveles, uno centralizado y otro descentralizado, encaja con este planteamiento.

²⁶ En este aspecto, destaca el mantenimiento del dinero en efectivo, como elemento de seguridad (p. ej., en caso de insuficiencia energética) y de reversibilidad (p. ej., si se decide pasar de una MDBC minorista a una mayorista). Un análisis del papel del efectivo se encuentra en Rogoff (2014) y Andreasen y Brøgger (2020).

financieros (p. ej., monedas *fiat*, como en la *stablecoins*) o por su proceso de emisión (p. ej., acuñación electrónica mediante procesos de validación criptográficos, como en las criptomonedas más populares como Bitcoin, Ethereum, Solana, Monero, Ripple, etc.).

Referencias bibliográficas

- Agarwal, R., & Kimball, M. (2015). *Breaking through the zero lower bound* (IMF Working Paper No. 2015/224). International Monetary Fund.
- Ali, R., Barrdear, J., Clews, R., & Southgate, J. (2014). Innovations in payment technologies and the emergence of digital currencies. *Bank of England Quarterly Bulletin*, 54(3), 262-275.
- Andreasen, J., & Brøgger, S. B. (2020). *Cash as a perpetual option* (SSRN Working Paper No. 3669204). Social Science Research Network.
- Antonopoulos, A. M. (2017). *Mastering Bitcoin: Programming the open blockchain*. O'Reilly Media.
- Arvidsson, N., Hedman, J., & Segendorf, B. (2017). Cashless society: when will merchants stop accepting cash in Sweden - a research model. In S. Feuerriegel, & D. Neumann (Eds.), *Enterprise Applications, Markets and Services in the Finance Industry* (pp. 105-113). 8th International Workshop, FinanceCom 2016 Frankfurt, Germany, December 8, 2016. Revised Papers. LNBP 276 (Lecture Notes in Business Information Processing, volume 276). Springer.
- Assenmacher, K., & Krogstrup, S. (2018). *Monetary policy with negative interest rates: decoupling cash from electronic money* (IMF Working Paper No. 2018/191). International Monetary Fund.
- Auer, R., & Böhme, R. (2020). The technology of retail central bank digital currency. *Bank for International Settlements Quarterly Review*, 85-100. March.
- Auer, R., Cornelli, G., & Frost, J. (2020). *Rise of the central bank digital currencies: drivers, approaches and technologies* (BIS Working Paper No. 880). Bank for International Settlements.
- Barrdear, J., & Kumhof, M. (2016). *The macroeconomics of central bank issued digital currencies* (BoE Working Paper No. 605). Bank of England.
- Bech, M. L., & Garratt, R. (2017). Central bank cryptocurrencies. *Bank for International Settlements Quarterly Review*, 55-70. September.
- Berentsen, A., & Schär, F. (2018). A short introduction to the world of cryptocurrencies. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 100(1), 1-16. First Quarter.
- Bhaskar, R., Hunjra, A. I., Bansal, S., & Pandey, D. K. (2022). Central bank digital currencies: agendas for future research. *Research in International Business and Finance*, 62, 101737.
- BIS. (2020). *Central bank digital currencies: foundational principles and core features*. Bank for International Settlements.
- Bjerg, O. (2017). *Designing new money. The policy trilemma of central bank digital currency* (CBS-MPP Working Paper). Copenhagen Business School.
- BoE. (2021). *Central Bank Digital Currency: opportunities, challenges and design* (BoE Discussion Paper). Bank of England.
- Bonanno, G. (2018). *Game Theory*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Bordo, M. D., & Levin, A. T. (2017). *Central bank digital currency and the future of monetary policy* (NBER Working Paper No. 23711). National Bureau of Economic Research.
- Brams, S. J. (1994). *Theory of Moves*. Cambridge University Press.
- Buiter, W. (2009). *Negative nominal interest rates: three ways to overcome the zero lower bound* (NBER Working Paper No. 15118). National Bureau of Economic Research.
- Buiter, W. (2014). Gold: a six thousand year-old bubble revisited. *Citi Global Economics View*. November 26.
- Caginalp, C., & Caginalp, G. (2019). Establishing cryptocurrency equilibria through game theory. *AIMS Mathematics*, 4(3), 420-436.
- Carney, M. (2019). *The growing challenges for monetary policy in the current international monetary and financial system* [Speech]. Federal Reserve Bank of Kansas City, Jackson Hole Symposium.
- Carvalho, C. E., Almeida, D., Artioli, M., & Contento, G. (2021). Cryptocurrencies: technology, initiatives of banks and central banks, and regulatory challenges. *Economia e Sociedade*, 30(2), 467-496.
- Cavalli, F. (2019). Alex Lipton, MIT: Facebook plagiarised Libra. *The Cryptoeconomist*.
- Chaum, D. (1983). Blind signatures for untraceable payments. In D. Chaum, R. L. Rivest, & A. T. Sherman (Eds.), *Advances in cryptology* (pp. 199-203). Springer.
- Chaum, D. (1985). Security without identification: transaction systems to make big brother obsolete. *Communications of the ACM*, 28(10), 1030-1044.
- Cong, L. W., & Mayer, S. (2022). *The coming battle of digital currencies* (SSRN Working Paper No. 4063878). Social Science Research Network.
- Danezis, G., & Meiklejohn, S. (2015). Centrally banked cryptocurrencies. *arXiv, Cryptography and Security*. arXiv: 1505.06895.
- Davies, G. (2020, December 13). Bitcoin has ambitions for gold's role. *Financial Times*.
- Domonoske, C. (2018, April 10). Mark Zuckerberg tells Senate: Election security is an 'arms race'. *KQED, Live Testimony*. <https://www.kqed.org/news/11661063/watch-live-testimony-by-zuckerberg-about-use-and-abuse-of-data>

- ECB. (2020). *Report on a digital euro*. European Central Bank.
- Eggertsson, G. B., & Woodford, M. (2003). The Zero Bound on Interest Rates and Optimal Monetary Policy. *Brookings Papers on Economic Activity*, 1, 139-233.
- Elsayed, A. H., & Nasir, M. A. (2022). Central bank digital currencies: an agenda for future research. *Research in International Business and Finance*, 62, 101736.
- Federal Reserve. (2022). Money and payments: the U.S. dollar in the age of digital transformation. *Board of Governors of the Federal Reserve System*.
- Fernández-Villaverde, J., Sanches, D., Schilling, L., & Uhlig, H. (2020). *Central bank digital currency: central banking for all?* (NBER Working Paper No. 26753). National Bureau of Economic Research.
- Forgac, T. (2020). Three reasons why central bank digital currencies are a bad idea. *Mises Institute*, Note No. 19-2020.
- Gechev, V. (2022). *The strengthening case to prohibit cryptocurrencies by law* (SSRN Working Paper No. 4203937). Social Science Research Network.
- Goldman Sachs. (2021). *Crypto: a new asset class?* Global Macro Research.
- Goodfriend, M. (2000). Overcoming the zero bound on interest rate policy. *Journal of Money, Credit and Banking*, 32(4), 1007-1035.
- Gouveia, O. C., Dos Santos, E., Fernández de Lis, S., Neut, A., & Sebastián, J. (2017). *Central bank digital currencies: assessing implementation possibilities and impacts* (BBVA Research Working Paper No. 17/04). Banco Bilbao Vizcaya Argentaria.
- Hoffman, S., Garnaut, J., Izenman, K., Johnson, M., Pascoe, A., Ryan, F., & Thomas, E. (2020). *The flipside of China's central bank digital currency*. Australian Strategic Policy Institute, Policy Brief Report No. 40/2020.
- IMF. (2017). *Negative interest rate policies. Initial experiences and assessments* (IMF Policy Papers Issue 010). International Monetary Fund.
- Kennedy, S. I., Yunzhi, G., Ziyuan, F., & Liu, K. (2020). The cashless society has arrived: how mobile phone payment dominance emerged in China. *International Journal of Electronic Government Research*, 16(4), 94-112.
- Kimball, M. S. (2015). Negative interest rate policy as conventional monetary policy. *National Institute Economic Review*, 234(1), R5-R14.
- Klein, A. (2019). Is China's new payment system the future? *Brookings Institution*.
- Kumhof, M., & Noone, C. (2018). *Central bank digital currencies — design principles and balance sheet implications* (BoE Working Paper No. 725). Bank of England.
- Lee, P. (2015). Small fish, big prize. The market makers out to eat the bank's lunch. *Euromoney*, 1-8. December.
- Lipton, A., Hardjono, T., & Pentland, A. (2018). Digital trade coin: towards a more stable digital currency. *Royal Society Open Science*, 5(7), 180155.
- Lipton, A., Sardon, A., Schär, F., & Schüpbach, C. (2020). From Tether to Libra: stablecoins, digital currency and the future of money. *arXiv, Computers and Society*. arXiv: 2005.12949.
- Lipton, A., & Treccani, A. (2021). *Blockchain and distributed ledgers: mathematics, technology, and economics*. World Scientific.
- Mackenzie, R. (2018). Jump: inside the secretive e-trading giant. *Risk*, 10-14. November.
- Mancini-Griffoli, T., Martínez Peria, M.ª S., Agur, I., Ari, A., Kiff, J., Popescu, A., & Rochon, C. (2018). *Casting light on central bank digital currency* (IMF Staff Discussion Note No. 18/08). International Monetary Fund.
- McGath, T. (2018). M-PESA: how Kenya revolutionized mobile payments. *N26 Magazine*, 9. April.
- McLeay, M., Radia, A., & Thomas, R. (2014). Money creation in the modern economy. *Bank of England Quarterly Bulletin*, 54(1), 14-27.
- Middelkoop, W. (2016). *The Big Reset. War on Gold and the Financial Endgame*. Amsterdam University Press.
- Mou, C., Tsai, W.-T., Jiang, X., & Yang, D. (2021). Game-theoretic analysis on CBDC adoption. In *Intelligent Computing and Block-Chain* (pp. 294-305). Springer.
- Nabilou, H., & Prüm, A. (2019). *Central banks and regulation of cryptocurrencies* (UoLL Working Paper No. 2019-014). University of Luxembourg Law.
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system. *Bitcoin Organization*.
- Pozsar, Z. (2022). *Bretton Woods III*. Credit Suisse, Investment Solutions & Products Notes. March 7.
- Rev. (2019, October 23). Mark Zuckerberg testimony transcript: Zuckerberg testifies on Facebook cryptocurrency Libra. *Rev Transcripts*.
- Roberts, J. H. (2022, January 12). Bill Seeks to Ban Fed From Issuing Digital Currency to Consumers. *Decrypt*.
- Rodrigues, J., Ghosh, S., & Bloomberg. (2022, February 2). Now that India has pulled back from banning crypto, here's how it plans to develop digital currency on its own terms. *Fortune*.
- Rogoff, K. S. (2014). *Costs and benefits to phasing out paper currency* (NBER Working Paper No. 20126). National Bureau of Economic Research.
- Ryan-Collins, J., Greenham, T., Werner, R., & Jackson, A. (2012). *Where does money come from?* New Economics Foundation.
- Sahm, C. R. (2019). *Direct stimulus payments to individuals*. The Hamilton Project, Policy Proposal.
- Sahm, C. R., Shapiro, M. D., & Slemrod, J. (2012). Check in the mail or more in the paycheck: does the effectiveness

- of fiscal stimulus depend on how it is delivered? *American Economic Journal: Economic Policy*, 4(3), 216-250.
- Scorer, S. (2017, June 5). Central Bank Digital Currency: DLT or not DLT? That is the question. *Bank Underground*.
- Soderberg, G., Bechara, M., Bossu, W., Che, N. X., Davidovic, S., Kiff, J., Lukonga, I., Mancini-Griffoli, T., Sun, T., & Yoshinaga, A. (2022). *Behind the scenes of central bank digital currency. Emerging trends, insights, and policy lessons* (IMF Fintech Note No. 2022/004). International Monetary Fund.
- Taskinsoy, J. (2019). *Is Facebook's Libra project already a miscarriage?* (SSRN Working Paper No. 3437857). Social Science Research Network.
- The Economist. (2020a). *Spooked by sanctions*. January 18, 12-13.
- The Economist. (2020b). *Dethroning the dollar*. January 18, 68-70.
- The Economist. (2021). *The real-time revolution*. October 23, 25-27.
- Viswanath-Natraj, G., & Eichengreen, B. (2020, April 25). Libra still needs more baking. *VoxEU Column*.
- Wadsworth, A. (2018). The pros and cons of issuing a central bank digital currency. *Reserve Bank of New Zealand Bulletin*, 81(7), 1-21.
- Waller, C. J. (2021, August 5). *CBDC. A solution in search of a problem?* [Speech]. American Enterprise Institute, Washington, DC.
- Wang, G., & Hausken, K. (2022). A game between central banks and households involving central bank digital currencies, other digital currencies and negative interest rates. *Cogent Economics & Finance*, 10(1), 2114178.