

MiCA e l'adozione del Proof of Stake: prospettive di sostenibilità ed efficienza per i crypto-asset

Prof.ssa Mirella Pellegrini

RELATORE

Prof.ssa Paola Lucantoni

CORRELATORE

Leonardo Petriccone Sorgi (Matricola 760811)

CANDIDATO

Indice

<i>Introduzione</i>	<i>1</i>
1. MiCA e l'ecosistema dei cripto-asset: una rivoluzione normativa	3
1.1 Evoluzione storica dei cripto-asset	3
1.1.1 Origini e fondamenti	4
1.1.2 Sviluppo delle tecnologie blockchain	5
1.1.3 Crescita e adozione nel mercato	7
1.2 Introduzione ai cripto-asset e alla tecnologia DLT	10
1.2.1 Classificazione	10
1.2.2 Tecnologie sottostanti.....	14
1.2.3 Benefici della blockchain	17
1.2.4 Implicazioni ambientali del Proof of Work.....	20
1.3 L'impatto della regolamentazione MiCA nel mercato dei cripto-asset	26
1.3.1 Struttura del regolamento	28
1.3.2 Obiettivi principali	31
1.3.3 Meccanismi di vigilanza.....	35
1.3.4 Promozione dei requisiti ESG	37
1.4 MiCA a confronto con altre normative globali	40
1.4.1 Normative statunitensi.....	40
1.4.2 Normative cinesi	45
1.4.3 Altre normative internazionali.....	48
2. MiCA e sostenibilità: possibili riflessi sull'efficienza del mercato cripto	53
2.1 Riorientare i mercati cripto: MiCA, trasparenza ambientale e Proof of Stake	54
2.1.1 L'obbligo di disclosure ambientale come strumento di pressione indiretta	55
2.1.2 Riduzione dell'incertezza normativa e reputazionale	58
2.1.3 Effetti sistemici: come la presenza istituzionale rafforza fiducia e ordine nel mercato	61
2.2 Mercati efficienti: l'ipotesi EMH	63
2.2.1 Le diverse forme di EMH.....	65
2.2.2 Informazione e trasparenza: come i mercati incorporano i dati più rapidamente	68
2.2.3 Nesso tra efficienza di mercato e blockchain.....	71
2.2.4 Riduzione della persistenza dei rendimenti: segnale di un mercato più reattivo	72

2.3 Perché il Proof of Stake può favorire l'efficienza di mercato	74
2.3.1 Riduzione di costi e barriere all'ingresso	76
2.3.2 Scalabilità aumentata e finalizzazione rapida	78
2.3.3 Stabilità del network e minori distorsioni da fattori esogeni	79
2.3.4 Incentivi al buon comportamento dei validatori	82
2.4 Interazione tra efficienza e Proof of Stake: scenari futuri.....	83
2.4.1 Ethereum come apripista.....	84
2.4.2 Altri progetti in transizione verso PoS: un panorama in evoluzione.....	86
2.4.3 Prospettiva strategica e normativa.....	90
2.4.4 Possibili limiti teorici	91
2.5 Collegamenti per l'analisi quantitativa	93
<i>3. Dal Proof of Work al Proof of Stake: impatti del "Merge" di Ethereum</i>	
<i>sull'efficienza di mercato</i>	95
3.1 Introduzione al caso di studio	95
3.1.1 Domande di ricerca	97
3.1.2 Ipotesi di ricerca	99
3.2 Dataset e configurazione dell'analisi.....	101
3.2.1 Orizzonte temporale e fonte dati	101
3.2.2 Selezione delle criptovalute di confronto.....	102
3.3 Metodologia.....	104
3.3.1 Preparazione del dataset	104
3.3.2 Verifica di stazionarietà.....	106
3.3.3 Calcolo e interpretazione dell'Hurst exponent.....	110
3.4. Risultati empirici	112
3.4.1 Stazionarietà dei rendimenti: esiti dei test.....	112
3.4.2 Hurst exponent: confronto tra prima e dopo il "Merge"	115
3.5 Discussione e interpretazione dei risultati.....	117
<i>Conclusioni.....</i>	120
<i>Bibliografia e sitografia.....</i>	126

Introduzione

I cripto-asset e la tecnologia blockchain hanno preso piede con una rapidità sorprendente, uscendo dai confini di un ristretto gruppo di appassionati per attrarre l'attenzione di istituzioni finanziarie, aziende e governi di tutto il mondo. Ciò che inizialmente si presentava come un sistema di pagamento alternativo e decentralizzato è rapidamente divenuto un fenomeno multiforme, capace di influenzare settori quali la logistica, i servizi finanziari, la tutela della proprietà intellettuale, l'arte digitale e molte altre applicazioni basate su smart contract. Alla base di questo successo stanno l'innovazione tecnologica e la promessa di superare i tradizionali intermediari, ma la portata della rivoluzione in atto non può essere compresa a fondo senza tenere conto delle questioni regolamentari ed etiche che accompagnano tale crescita.

Dal punto di vista normativo, l'Unione Europea ha intrapreso un percorso preciso per disciplinare il mercato dei cripto-asset, culminato nell'emanazione del Regolamento MiCA (Markets in Crypto-Assets). Questa iniziativa mira a definire regole chiare e uniformi, garantendo agli investitori maggiore trasparenza riguardo ai rischi dei cripto-asset e stabilendo requisiti stringenti per gli operatori che emettono, gestiscono o facilitano lo scambio di cripto-asset. In un contesto tradizionalmente caratterizzato da disparità di approcci nazionali, MiCA assume un ruolo di armonizzazione, ponendo le basi per uno scenario europeo più stabile e affidabile. Un elemento distintivo del regolamento è l'attenzione prestata ai criteri ESG (Environmental, Social, Governance), in particolare per quanto riguarda l'impatto ambientale. Tale attenzione si traduce nell'obbligo per chi opera nel settore dei cripto-asset di rendere conto dell'impronta ecologica delle proprie attività, prospettando una possibile trasformazione delle dinamiche interne ai network blockchain verso soluzioni più "green".

Parallelamente, si è acceso il dibattito sui limiti del Proof of Work (PoW), il meccanismo di consenso alla base di criptovalute storiche come il Bitcoin, criticato per l'elevato consumo di energia dovuto alla competizione tra i cosiddetti "miner". Sebbene il PoW si sia dimostrato solido nel garantire la sicurezza delle reti, la sua impronta ambientale e la concentrazione di potere di calcolo in poche mani hanno sollevato preoccupazioni crescenti. Da qui l'interesse verso meccanismi di convalida alternativi, come il Proof of Stake (PoS), che consentono di ridurre drasticamente i consumi energetici e di ampliare

la partecipazione: la sicurezza della rete non dipende più dalla potenza di calcolo, bensì dalla quantità di token “messi in stake” dai validatori. Oltre a comportare vantaggi sul fronte dell’ecosostenibilità, PoS punta a una governance più inclusiva, aprendo le porte a un numero maggiore di attori potenzialmente interessati alla validazione e alla gestione della rete.

Questo duplice impulso, da un lato il richiamo normativo a garantire maggiore trasparenza e responsabilità sociale, dall’altro la ricerca tecnologica di protocolli “green”, conduce all’ipotesi che la sostenibilità e la conformità alle linee guida europee possano incidere anche sulla qualità informativa del mercato cripto. In sostanza, se l’abbandono dei modelli energivori e l’adeguamento ai principi di MiCA invogliano operatori qualificati, investitori istituzionali e analisti esperti a entrare o a intensificare la propria attività nel settore, risulta plausibile prevedere un mercato più reattivo e sensibile alle novità. La presenza di player professionali, dotati di risorse analitiche evolute, potrebbe favorire un processo di price discovery più rapido, limitando la persistenza di fenomeni speculativi o di volatilità scollegata dai fondamentali. L’idea è che la stabilità e la credibilità garantite da regole condivise ed ecosostenibili inducano una concorrenza informativa più serrata e un minore margine per abusi o manipolazioni di breve periodo. Di fronte a queste premesse, diventa naturale chiedersi se la transizione dai protocolli di consenso energivori verso soluzioni meno dispendiose e l’introduzione di regole chiare a livello europeo possano favorire la maturazione del mercato, avvicinandolo a forme di efficienza già note nei mercati finanziari tradizionali. È in questo contesto che si inserisce la recente mossa di Ethereum, passata dal Proof of Work al Proof of Stake, con l’evento noto come “The Merge”. In un mercato che annovera centinaia di criptovalute e piattaforme, Ethereum rappresenta una delle reti più influenti, tanto da svolgere un ruolo di “infrastruttura” per una moltitudine di dApp e token. Il suo cambio di protocollo, che riduce in misura rilevante il consumo energetico, diventa così un laboratorio privilegiato per osservare se tecnologie “green” e criteri ESG possano tradursi in una partecipazione più ampia e consapevole, con ricadute tangibili sulla rapidità e l’accuratezza dell’aggiustamento dei prezzi.

1. MiCA e l'ecosistema dei crypto-asset: una rivoluzione normativa

Con la loro diffusione e il crescente impatto sul sistema economico globale, i crypto-asset hanno iniziato a trasformare l'ecosistema finanziario, stimolando nuove riflessioni sui modelli economici tradizionali e sul ruolo delle tecnologie digitali. Questi strumenti digitali non solo hanno creato nuove opportunità, ma hanno anche sollevato sfide complesse per le autorità di regolamentazione, che si trovano oggi a definire regole capaci di gestire l'innovazione senza comprometterne il potenziale.

1.1 Evoluzione storica dei crypto-asset

Negli ultimi decenni, il mondo della finanza e della tecnologia ha attraversato profonde trasformazioni, guidate da innovazioni che hanno messo in discussione le fondamenta stesse del sistema economico globale. Tra queste, l'emergere dei crypto-asset rappresenta uno dei cambiamenti più rivoluzionari. La loro storia è strettamente legata al desiderio di creare un sistema economico alternativo, più resiliente e decentralizzato, capace di rispondere alle nuove esigenze di trasparenza e indipendenza.

L'origine dei crypto-asset può essere ricondotta ai primi tentativi di sviluppare valute digitali negli anni '90 e nei primi anni 2000, quando diversi progetti esplorarono la possibilità di creare forme di denaro elettronico al di fuori del controllo delle autorità centrali. Tra i progetti pionieristici, Digicash di David Chaum e B-money di Wei Dai introdussero concetti chiave per la moneta elettronica decentralizzata, anticipando alcuni principi che avrebbero in seguito definito le criptovalute.¹ Tuttavia, tali iniziative non raggiunsero una diffusione su larga scala, a causa di limitazioni tecnologiche e della mancanza di infrastrutture adeguate a garantire la sicurezza delle transazioni. In questo contesto di sperimentazione si sviluppò l'idea di un sistema economico basato su un registro distribuito.

¹Judmayer, A., Stifter, N., Krombholz, K., & Weippl, E. (2017). *History of cryptographic currencies*. In *Blocks and Chains*, pp. 15-18.

1.1.1 Origini e fondamenti

Nel 2008, durante una profonda crisi economica e un periodo di crescente sfiducia verso il sistema finanziario, venne alla luce un documento destinato a trasformare i concetti di denaro e di valore. Intitolato “*Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*”, il white paper fu pubblicato sotto lo pseudonimo di Satoshi Nakamoto². Questo documento di nove pagine delineava un’idea radicale: un sistema di pagamento digitale decentralizzato, senza la necessità di intermediari come banche o istituzioni finanziarie. Era l’inizio di ciò che oggi conosciamo come l’era dei cripto-asset.

In un momento storico di sospetto verso le istituzioni finanziarie, accusate di opacità nella gestione dei rischi, Bitcoin rappresentò una visione alternativa. Proponendo un sistema monetario autonomo, Nakamoto immaginava un futuro in cui le transazioni fossero gestite interamente dagli utenti tramite una rete decentralizzata. Questo modello, privo di banche centrali o intermediari, appariva innovativo poiché si poneva come risposta alla perdita di fiducia nella gestione della moneta da parte di stati e banche³.

L’introduzione di Bitcoin come primo cripto-asset rispondeva a una nuova esigenza di alternative finanziarie. La crisi finanziaria del 2008 aveva esposto le vulnerabilità del sistema economico globale, colpendo duramente le economie e portando a massicci salvataggi bancari. In tale clima di incertezza, Bitcoin si affermò come una moneta digitale indipendente dalle politiche monetarie statali e dai tassi di interesse regolati dai governi, attirando l’interesse di coloro che cercavano un nuovo modo di conservare e trasferire valore.

Il concetto di Bitcoin attirò non solo chi aveva perso fiducia nel sistema tradizionale, ma anche una comunità di programmatori, tecnologi e libertari digitali. Per questi sostenitori, Bitcoin non era soltanto un’alternativa monetaria, ma incarnava ideali di libertà, trasparenza e autonomia. La possibilità di gestire ogni transazione su un registro pubblico, senza rivelare l’identità degli utenti, offriva una nuova visione sulla gestione del valore⁴.

²Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. Disponibile su: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.

³Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. (2016). *Bitcoin and Cryptocurrency Technologies*. Princeton University.

⁴De Filippi, P., & Wright, A. (2018). *Blockchain and the Law: The Rule of Code*. Harvard University Press, pp. 22-25, 68-72.

Bitcoin si fondava su un modello unico, che combinava anonimato, decentralizzazione e trasparenza, rispondendo al diffuso malcontento verso il controllo esercitato dalle banche centrali e dai governi. Per i suoi sostenitori, Bitcoin rappresentava la realizzazione di una finanza indipendente, immune all'inflazione indotta dalle banche centrali e sicura da censura o manipolazioni esterne.

Nonostante il forte scetticismo iniziale e le limitate previsioni di successo, Bitcoin gettò le basi per un movimento di innovazione finanziaria senza precedenti. La sua diffusione e l'interesse crescente di utenti e investitori stimolarono riflessioni sul potenziale di nuovi cripto-asset, aprendo la strada a una varietà di progetti e piattaforme digitali ispirati alla visione di Nakamoto.

1.1.2 Sviluppo delle tecnologie blockchain

L'innovazione portata da Bitcoin non si limitava a proporre una moneta digitale alternativa, ma si fondava su un concetto più ampio e rivoluzionario: una rete di dati accessibile e verificabile da chiunque, conosciuta come "blockchain". Pur non descritta nei dettagli nel documento originale di Satoshi Nakamoto, la blockchain rappresentava il vero elemento rivoluzionario di Bitcoin, offrendo la possibilità di registrare in modo trasparente e sicuro un insieme potenzialmente infinito di transazioni. Grazie alla blockchain, ogni scambio, registrato su un sistema condiviso, diventava permanente e consultabile, eliminando la necessità di ricorrere a intermediari⁵. Questo cambiamento radicale modificava il modo di concepire i registri e la fiducia digitale: la tecnologia blockchain sostituiva la centralità di singoli attori con un modello in cui era la comunità a gestire e verificare i dati in modo collettivo e trasparente. Questo processo di disintermediazione può ricordare, a grandi linee, alcune dinamiche dello "shadow banking system": entrambi si sviluppano fuori dai canali di vigilanza tradizionali. Tuttavia, mentre lo shadow banking system fa comunque affidamento sulla moneta sovrana, i cripto-asset introducono un "nuovo prodotto" che spezza il legame con la garanzia pubblica. Ciò solleva sfide inedite per regolatori e operatori, i quali devono

⁵Schär, F. (2021). *Decentralized Finance: On Blockchain- and Smart Contract-Based Financial Markets*. Federal Reserve Bank of St. Louis Review, 103(2), pp. 153-174.

ripensare i meccanismi di supervisione e tutela, senza soffocare l'innovazione intrinseca nella tecnologia blockchain.⁶

In breve tempo, la blockchain cominciò a suscitare l'interesse non solo degli appassionati di tecnologia e di finanza alternativa, ma anche di aziende, istituzioni e governi. Questa struttura innovativa prometteva non solo di facilitare il trasferimento di valore, ma anche di consentire la gestione di ogni tipo di informazione in un formato aperto e immutabile. Il principio fondamentale della blockchain, la decentralizzazione, si poneva in contrasto con i sistemi gerarchici e centralizzati tradizionali, come quelli bancari e governativi, abituati a gestire transazioni e informazioni attraverso strutture chiuse e controllate.

Questa impostazione attirò rapidamente l'interesse di vari settori: aziende tecnologiche e startup esplorarono le potenzialità della blockchain per migliorare i propri servizi e ridurre i costi di gestione, mentre istituzioni governative iniziarono a studiare il fenomeno per comprenderne le possibili applicazioni. L'idea di un registro aperto, decentralizzato e sicuro, capace di ridurre significativamente il rischio di frodi, violazioni della privacy e manipolazioni dei dati, stimolò molte realtà a considerare la blockchain anche in settori non strettamente legati alle criptovalute. Questo approccio rappresentava una forma di sicurezza e trasparenza mai sperimentata prima, particolarmente rilevante per ambiti in cui tracciabilità e integrità dei dati erano fondamentali, come la sanità, la logistica e la filiera alimentare.

Nel corso del tempo, la blockchain si trasformò in una vera infrastruttura per lo sviluppo di nuove applicazioni e servizi. Il concetto di registro pubblico e decentralizzato, che incarnava i principi di libertà e autonomia, cominciò a essere applicato in nuovi contesti e modelli, espandendo ulteriormente le potenzialità di questa tecnologia. Si delineava così una piattaforma capace di supportare applicazioni sicure e flessibili, indipendenti dagli intermediari. La blockchain, nata inizialmente per supportare le transazioni di Bitcoin, iniziava a trasformarsi in una piattaforma per servizi che richiedevano trasparenza, sicurezza e una gestione decentralizzata delle informazioni.

Questa evoluzione non solo consolidò il valore di Bitcoin, ma incoraggiò la creazione di nuovi progetti e cripto-asset, ognuno con l'obiettivo di esplorare applicazioni della

⁶Lemma, V. (2022). *The Public Intervention on Cryptocurrencies between Innovation and Regulation*. Open Review of Management, Banking and Finance.

blockchain per scopi specifici. Gradualmente, la blockchain venne vista come un'opportunità per ridisegnare interi settori economici, trasformando il modo di scambiare beni e servizi. Non era più una tecnologia confinata al mondo finanziario, ma una soluzione che offriva vantaggi di governance e tracciabilità in ambiti come la sanità, l'agricoltura e la gestione della supply chain. Diverse aziende leader iniziarono a investire in progetti blockchain per monitorare i prodotti lungo l'intera catena di fornitura, riducendo gli errori e ottimizzando la trasparenza per i consumatori.

Anche il settore artistico e culturale iniziò a guardare alla blockchain con interesse: la blockchain sembrava offrire una soluzione concreta per garantire la provenienza e l'autenticità delle opere d'arte digitali, in un contesto in cui i file digitali potevano essere facilmente duplicati e condivisi. Il concetto di NFT, o token non fungibili, iniziò a emergere proprio per rispondere a queste esigenze di tracciabilità, permettendo di verificare la proprietà di asset digitali unici⁷.

1.1.3 Crescita e adozione nel mercato

Dopo l'emergere di Bitcoin, il mercato dei cripto-asset ha attraversato una fase di rapida crescita e diversificazione. A partire dal 2010, hanno iniziato a emergere numerosi nuovi progetti, ciascuno con l'intento di superare alcune limitazioni della visione originale di Bitcoin e di ampliare le potenzialità della tecnologia blockchain. Questi sviluppi hanno contribuito alla formazione di un ecosistema più ampio e articolato, in cui le criptovalute non sono più solo mezzi di scambio digitale, ma strumenti multifunzionali con rilevanti implicazioni economiche e sociali.

Un punto di svolta si è verificato nel 2015 con l'introduzione di Ethereum e dei suoi smart contract. Ethereum ha messo a disposizione una piattaforma flessibile su cui sviluppare applicazioni decentralizzate, offrendo agli sviluppatori l'opportunità di creare servizi che andavano ben oltre la semplice transazione di valore⁸. Questo modello ha incoraggiato

⁷The Guardian. (2021). *Non-fungible tokens are revolutionising the art world – and art theft*. Disponibile su: <https://www.theguardian.com/technology/2021/mar/12/non-fungible-tokens-revolutionising-art-world-theft>.

⁸Buterin, V. (2014). *Ethereum: A Next Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*. Disponibile su: <https://ethereum.org/en/whitepaper/>.

numerosi progetti innovativi che hanno sfruttato la blockchain per realizzare applicazioni come piattaforme di prestito decentralizzate, mercati di scambio peer-to-peer e sistemi di governance collettiva. La possibilità di programmare transazioni e interazioni in modo autonomo ha accelerato l'adozione della blockchain, attirando un pubblico sempre più vasto e diversificato.

Un altro evento significativo per la crescita del mercato è stato il boom delle Initial Coin Offerings (ICO) nel 2017, un nuovo metodo di finanziamento che consentì a numerose startup di ottenere capitali attraverso la vendita di token digitali. Le ICO hanno suscitato l'interesse degli investitori globali, ma sono state criticate per la mancanza di regolamentazione e per i numerosi casi di frodi che ne sono derivati. Nonostante le controversie, le ICO hanno rappresentato un passo importante verso la democratizzazione dell'accesso ai finanziamenti, rendendo le opportunità di investimento accessibili a un pubblico più vasto rispetto ai canali tradizionali⁹.

Con la maturazione del mercato, è cresciuto anche l'interesse delle istituzioni finanziarie e degli investitori professionali. Fondi di investimento, hedge fund e aziende hanno iniziato a includere le criptovalute nei propri portafogli, contribuendo a rafforzare la legittimità del settore. Tra gli esempi più rilevanti vi è stata l'adozione di Bitcoin nei bilanci aziendali di società come MicroStrategy e Tesla, segnando una crescente fiducia nelle criptovalute come riserva di valore. L'interesse istituzionale ha inoltre stimolato una maggiore attenzione da parte dei governi, spingendoli a esplorare modalità di regolamentazione e stabilizzazione del mercato.

Parallelamente, il settore della finanza decentralizzata (DeFi) ha acquisito slancio, offrendo servizi finanziari accessibili senza intermediari tradizionali¹⁰. Questa nuova modalità ha attratto un vasto pubblico di utenti in cerca di alternative ai servizi bancari convenzionali, contribuendo a una maggiore inclusione finanziaria. La DeFi ha rappresentato una vera rivoluzione, non solo per l'adozione della blockchain, ma anche per la trasformazione del rapporto tra individui, denaro e servizi finanziari, sfidando le strutture finanziarie tradizionali.

⁹Mougayar, W. (2016). *The Business Blockchain: Promise, Practice, and Application of the Next Internet Technology*. Wiley, pp. 65-70, 145-150.

¹⁰Schär, F. (2021). *Decentralized Finance: On Blockchain- and Smart Contract-Based Financial Markets*. Federal Reserve Bank of St. Louis Review, 103(2), pp. 153-174.

Anche l'emergere degli NFT ha giocato un ruolo importante nella diffusione delle criptovalute. Questi token non fungibili hanno suscitato l'interesse di artisti, creatori di contenuti e collezionisti, rendendo possibile la compravendita e la certificazione di proprietà di beni digitali unici. Gli NFT hanno così contribuito a una maggiore accettazione della blockchain al di fuori dell'ambito strettamente finanziario, aprendo nuove prospettive per l'economia creativa.



Figura 1: Crescita della capitalizzazione di mercato totale dei cripto-asset (2014-2024)¹¹

La Figura 1 riflette questa evoluzione, mostrando la crescita esponenziale della capitalizzazione di mercato totale dei cripto-asset dal 2014 al 2024. Si notano incrementi significativi in corrispondenza di eventi chiave come il boom delle ICO nel 2017 e l'espansione della DeFi tra il 2020 e il 2021. Nonostante le fluttuazioni dovute alla volatilità intrinseca del mercato e alle incertezze regolatorie, la tendenza generale indica un consolidamento e una crescente adozione dei cripto-asset a livello globale. Le proiezioni per il 2024 suggeriscono un ulteriore rafforzamento del settore, sostenuto dalle

¹¹CoinMarketCap (2024). Dati sulla capitalizzazione totale di mercato dei cripto-asset. Disponibili su: <https://coinmarketcap.com/charts/>.

continue innovazioni tecnologiche e dall'integrazione sempre maggiore dei cripto-asset nei sistemi finanziari tradizionali.

In sintesi, la crescita e l'adozione dei cripto-asset sono state plasmate da una serie di eventi e tendenze che ne hanno consolidato la posizione nel contesto economico globale. Questo percorso di crescita ha dimostrato il potenziale di questi strumenti non solo per trasformare il sistema finanziario, ma anche per modificare modelli economici e culturali su scala globale¹².

1.2 Introduzione ai cripto-asset e alla tecnologia DLT

I cripto-asset si definiscono come rappresentazioni digitali di valore o diritti, registrati e scambiati su tecnologie Distributed Ledger Technology (DLT), che sfruttano la crittografia per garantire la sicurezza delle transazioni e il controllo sulla creazione di nuove unità. La DLT non solo offre maggiore trasparenza e protezione rispetto ai sistemi centralizzati, ma apre anche scenari di innovazione in numerosi settori, dal finanziario e commerciale fino a quello artistico e culturale. Con l'aumento dell'adozione globale di questi strumenti, è essenziale comprenderne le diverse tipologie, le loro funzionalità e il potenziale che offrono.

1.2.1 Classificazione

I cripto-asset si suddividono in quattro categorie principali: criptovalute, token, stablecoin e NFT (Non-Fungible Tokens), ciascuna con caratteristiche e applicazioni specifiche che richiedono un'analisi approfondita.

Le *criptovalute* costituiscono la forma più nota di cripto-asset e sono progettate primariamente come mezzi di scambio digitali, resi sicuri dall'utilizzo di avanzati algoritmi crittografici che proteggono le transazioni e regolano l'emissione di nuove unità. La loro caratteristica centrale, ossia la decentralizzazione, le distingue nettamente dalle valute tradizionali, poiché le criptovalute non sono emesse né controllate da autorità centrali come banche o governi, bensì operano su reti distribuite che permettono il

¹²Allen, F., Gu, X., & Jagtiani, J. (2022). *Fintech, cryptocurrencies, and CBDC: Financial structural transformation in China*. *Journal of International Money and Finance*, 124, 102625.

trasferimento di valore direttamente tra utenti, senza intermediari. Un'altra qualità fondamentale di questi asset digitali è la fungibilità, ovvero la proprietà per cui ciascuna unità è identica e completamente intercambiabile con le altre della stessa valuta; per esempio, un Bitcoin ha lo stesso valore di un altro Bitcoin, il che rende le criptovalute ideali per il loro utilizzo come mezzo di scambio standardizzato. Tale fungibilità non solo facilita il calcolo e la trasmissione di valore, ma supporta anche la loro applicabilità in transazioni quotidiane. La sicurezza delle criptovalute, inoltre, è garantita dalla tecnologia della blockchain, che registra ogni transazione in un registro pubblico e immutabile, migliorando la trasparenza e la responsabilità dei processi e rendendo particolarmente difficile la frode e il riciclaggio di denaro. Poiché le transazioni non possono essere annullate una volta confermate, i rischi di frode risultano ulteriormente ridotti. Sebbene le criptovalute possano essere utilizzate per una varietà di scopi, tra cui l'acquisto di beni e servizi, il trasferimento di valore su scala globale e gli investimenti, la loro adozione è spesso limitata dall'elevata volatilità dei prezzi e dalla scarsa accettazione presso commercianti e istituzioni finanziarie, condizioni che portano molte persone a considerarle strumenti di investimento più che mezzi di scambio quotidiani¹³.

I *token*, emessi su blockchain preesistenti come Ethereum, rappresentano una seconda categoria di cripto-asset che, a differenza delle criptovalute, possono essere utilizzati per una varietà di scopi, tra cui la rappresentazione di diritti, beni o servizi all'interno di un ecosistema digitale. La loro creazione avviene tramite smart contract, protocolli che permettono di programmare condizioni predeterminate, assicurando che il token svolga le funzioni per le quali è stato creato. I token si suddividono principalmente in utility token e security token. Gli utility token, che forniscono accesso a un prodotto o servizio specifico, sono spesso utilizzati in ambito blockchain; un esempio è rappresentato dal Basic Attention Token (BAT), che premia gli utenti del browser Brave per la visualizzazione di annunci pubblicitari. Essi hanno inoltre trovato larga applicazione nelle campagne di crowdfunding, nelle quali gli investitori possono acquistare token in cambio dell'accesso a future funzionalità o servizi, secondo il modello di finanziamento noto

¹³Glaser, F. (2017). *Pervasive Decentralisation of Digital Infrastructures: A Framework for Blockchain Enabled System and Use Case Analysis*. Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1543-1552.

come Initial Coin Offering (ICO), che ha riscosso notevole successo nel biennio 2017-2018, attirando ingenti capitali in progetti e startup emergenti¹⁴. Al contrario, i security token rappresentano diritti di proprietà su attività come azioni o obbligazioni e sono soggetti a regolamentazioni simili a quelle dei titoli tradizionali. Questo tipo di token consente di “tokenizzare” asset convenzionali, facilitandone la negoziazione su piattaforme blockchain e migliorando l’accessibilità per gli investitori, oltre a offrire alle aziende nuove opportunità di raccolta fondi in modo più diretto ed efficiente. Un aspetto cruciale dei token è la loro programmabilità, che, attraverso l’uso di smart contract, permette di eseguire automaticamente funzioni come la distribuzione di dividendi o il pagamento di royalties. Grazie a questa versatilità, i token risultano adatti a numerose applicazioni che vanno dalla finanza decentralizzata (DeFi) alla gestione della catena di approvvigionamento, settori in cui la possibilità di automatizzare attività complesse incrementa l’efficienza e la tracciabilità.

Le *stablecoin* costituiscono una categoria di cripto-asset ideata per mantenere un valore stabile, grazie all’ancoraggio a un asset di riferimento, come una valuta fiat o una commodity. Questa stabilità è una risposta alla volatilità che caratterizza le criptovalute tradizionali, e rende le *stablecoin* particolarmente idonee all’uso quotidiano, semplificando le transazioni digitali e favorendo un’integrazione più agevole con il sistema finanziario tradizionale.

Tali strumenti si classificano principalmente in tre tipologie: garantiti da valuta fiat, garantiti da altri cripto-asset e algoritmici. I primi mantengono la loro stabilità attraverso riserve di valute tradizionali, come nel caso di Tether (USDT), ancorato in rapporto 1:1 con il dollaro statunitense¹⁵. I secondi utilizzano altri cripto-asset come garanzia, strutturando un sistema di collateralizzazione che permette di stabilizzare il valore del token. Infine, le *stablecoin* algoritmiche non si basano su asset fisici, bensì su algoritmi e smart contract che regolano in modo automatico l’offerta di moneta in risposta alla domanda. Questo approccio modulare conferisce alle *stablecoin* una particolare utilità per le transazioni quotidiane e gli scambi internazionali, poiché riduce i costi e i tempi di

¹⁴Fisch, C. (2019). *Initial Coin Offerings (ICOs) to Finance New Ventures*. *Journal of Business Venturing*, 34(1), pp. 1-22.

¹⁵Moin, S., Dev, J., & Fazal-e-Hasan, S. M. (2020). *Stablecoins: Bridging the Network Gap between Fiat Currency and Cryptocurrency*. *International Journal of Electronic Business*, 15(4), pp. 371-386.

trasferimento di denaro. Inoltre, nell'ambito della finanza decentralizzata (DeFi), rivestono un ruolo centrale, poiché forniscono liquidità e fungono da garanzia per prestiti e altre operazioni finanziarie.

Gli *NFT (Non-Fungible Tokens)* costituiscono una categoria unica di cripto-asset, ideata per rappresentare oggetti digitali non intercambiabili e dotati di caratteristiche uniche. A differenza delle criptovalute tradizionali, come Bitcoin o Ethereum, che sono fungibili e quindi interamente intercambiabili, ogni NFT è non fungibile e presenta peculiarità che lo rendono unico e distinto dagli altri. Tale unicità ha reso gli NFT particolarmente adatti a rappresentare beni digitali come opere d'arte, oggetti da collezione, musica e video.

La creazione di un questi asset avviene attraverso l'uso di smart contract che ne certificano l'autenticità e la proprietà. Questa tecnologia ha stimolato la loro popolarità soprattutto nel mondo dell'arte digitale, offrendo agli artisti nuove possibilità di monetizzazione del proprio lavoro. La blockchain, infatti, fornisce un registro trasparente e verificabile della proprietà degli NFT, riducendo il rischio di frodi e contraffazioni¹⁶. Inoltre, i creatori di questi token possono incorporare nei loro smart contract un sistema di royalties automatiche, che garantisce loro una percentuale su ogni successiva rivendita dell'opera, un meccanismo che conferisce agli artisti un ritorno economico continuo nel tempo.

I Non-Fungible Tokens hanno aperto nuove opportunità nel settore culturale e artistico, creando un mercato in rapida espansione per opere d'arte digitali e oggetti da collezione digitali. Molte celebrità, artisti e marchi stanno esplorando l'uso degli NFT come strumento innovativo per interagire con il pubblico e monetizzare il loro lavoro. Tuttavia, nonostante l'entusiasmo generato da questo nuovo mercato, questi strumenti sollevano anche alcune problematiche, tra cui le preoccupazioni sull'impatto ambientale legato alle blockchain utilizzate per la loro creazione e gestione, che richiedono soluzioni innovative e una costante attenzione.

Osservando la Figura 2, si nota come la crescita della capitalizzazione di mercato dei cripto-asset dal 2015 al 2024 rifletta chiaramente il ruolo assunto da ciascuna categoria

¹⁶Ante, L. (2021). *Non-fungible Token (NFT) Markets on the Ethereum Blockchain: Temporal Development, Cointegration and Interrelations*. *Journal of Industrial and Business Economics*, 48(2), pp. 237-260.

nell'evoluzione del settore. Bitcoin mantiene una dominanza significativa, mentre Ethereum segue un andamento in crescita grazie all'adozione degli smart contract. Parallelamente, le stablecoin acquisiscono importanza come "rifugio" meno volatile, soprattutto nelle fasi di mercato più incerte. Nel tempo, l'ecosistema si è poi ampliato, accogliendo altcoin e token di vario tipo, fino ad arrivare all'ingresso dei Non-Fungible Tokens (NFT) a partire dal 2020. Pur partendo da una quota iniziale ridotta, gli NFT hanno riscosso un'attenzione crescente, specialmente in settori come l'arte e il collezionismo, contribuendo a diversificare ulteriormente il panorama crypto e favorendo l'emergere di nuovi casi d'uso della tecnologia blockchain.



Figura 2: Crescita della capitalizzazione di mercato totale dei crypto-asset per categoria (2015-2024)¹⁷

1.2.2 Tecnologie sottostanti

I crypto-asset si fondano su tecnologie innovative che stanno trasformando il modo in cui le transazioni vengono eseguite e gestite, con la Distributed Ledger Technology (DLT) e la blockchain al centro di questo cambiamento epocale. Queste tecnologie forniscono la struttura necessaria per garantire sicurezza, trasparenza e decentralizzazione,

¹⁷CoinMarketCap (2025). Dati sulla capitalizzazione totale di mercato dei crypto-asset per categoria. Disponibili su: <https://coinmarketcap.com/charts/>.

rappresentando il fondamento su cui si basano non solo i cripto-asset ma anche numerose altre applicazioni innovative in svariati settori.

La Distributed Ledger Technology (DLT) è un sistema decentralizzato che consente la registrazione e la condivisione delle informazioni tra più nodi, eliminando la necessità di un controllo centralizzato. A differenza dei tradizionali sistemi centralizzati, in cui un'unica entità gestisce e verifica i dati, nella DLT il controllo è distribuito tra tutti i partecipanti alla rete: ogni nodo possiede una copia del registro e ogni modifica deve essere verificata e accettata da un numero significativo di nodi. Questo approccio riduce i rischi di frode e manipolazione, in quanto non esiste un unico punto vulnerabile che possa essere attaccato¹⁸.

Le DLT si suddividono in varie tipologie, tra cui reti pubbliche e private. Le reti pubbliche, accessibili a chiunque, promuovono una maggiore trasparenza, mentre le reti private limitano l'accesso a partecipanti selezionati, spesso per motivi di sicurezza e riservatezza. Una forma ibrida è rappresentata dalle reti consortili, che combinano elementi di entrambe, consentendo a un gruppo di organizzazioni di gestire un registro comune. Un aspetto cruciale della DLT è l'immutabilità delle informazioni: una volta registrata, una transazione diventa parte permanente del sistema e non può essere modificata o eliminata senza il consenso della rete, garantendo una storia verificabile e sicura delle transazioni¹⁹. La crittografia è fondamentale in questo processo, proteggendo le informazioni e limitando l'accesso ai soli soggetti autorizzati.

La DLT offre anche vantaggi economici significativi, derivanti dal fatto che riduce la necessità di intermediari tradizionali, come banche e istituzioni finanziarie. Di conseguenza, le transazioni risultano più rapide e meno costose, un aspetto particolarmente vantaggioso per le operazioni internazionali, dove i costi e i tempi di attesa sono normalmente più elevati²⁰. In sintesi, la DLT fornisce un modo più efficiente

¹⁸Yaga, D., Mell, P., Roby, N., & Scarfone, K. (2019). *Blockchain Technology Overview*. National Institute of Standards and Technology (NIST), pp. 1-10.

¹⁹Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017). *An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends*. 2017 IEEE International Congress on Big Data, pp. 557-564.

²⁰Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. (2016). *Bitcoin and Cryptocurrency Technologies*. Princeton University.

e sicuro per gestire i trasferimenti di valore e di diritti, con implicazioni significative per una varietà di settori.

La blockchain rappresenta una forma specifica di DLT che ha raggiunto ampia popolarità grazie al suo utilizzo nel settore dei cripto-asset. Organizza i dati in blocchi concatenati, creando una catena cronologica che funge da registro immutabile delle transazioni. Ogni blocco contiene un insieme di transazioni, un timestamp (data e l'ora in cui un blocco è stato creato) e l'hash del blocco precedente (codice univoco che collega un blocco al precedente), garantendo una struttura che rende difficile alterare le informazioni senza il consenso di tutta la rete.

Un elemento chiave della blockchain è rappresentato dagli algoritmi di consenso, che assicurano la validità delle transazioni e l'accordo tra i nodi riguardo all'ordine delle operazioni. Questi algoritmi consentono alla rete di mantenere coerenza e integrità, assicurando che ogni nuovo blocco aggiunto alla catena sia verificato e confermato dalla maggioranza dei partecipanti. Tale meccanismo rende la blockchain resistente alle manomissioni e garantisce che tutte le transazioni siano registrate in modo affidabile e sicuro. Gli smart contract costituiscono un altro aspetto innovativo della blockchain, in quanto permettono l'esecuzione automatica di transazioni e processi al verificarsi di condizioni prestabilite. Attraverso questi contratti programmabili, le operazioni che richiedevano un intervento umano possono essere ora automatizzate, riducendo il rischio di errore, accelerando i tempi di esecuzione e abbattendo i costi operativi. Gli smart contract sono fondamentali per lo sviluppo delle applicazioni decentralizzate (dApp) sulla blockchain, che spaziano dalla finanza decentralizzata (DeFi) all'arte digitale²¹.

Le applicazioni delle tecnologie DLT e blockchain vanno ben oltre l'ambito dei cripto-asset. In campo logistico, ad esempio, la blockchain viene utilizzata per tracciare l'origine dei prodotti, assicurando l'autenticità e l'etica dei processi produttivi, un aspetto sempre più rilevante in un'epoca in cui i consumatori chiedono maggiore trasparenza e responsabilità alle aziende²².

²¹King, S., & Nadal, S. (2012). *PPCoin: Peer-to-Peer Crypto-Currency with Proof-of-Stake*. Disponibile su: <https://peercoin.net/assets/paper/peercoin-paper.pdf>.

²²Buterin, V. (2014). *Ethereum: A Next Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*. Disponibile su: <https://ethereum.org/en/whitepaper/>.

Nel settore sanitario, la blockchain consente una gestione sicura dei dati medici, permettendo ai pazienti di mantenere il controllo sulle proprie informazioni sanitarie e garantendo che solo i professionisti autorizzati possano accedervi. Questo non solo migliora la sicurezza dei dati, ma promuove anche una maggiore efficienza nella condivisione delle informazioni tra fornitori di servizi sanitari²³.

Il futuro dei cripto-asset sarà probabilmente caratterizzato da ulteriori sviluppi nelle tecnologie blockchain e DLT. Con l'avanzare di queste innovazioni, è plausibile attendersi l'emergere di nuove applicazioni e modelli di business che potrebbero trasformare il modo in cui operiamo e interagiamo, influenzando significativamente un'economia sempre più digitalizzata e interconnessa.

1.2.3 Benefici della blockchain

La tecnologia blockchain si fonda su tre caratteristiche essenziali che ne determinano il valore e la portata applicativa: trasparenza, sicurezza e decentralizzazione. Ciascuna di queste qualità è fondamentale per il funzionamento della blockchain, e contribuisce in modo sostanziale alla sua affidabilità, alla fiducia che genera tra gli utenti e alle numerose applicazioni possibili nei diversi settori.

Una delle caratteristiche più distintive della blockchain è la sua *trasparenza*. Ogni transazione registrata su una blockchain è accessibile a tutti i partecipanti della rete, offrendo un livello di visibilità unico che permette a chiunque di accedere al registro e verificarne l'accuratezza. Questa trasparenza non solo migliora la fiducia tra le parti coinvolte nelle transazioni, ma rappresenta anche un metodo efficace per monitorare e tracciare lo spostamento di beni e valori lungo tutta la catena²⁴.

La trasparenza riduce ulteriormente i rischi di frodi e pratiche ingannevoli. Nei sistemi tradizionali, la mancanza di accesso diretto e pubblico alle informazioni relative alle transazioni può portare a comportamenti poco etici e a manipolazioni. Con la blockchain, qualsiasi tentativo di alterare o manipolare i dati risulta immediatamente visibile, poiché

²³Kshetri, N. (2018). *Blockchain's Roles in Meeting Key Supply Chain Management Objectives*. International Journal of Information Management, 39, pp. 80–89.

²⁴Kouhizadeh, M., & Sarkis, J. (2018). *Blockchain Practices, Potentials, and Perspectives in Greening Supply Chains*. Sustainability, 10(10), Articolo 3652.

ogni modifica deve essere approvata dalla maggioranza della rete. Questa caratteristica non solo protegge le aziende da comportamenti disonesti, ma favorisce anche un ambiente di scambio più equo.

Un esempio concreto di applicazione della trasparenza tramite blockchain è l'uso di registri pubblici per la gestione delle elezioni, poiché la tecnologia garantisce che ogni voto sia registrato in modo sicuro, e che i risultati siano tracciabili e verificabili. Ciò aumenta la fiducia pubblica nei processi democratici, riducendo il rischio di frodi elettorali²⁵.

La *sicurezza* rappresenta un'altra caratteristica fondamentale della tecnologia blockchain, grazie alla quale è possibile proteggere in modo efficace i dati registrati e garantire l'integrità delle transazioni. Le informazioni inserite su una blockchain sono salvaguardate da avanzati sistemi crittografici che rendono estremamente difficile per chiunque tentare di alterarle senza essere rilevato. Ogni transazione viene crittografata e collegata al blocco precedente tramite un hash, formando così una catena continua di blocchi interconnessi che rafforza la sicurezza e rende la struttura resistente alle frodi e alle manomissioni²⁶.

Un ruolo essenziale nella sicurezza della blockchain è svolto dagli algoritmi di consenso, che stabiliscono regole condivise per la convalida delle transazioni e l'aggiunta di nuovi blocchi. I due algoritmi di consenso più diffusi sono il Proof of Work e il Proof of Stake. Il Proof of Work richiede che i cosiddetti "miner" risolvano complessi problemi matematici per confermare le transazioni, aggiungendo così nuovi blocchi alla catena. Tuttavia, questo processo è particolarmente intensivo in termini di risorse computazionali e di energia, tanto da sollevare preoccupazioni riguardo all'impatto ambientale di grandi reti come Bitcoin²⁷. Pur avendo un notevole impatto energetico, il PoW ha dimostrato di essere efficace nel garantire la sicurezza della blockchain, grazie alla difficoltà intrinseca di risolvere i problemi matematici che protegge la rete da attacchi.

²⁵Hjalmarsson, F., Hreidarsson, G. K., Hamdaqa, M., & Hjalmtýsson, G. (2018). *Blockchain-Based E-Voting System*. 2018 IEEE International Conference on Cloud Computing, pp. 983-986.

²⁶Underwood, S. (2016). *Blockchain Beyond Bitcoin*. Communications of the ACM, 59(11), pp. 15-17.

²⁷Stoll, C., Klaaßen, L., & Gellersdörfer, U. (2019). *The Carbon Footprint of Bitcoin*. Joule, 3(7), pp. 1647-1661.

Il Proof of Stake, in alternativa, seleziona i validatori delle transazioni in base alla quantità di criptovaluta posseduta e “messa in gioco” dai partecipanti²⁸. Questo meccanismo di validazione, considerato più sostenibile dal punto di vista energetico rispetto al PoW, permette di ridurre significativamente il consumo di risorse, migliorando al contempo la velocità di validazione delle transazioni. I validatori in un sistema PoS sono incentivati a mantenere la rete sicura, poiché eventuali comportamenti fraudolenti potrebbero portare alla perdita dei fondi che hanno “messo in gioco”.

La robusta sicurezza offerta dalla blockchain trova applicazioni particolarmente significative nel settore finanziario, dove la protezione contro frodi e minacce informatiche rappresenta una priorità crescente per molte istituzioni. La blockchain fornisce un ambiente sicuro per l'esecuzione delle transazioni, poiché la struttura decentralizzata rende il sistema meno vulnerabile ai guasti rispetto ai tradizionali sistemi centralizzati, in cui una singola violazione della sicurezza può compromettere l'intero sistema. Inoltre, la blockchain protegge i dati da attacchi esterni, offrendo una sicurezza contro la perdita accidentale o dolosa di informazioni²⁹.

Un ulteriore aspetto che aumenta la sicurezza della blockchain è la sua caratteristica di immutabilità. Una volta che un blocco è stato aggiunto alla catena, non può essere modificato o cancellato senza il consenso della rete, il che rende il sistema di registrazione altamente resistente ai tentativi di modifica non autorizzati³⁰. Questa proprietà è particolarmente preziosa in ambiti legali e normativi, dove la possibilità di dimostrare l'integrità e la veridicità delle informazioni registrate è cruciale per la fiducia e l'adozione della tecnologia stessa.

La *decentralizzazione* rappresenta una delle innovazioni più rilevanti della tecnologia blockchain, poiché ribalta il modello tradizionale in cui un'entità centrale esercita controllo su tutte le operazioni. In una rete blockchain, infatti, il potere e la responsabilità sono distribuiti equamente tra i nodi, ovvero tra i partecipanti della rete stessa, eliminando la necessità di un'autorità centrale. Questo approccio non solo migliora la resilienza del

²⁸Saleh, F. (2021). *Blockchain without Waste: Proof-of-Stake*. The Review of Financial Studies, 34(3), pp. 1156-1190.

²⁹Guo, Y., & Liang, C. (2016). *Blockchain Application and Outlook in the Banking Industry*. Financial Innovation, 2(1), Articolo 24.

³⁰Atzori, M. (2015). *Blockchain Technology and Decentralized Governance: Is the State Still Necessary?*.

sistema, ma riducendo la dipendenza da intermediari, si eliminano costi aggiuntivi e rallentamenti delle operazioni.

L'assenza di un organo centrale permette agli utenti di interagire direttamente, facilitando transazioni peer-to-peer rapide e riducendo significativamente i costi operativi. Questa velocità è resa possibile dal fatto che le operazioni vengono validate collettivamente dai nodi della rete, piuttosto che passare attraverso lunghi processi di autorizzazione centralizzati³¹.

Un altro importante vantaggio della decentralizzazione è la promozione di un ambiente più dinamico, che incentiva la concorrenza e l'innovazione. Grazie alla blockchain, si possono sviluppare nuovi modelli di business che sfidano le strutture tradizionali, offrendo una maggiore varietà di servizi e opportunità per gli utenti. In questo modo, gli utenti possono accedere ai servizi finanziari senza intermediari, creando un ecosistema più inclusivo, trasparente e accessibile, specialmente per coloro che hanno difficoltà ad accedere ai servizi bancari tradizionali.

La decentralizzazione, inoltre, contribuisce a una maggiore resilienza del sistema complessivo. Non essendoci un singolo punto di controllo, la rete è intrinsecamente meno vulnerabile a guasti e attacchi mirati, poiché ogni nodo contribuisce alla sicurezza e alla stabilità dell'intera infrastruttura. In un contesto in cui la sicurezza dei dati e la continuità delle operazioni sono priorità assolute per molte organizzazioni, questa caratteristica fa della blockchain una tecnologia particolarmente adatta per ambienti che richiedono affidabilità e resistenza a lungo termine³².

1.2.4 Implicazioni ambientali del Proof of Work

La tecnologia blockchain ha aperto nuove prospettive per l'interazione economica e sociale, offrendo significativi vantaggi in termini di trasparenza e sicurezza. Tuttavia, il meccanismo di consenso noto come Proof of Work, impiegato da Bitcoin e altre

³¹Peters, G. W., & Panayi, E. (2016). *Understanding Modern Banking Ledgers through Blockchain Technologies: Future of Transaction Processing and Smart Contracts on the Internet of Money*. Banking Beyond Banks and Money, pp. 239-278.

³²Voshmgir, S. (2020). *Token Economy: How Blockchains and Smart Contracts Revolutionize the Economy*. BlockchainHub Berlin, pp. 55-60.

criptovalute, comporta sfide ambientali di vasta portata, principalmente legate all'elevato consumo energetico richiesto e al conseguente impatto ecologico.

Il Proof of Work richiede ai miner di competere nella risoluzione di complessi calcoli matematici, un processo che consente di convalidare le transazioni e di aggiungere nuovi blocchi alla blockchain. Questa competizione, comunemente chiamata "mining", richiede enormi quantità di energia. Secondo alcune stime, il consumo energetico annuale della rete Bitcoin supera quello di interi paesi, come l'Irlanda o l'Argentina³³.

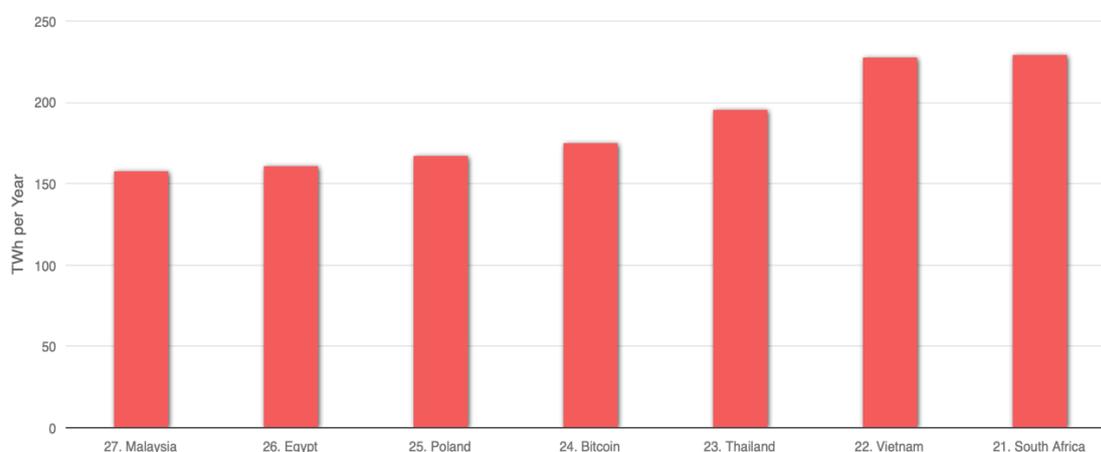


Figura 3: Consumo energetico annuale di Bitcoin (PoW) confrontato con alcuni paesi (in TWh)³⁴

La Figura 3 illustra questa problematica, confrontando il consumo energetico annuo di Bitcoin con quello di alcuni paesi. Come si può osservare, il consumo di Bitcoin (circa 150 TWh/anno) è paragonabile a quello di nazioni come Polonia, Thailandia e Vietnam. Questo dato evidenzia chiaramente la portata del problema e la necessità di affrontare il fabbisogno energetico legato al mining delle criptovalute. Tali livelli di consumo hanno sollevato crescenti preoccupazioni sull'impatto ambientale del mining di criptovalute, soprattutto per quanto riguarda le implicazioni sul cambiamento climatico.

Il mining si concentra spesso in regioni in cui l'elettricità è relativamente economica, il che implica che molte di queste operazioni siano alimentate da fonti di energia non

³³De Vries, A. (2018). *Bitcoin's Growing Energy Problem*. *Joule*, 2(5), pp. 801–805.

³⁴Digiconomist (2024). Dati sul consumo energetico annuale di Bitcoin (PoW) rispetto a quello di vari paesi. Disponibili su: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>.

rinnovabili, come il carbone e il gas naturale. Sebbene queste fonti siano economicamente vantaggiose, sono tra le più inquinanti. Alcuni studi stimano che il mining di Bitcoin contribuisca circa per lo 0,5% alle emissioni globali di CO2 all'anno, con effetti negativi sul riscaldamento globale e sulla qualità dell'aria³⁵.

La Figura 4 fornisce un'ulteriore prospettiva sul problema, mostrando la percentuale del fabbisogno energetico nazionale che potrebbe essere coperta utilizzando il consumo energetico di Bitcoin. Ad esempio, il consumo energetico di Bitcoin rappresenta più del 200% del fabbisogno energetico della Repubblica Ceca e oltre il 100% di quello dei Paesi Bassi. Anche in nazioni più grandi, come l'Italia e il Regno Unito, il consumo di Bitcoin equivale a una percentuale significativa del fabbisogno energetico nazionale, evidenziando il potenziale impatto di questa tecnologia se non regolamentata o ottimizzata in termini di sostenibilità.

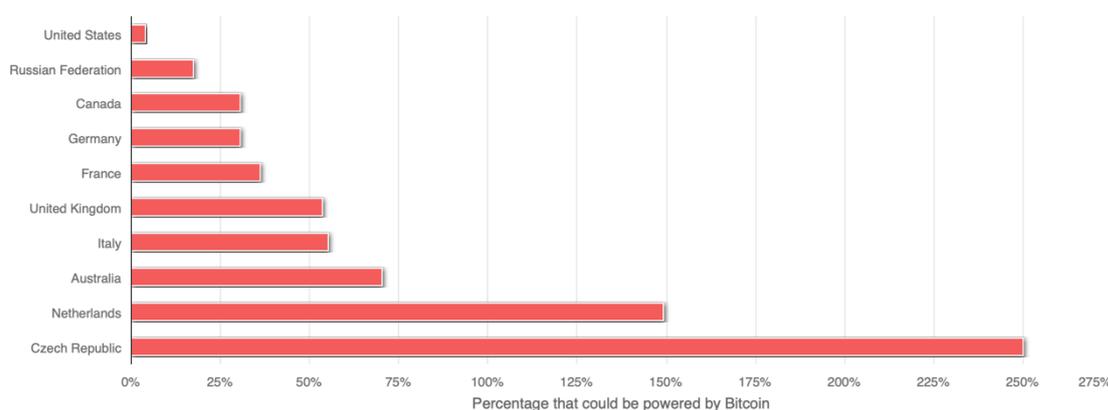


Figura 4: Percentuale del fabbisogno energetico nazionale che potrebbe essere coperta utilizzando il consumo energetico di Bitcoin (PoW)³⁶

L'alto consumo energetico legato alle operazioni di estrazione di criptovalute comporta anche conseguenze economiche e sociali. In alcune regioni, l'aumento di queste attività

³⁵Stoll, C., Klaufen, L., & Gallersdörfer, U. (2019). *The Carbon Footprint of Bitcoin*. *Joule*, 3(7), pp. 1647–1661.

³⁶Digiconomist (2024). Dati sulla percentuale del fabbisogno energetico nazionale che potrebbe essere coperta utilizzando il consumo energetico di Bitcoin (PoW). Disponibili su: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>.

ha portato a rialzi nei prezzi dell'elettricità per i consumatori locali, poiché l'energia viene dirottata verso i processi di mining. Questa situazione può generare conflitti per l'accesso all'energia, soprattutto in aree in cui le risorse energetiche sono già limitate. La competizione tra i miner e gli utenti domestici o commerciali può quindi causare tensioni, influenzando negativamente la qualità della vita delle comunità locali³⁷.

In risposta a queste preoccupazioni, alcuni operatori stanno cercando di adottare fonti di energia rinnovabile per alimentare le loro attività. Tuttavia, l'adozione su larga scala di pratiche sostenibili non è sempre fattibile, soprattutto a causa dei significativi investimenti iniziali necessari. Diversi miner hanno provato a stabilirsi in aree dotate di risorse rinnovabili abbondanti, come le regioni con impianti idroelettrici, ma questi progetti incontrano spesso ostacoli di natura normativa o limitazioni infrastrutturali³⁸.

Le problematiche legate al consumo energetico del PoW non riguardano solo Bitcoin, ma anche altre criptovalute. Questo ha generato un dibattito più ampio sul futuro di questi asset e sulla necessità di trovare soluzioni alternative più ecologiche. Gli impatti ambientali del mining stanno influenzando la percezione pubblica del settore e hanno portato all'avvio di discussioni su una possibile regolamentazione più severa da parte dei governi.

Le critiche rivolte al PoW includono anche considerazioni sulla sostenibilità a lungo termine di questo modello. Con la crescente domanda di criptovalute, si prevede un aumento del consumo energetico, con un ulteriore aggravamento degli impatti ambientali. Gli esperti avvertono che, se il settore non affronta queste sfide, potrebbe trovarsi di fronte a critiche ancora più severe e a regolamentazioni restrittive, rendendo urgente una transizione verso soluzioni più sostenibili³⁹.

Tra queste, il Proof of Stake sta guadagnando terreno, poiché richiede un consumo energetico nettamente inferiore rispetto al Proof of Work. In questo modello, i validatori delle transazioni vengono selezionati in base alla quantità di criptovaluta posseduta e

³⁷Li, Y., & Wang, Y. (2019). *Economic Impact of Cryptocurrency Mining on Local Energy Consumption and Prices*. *Energy Policy*, 129, pp. 435–444.

³⁸Truby, J. (2018). *Decarbonizing Bitcoin: Law and Policy Choices for Reducing the Energy Consumption of Blockchain Technologies and Digital Currencies*. *Energy Research & Social Science*, 44, pp. 399–410.

³⁹O'Dwyer, K.J., & Malone, D. (2014). *Bitcoin Mining and its Energy Footprint*. 25th IET Irish Signals and Systems Conference (ISSC 2014), pp. 280–285.

"messa in gioco" nella rete, il che riduce il fabbisogno energetico e consente una validazione delle transazioni più rapida ed efficiente. Criptovalute come Ethereum stanno completando la migrazione verso il PoS per affrontare le critiche ambientali rivolte al PoW e migliorare la loro sostenibilità a lungo termine.

Tuttavia, la transizione verso modelli energeticamente sostenibili presenta anche sfide significative. Molti miner tradizionali, che hanno investito ingenti risorse nelle infrastrutture PoW, sono riluttanti al cambiamento, poiché questo meccanismo, pur richiedendo molta energia, ha dimostrato di garantire un alto livello di sicurezza e stabilità. Inoltre, le normative ambientali variano notevolmente tra i diversi paesi, rendendo complessa la regolamentazione del settore. I governi si trovano di fronte al delicato compito di regolamentare le attività di mining per mitigarne l'impatto ambientale, senza tuttavia soffocare l'innovazione e le opportunità di crescita economica che derivano dallo sviluppo delle criptovalute⁴⁰.

Un'altra importante critica al PoW è legata ai rischi di centralizzazione. Poiché il mining richiede attrezzature costose e un elevato consumo di energia, il settore tende a essere dominato da grandi aziende o pool di mining che dispongono delle risorse necessarie per competere a livello globale. Questa concentrazione di potere può minare il principio della decentralizzazione, pilastro fondamentale della tecnologia blockchain, poiché il controllo della rete può finire nelle mani di un numero ristretto di attori⁴¹. Tale centralizzazione può rendere la rete più vulnerabile e meno sicura, poiché un piccolo gruppo di partecipanti potrebbe controllare la maggior parte della potenza di calcolo.

Oltre all'efficienza energetica, l'innovazione nel settore delle criptovalute dovrebbe considerare l'intero ciclo di vita delle tecnologie blockchain. È cruciale valutare l'impatto ambientale ed etico di tutte le fasi, dalla produzione delle attrezzature di mining alla gestione dei rifiuti elettronici generati, fino alle conseguenze sociali delle operazioni di mining sulle comunità locali. Adottare un approccio olistico alla sostenibilità è fondamentale per evitare che le criptovalute affrontino critiche non solo ambientali, ma anche sociali e etiche.

⁴⁰Lemma, V. (2022). *Quali Controlli Per Le Valute Virtuali?*. Rivista Trimestrale di Diritto dell'Economia.

⁴¹Gencer, A.E., Basu, S., Eyal, I., Van Renesse, R., & Sirer, E.G. (2018). *Decentralization in Bitcoin and Ethereum Networks*. International Conference on Financial Cryptography and Data Security, pp. 439–457.

L'adozione di pratiche più sostenibili non è solo una questione di immagine, ma un vero e proprio imperativo commerciale. Con un numero crescente di investitori e consumatori attenti all'impatto ambientale, le aziende del settore sono spinte a rispondere a questa domanda di sostenibilità. Di conseguenza, le criptovalute che adottano modelli più ecologici potrebbero ottenere un vantaggio competitivo, rafforzando la loro posizione sul mercato e attirando un pubblico di investitori e utenti sempre più attento alle questioni ambientali⁴².

Alcuni progetti stanno già implementando pratiche più sostenibili, come l'uso di energia rinnovabile per alimentare le operazioni di mining. In Islanda, ad esempio, alcune strutture di estrazione utilizzano l'energia geotermica, riducendo significativamente le emissioni di carbonio e abbattendo i costi operativi⁴³. Tuttavia, l'accesso a fonti rinnovabili non è sempre praticabile per tutte le operazioni, e le differenze geografiche continuano a giocare un ruolo importante nel determinare l'impatto ambientale di queste infrastrutture.

Inoltre, è fondamentale che i progetti di criptovalute adottino pratiche di trasparenza riguardo al loro impatto ambientale. L'implementazione di standard di rendicontazione e certificazione per il consumo energetico e le emissioni di carbonio potrebbe non solo contribuire a migliorare la trasparenza del settore, ma anche incentivare le aziende a praticare una maggiore responsabilità ambientale. Questo tipo di approccio potrebbe attrarre investitori socialmente responsabili e contribuire a creare un ambiente competitivo più equo, in cui la sostenibilità diventa un criterio di valutazione essenziale⁴⁴.

⁴²O'Dair, M., & Beaven, Z. (2019). *The Networked Musician: Blockchain and Decentralization as Opportunity for Independence*. *The Creative Industries Journal*, 12(1), pp. 12–24.

⁴³Mellerud J. (2023). *Bitcoin Mining Around the World: Islanda*. Disponibile su: <https://hashrateindex.com/blog/bitcoin-mining-around-the-world-iceland/>.

⁴⁴Giungato, P., Rana, R., Tarabella, A., & Tricase, C. (2017). *Current Trends in Sustainability of Bitcoins and Related Blockchain Technology*. *Sustainability*, 9(12), 2214.

1.3 L'impatto della regolamentazione MiCA nel mercato dei cripto-asset

L'emergere dei cripto-asset ha portato le autorità europee ad affrontare sfide normative complesse, costringendole a confrontarsi con un settore in rapida evoluzione e a cercare di rispondere alla velocità con cui il mercato si è sviluppato. Prima dell'introduzione del Regolamento MiCA (Markets in Crypto-Assets), il contesto normativo europeo era caratterizzato da un approccio frammentato e, spesso, poco incisivo, con diverse lacune che MiCA si propone ora di colmare.

Una delle prime iniziative normative a livello europeo risale al 2014, con l'adozione della Direttiva 2014/65/UE, meglio conosciuta come MiFID II, il cui scopo era aggiornare e ristrutturare la regolamentazione dei mercati finanziari. Tuttavia, questa direttiva non trattava esplicitamente le criptovalute, e le sue disposizioni non erano in grado di classificare adeguatamente i cripto-asset come strumenti finanziari, lasciando gli investitori in una situazione di incertezza e vulnerabilità⁴⁵. Mancavano inoltre requisiti chiari per la registrazione e la supervisione dei fornitori di servizi di cripto-asset, creando così un vuoto normativo significativo⁴⁶.

Nel 2015, l'Unione Europea introdusse la Direttiva (UE) 2015/849 per affrontare le questioni legate al riciclaggio di denaro e al finanziamento del terrorismo, estendendo per la prima volta le disposizioni AML (Anti-Money Laundering) anche ai fornitori di servizi di cambio e custodia di criptovalute. Sebbene questa direttiva imponesse obblighi di registrazione e verifica dell'identità, non forniva un quadro normativo uniforme e coerente, generando confusione tra le giurisdizioni e limitando l'efficacia delle autorità di vigilanza nel contrastare attività illecite⁴⁷. La mancanza di standardizzazione nelle misure di conformità ha, infatti, portato a disparità significative, rendendo difficile un approccio coordinato a livello europeo.

⁴⁵Pellegrini, M. (2021). *Transparency and Circulation of Cryptocurrencies*. Open Review of Management, Banking and Finance.

⁴⁶European Parliament. (2014). *Directive 2014/65/EU on markets in financial instruments (MiFID II)*. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0065>.

⁴⁷European Parliament. (2015). *Directive (EU) 2015/849 of the European Parliament and of the Council*. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L0849>.

Nel 2018, il Gruppo di Azione Finanziaria (FATF) ha emesso una serie di raccomandazioni per incoraggiare le giurisdizioni a includere i cripto-asset nelle proprie legislazioni anti-riciclaggio (AML). Tuttavia, l'applicazione di queste raccomandazioni in Europa è risultata disomogenea, aggravando ulteriormente il quadro normativo frammentato e aggiungendo complessità al settore dei cripto-asset. Senza un quadro regolamentare comune, le autorità di vigilanza non sono riuscite a implementare misure coerenti per prevenire gli abusi nel mercato delle criptovalute, mettendo in evidenza la necessità di una regolamentazione armonizzata e strutturata.

Con la Direttiva (UE) 2018/843, l'Unione Europea ha ulteriormente aggiornato le leggi AML, ampliando l'ambito di applicazione per includere espressamente i fornitori di servizi di cripto-asset. Tuttavia, anche in questo caso, l'attuazione e il livello di enforcement sono risultati variabili tra gli Stati membri⁴⁸. Nonostante l'introduzione di requisiti più stringenti e di obblighi di registrazione, il panorama normativo europeo è rimasto privo di misure adeguate alla protezione degli investitori e di direttive chiare per la gestione dei rischi connessi ai cripto-asset.

Consapevole di queste lacune e delle sfide normative, la Commissione Europea, nel 2020, ha presentato un piano d'azione per la finanza digitale, sottolineando l'urgenza di una regolamentazione coerente e armonizzata per i cripto-asset e auspicando un quadro normativo in grado di garantire maggiore trasparenza e stabilità. Questo piano ha portato alla proposta del Regolamento MiCA, il quale si propone di garantire che il mercato dei cripto-asset in Europa sia regolato in modo efficace, trasparente e responsabile⁴⁹. Tra le problematiche che questo regolamento intende affrontare vi sono la necessità di assicurare una maggiore trasparenza nella comunicazione delle informazioni, la protezione degli investitori, la gestione dei rischi legati alle fluttuazioni di mercato, e le questioni ambientali connesse al mining.

⁴⁸European Parliament. (2018). *Directive (EU) 2018/843*. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0843>.

⁴⁹European Commission. (2020). *Digital Finance Package: A European Strategy for Digital Finance*. Disponibile su: https://ec.europa.eu/info/publications/200924-digital-finance-proposals_en.

1.3.1 Struttura del regolamento

Il Regolamento MiCA, presentato dalla Commissione Europea nel 2020 e pubblicato nella Gazzetta Ufficiale dell'UE nel giugno 2023, ha costituito un passaggio fondamentale nella regolamentazione dei cripto-asset all'interno dell'Unione Europea. In base a quanto previsto, le norme relative alle stablecoin sono entrate in vigore nel giugno 2024, mentre il resto delle disposizioni ha trovato applicazione a partire da gennaio 2025. Il testo prevede una suddivisione in categorie ben definite, ognuna soggetta a specifici requisiti normativi e a meccanismi di controllo e supervisione, con l'obiettivo di garantire sicurezza e conformità del mercato.

La classificazione dei cripto-asset in MiCA è basata su un'analisi dettagliata dei rischi e delle caratteristiche peculiari di ogni tipo di asset⁵⁰. Un primo criterio di classificazione è la *funzione economica e l'uso previsto* dell'asset, che determina se quest'ultimo serve principalmente come mezzo di scambio, riserva di valore o come strumento per accedere a beni o servizi specifici all'interno di un sistema basato su blockchain. Ad esempio, criptovalute come Bitcoin ed Ethereum sono utilizzate come mezzi di pagamento e riserve di valore, mentre i cosiddetti "token di utilità" sono concepiti per offrire accesso a funzionalità o servizi su piattaforme decentralizzate.

Un secondo criterio chiave riguarda la *standardizzazione e la fungibilità* dell'asset, ossia la possibilità che ciascuna unità dell'asset sia scambiabile con un'altra senza perdita di valore; in caso contrario, l'asset viene considerato "non fungibile" (come nel caso degli NFT). La fungibilità è essenziale per mantenere elevati livelli di liquidità e di efficienza nel mercato, favorendo transazioni rapide e riducendo i costi legati agli scambi.

MiCA esamina inoltre l'*impatto sistemico dei cripto-asset*, valutando il potenziale rischio per la stabilità economica e finanziaria dell'Unione Europea e individuando gli asset che potrebbero avere un'influenza rilevante sull'intero sistema⁵¹. Un esempio significativo è quello delle stablecoin, che, data la loro natura ancorata a valute fiat e la possibilità di

⁵⁰European Commission. (2020). *Impact Assessment accompanying the Proposal for MiCA*. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020SC0380>.

⁵¹European Central Bank. (2020). *Stablecoins in the euro area*. Disponibile su: <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/scpops/ecb.op247~fe3df92991.en.pdf>.

un'ampia adozione, potrebbero generare conseguenze significative sulla stabilità finanziaria se non regolamentate in modo adeguato.

Infine, il regolamento considera i *rischi legali e di conformità*, assicurandosi che i cripto-asset rispettino le normative vigenti in materia di prevenzione del riciclaggio di denaro e del finanziamento del terrorismo⁵². Per soddisfare tali requisiti, agli emittenti è richiesto di adottare solidi sistemi di governance e di gestione dei rischi, garantendo che i cripto-asset non siano utilizzati per scopi illeciti e proteggendo così l'integrità del sistema finanziario.

Grazie a questi criteri di classificazione, MiCA consente di applicare normative specifiche e proporzionate, calibrando le misure di protezione e regolamentazione sui rischi e sulle caratteristiche distintive di ciascuna categoria di cripto-asset.

Il Regolamento MiCA suddivide i cripto-asset in tre categorie principali, ognuna soggetta a requisiti normativi specifici:

- *Criptovalute*: Come definito dall'Articolo 4 di MiCA, le criptovalute sono valute digitali concepite principalmente per fungere da mezzo di scambio e riserva di valore, come nel caso di Bitcoin ed Ethereum. Per la loro natura decentralizzata e l'elevata volatilità, le criptovalute sono soggette a requisiti rigorosi per garantire transazioni sicure e conformità normativa, proteggendo così gli investitori dai rischi tipici di questo mercato. Gli emittenti sono tenuti ad assicurare trasparenza nelle operazioni e sicurezza nelle transazioni, minimizzando così i rischi di frodi e manipolazioni.
- *Token di Utilità*: Descritti nell'Articolo 5, i token di utilità consentono l'accesso a beni o servizi all'interno di un ecosistema blockchain, come piattaforme decentralizzate o applicazioni specifiche. Pur non essendo considerati strumenti finanziari tradizionali, questi token devono rispettare norme di trasparenza affinché gli utenti possano comprendere chiaramente i diritti e i rischi associati. Informazioni chiare e complete aiutano a creare un mercato più consapevole e responsabile, riducendo il rischio di truffe e favorendo una concorrenza leale tra gli operatori del settore.

⁵²Financial Action Task Force (FATF). (2021). *Updated Guidance for a Risk-Based Approach to Virtual Assets and Virtual Asset Service Providers*. Disponibile su: <https://www.fatf-gafi.org/publications/fatfrecommendations/documents/guidance-rba-virtual-assets-2021.html>.

- *Stablecoin*: Disciplinate dall'Articolo 6, le stablecoin sono progettate per mantenere un valore stabile rispetto a una valuta fiat o a un paniere di asset. La loro velocità di adozione e la possibilità che divengano un mezzo di pagamento alternativo sollevano importanti questioni di stabilità finanziaria, spingendo il legislatore a introdurre regole particolarmente rigorose per prevenire arbitraggi e salvaguardare la fiducia del mercato⁵³. MiCA le distingue in due sottocategorie principali: i token legati ad asset e i token di moneta elettronica. I token legati ad asset sono ancorati a un paniere di asset diversificato, come valute fiat, materie prime o altri crypto-asset; la diversificazione delle riserve riduce la volatilità, contribuendo a una maggiore stabilità del valore del token. Gli emittenti devono mantenere riserve sufficienti a coprire il valore complessivo delle stablecoin in circolazione, preservando così la fiducia degli investitori e la stabilità del mercato. I token di moneta elettronica, invece, sono ancorati a una singola valuta fiat, come l'euro o il dollaro, e sono pensati per mantenere un valore fisso rispetto a questa valuta. Vengono usati principalmente per facilitare transazioni rapide e a basso costo, offrendo una maggiore prevedibilità del valore rispetto alle criptovalute più volatili. In questo caso, gli emittenti devono garantire trasparenza sulle riserve e adottare misure di gestione del rischio adeguate a prevenire instabilità finanziarie.

Non tutti i crypto-asset rientrano nel campo di applicazione di MiCA, poiché alcuni di essi sono esclusi per ragioni specifiche. Tra questi vi sono i NFT (Non-Fungible Tokens), come indicato nell'Articolo 7. Gli NFT, rappresentando beni digitali unici come opere d'arte o oggetti da collezione, richiedono un approccio normativo distinto. A differenza dei crypto-asset fungibili, la loro unicità implica dinamiche di mercato e implicazioni legali differenti, richiedendo una regolamentazione che consideri le peculiarità degli asset non intercambiabili.

MiCA esclude anche i crypto-asset già regolamentati da altri quadri normativi, come quelli che rientrano nella definizione di strumenti finanziari secondo la Direttiva sui Mercati degli Strumenti Finanziari (MiFID II) o di moneta elettronica secondo la Direttiva sulla

⁵³Lemma, V. (2022). *The Public Intervention on Cryptocurrencies between Innovation and Regulation*. Open Review of Management, Banking and Finance.

Moneta Elettronica (EMD2)⁵⁴. Questa distinzione evita sovrapposizioni regolamentari e garantisce che ogni cripto-asset sia disciplinato dalle normative più appropriate. I cripto-asset qualificati come strumenti finanziari sotto MiFID II continueranno a essere soggetti a MiFID II, mentre MiCA si concentra su categorie non ancora regolamentate.

1.3.2 Obiettivi principali

Con l'introduzione del Regolamento MiCA⁵⁵, l'Unione Europea si propone di delineare un quadro normativo chiaro e armonizzato che, oltre a promuovere la trasparenza e la sicurezza del mercato dei cripto-asset, mira a integrare pratiche sostenibili per rispondere alle crescenti preoccupazioni ambientali. Due obiettivi principali emergono come pilastri centrali di questa regolamentazione: la promozione della trasparenza e della responsabilità ambientale.

La trasparenza, infatti, è un elemento fondamentale per la stabilità e l'affidabilità dei mercati finanziari. Prima di MiCA, l'assenza di una regolamentazione specifica ha portato a fenomeni di frode e manipolazione nel mercato dei cripto-asset, riducendo la fiducia degli investitori⁵⁶. La mancanza di regole chiare, analoghe a quelle previste dalla MiFID II per gli strumenti finanziari tradizionali, ha spinto molti operatori a muoversi in zone d'ombra, eludendo i necessari obblighi di condotta e di trasparenza. In tale contesto, quando i cripto-asset incorporano diritti assimilabili a quelli degli strumenti finanziari, diventa indispensabile applicare le stesse regole di condotta e i medesimi obblighi informativi propri di questi ultimi, indipendentemente dalla tecnologia sottostante o dalla loro denominazione giuridica⁵⁷. A fronte di questa situazione, MiCA stabilisce dei

⁵⁴European Commission. (2020). *Digital Finance Package: A European Strategy for Digital Finance*. Disponibile su: https://ec.europa.eu/info/publications/200924-digital-finance-proposals_en.

⁵⁵Regulation (EU) 2023/1114 of the European Parliament and of the Council on Markets in Crypto-Assets (MiCA). Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1114>.

⁵⁶European Securities and Markets Authority (ESMA). (2019). *Advice on Initial Coin Offerings and Crypto-Assets*. Disponibile su: https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma50-157-1391_crypto_advice.pdf.

⁵⁷Pellegrini, M. (2021). *Transparency and Circulation of Cryptocurrencies*. Open Review of Management, Banking and Finance.

requisiti stringenti di trasparenza, finalizzati a consolidare la fiducia degli investitori e a garantire un mercato equo e sicuro:

a. *Pubblicazione del White Paper*: Un elemento essenziale della trasparenza promossa da MiCA è l'obbligo, per gli emittenti di cripto-asset, di redigere e pubblicare un White Paper. Questo documento, come previsto dall'Articolo 5 di MiCA, deve fornire informazioni dettagliate e accessibili sui cripto-asset trattati, includendo vari elementi chiave:

- Natura dei cripto-asset e diritti connessi: Questo permette agli investitori di comprendere chiaramente l'oggetto del loro investimento e i diritti a esso associati.
- Modalità di offerta e distribuzione: Fornisce dettagli sui processi di acquisto e sulla disponibilità dell'asset, garantendo una trasparenza operativa che faciliti decisioni informate.
- Rischi legati all'investimento: Il White Paper deve evidenziare le potenziali fluttuazioni di valore e la volatilità del mercato, elementi centrali per una valutazione consapevole dell'investimento.
- Informazioni sull'emittente: La documentazione include dati sul background e le competenze dell'emittente, fondamentali per valutarne l'affidabilità e la solidità. Questo obbligo informativo mira a garantire agli investitori una piena comprensione dei prodotti finanziari in cui investono, favorendo una cultura della trasparenza e una maggiore responsabilità da parte degli emittenti.

b. *Autorizzazione e supervisione*: MiCA stabilisce che i fornitori di servizi relativi ai cripto-asset debbano ottenere un'autorizzazione preventiva dalle autorità competenti dei rispettivi Stati membri, come indicato nell'Articolo 53. Il processo di autorizzazione richiede una valutazione approfondita delle risorse finanziarie dell'operatore, della sua governance e delle misure di sicurezza che ha implementato. Questo sistema è volto a garantire che solo soggetti affidabili e qualificati operino nel mercato, incrementando così la fiducia e la trasparenza. Le autorità di regolamentazione, inoltre, sono dotate di poteri di supervisione per monitorare l'attività di questi fornitori e assicurarsi che rispettino gli obblighi previsti da MiCA. Questo sistema di controllo continuo mira a ridurre il rischio di frodi e abusi

all'interno del mercato, fornendo una maggiore protezione agli investitori e stabilizzando il contesto operativo.

- c. *Obblighi di informativa continua*: In conformità con l'Articolo 22, gli emittenti di cripto-asset sono tenuti a fornire aggiornamenti costanti e informazioni rilevanti per gli investitori, includendo qualsiasi cambiamento significativo nel progetto o nella situazione finanziaria dell'emittente. Questo obbligo di comunicazione continua è essenziale per mantenere elevati standard di trasparenza e per garantire che gli investitori siano costantemente informati sulle evoluzioni di mercato e sui possibili rischi legati alle loro scelte d'investimento.
- d. *Prevenzione degli abusi di mercato*: MiCA affronta anche la problematica degli abusi di mercato, una questione cruciale per tutelare la trasparenza e l'equità. Ai sensi dell'Articolo 80, pratiche quali la manipolazione del mercato e l'insider trading sono espressamente vietate. I fornitori di servizi relativi ai cripto-asset devono adottare misure efficaci per individuare e segnalare eventuali attività sospette, contribuendo così a mantenere l'integrità del mercato cripto. Questa disposizione è fondamentale per assicurare un ambiente di mercato equo, in cui tutti gli investitori possano accedere alle medesime informazioni e opportunità, evitando vantaggi illeciti per pochi.
- e. *Monitoraggio e audit*: MiCA prevede che le autorità di vigilanza siano incaricate di monitorare costantemente l'impatto dei cripto-asset sul mercato e possano condurre audit periodici per verificare la conformità delle informazioni diffuse dagli emittenti. Questo sistema di monitoraggio e controllo periodico è essenziale per garantire che le informazioni circolanti siano veritiere e accurate, aumentando la fiducia degli investitori e migliorando la credibilità del mercato.
- f. *Rimozione delle barriere informative*: MiCA si propone di abbattere le barriere informative che attualmente limitano l'accesso agli investimenti in cripto-asset⁵⁸. Attraverso la standardizzazione delle normative e l'armonizzazione delle informazioni richieste, MiCA consente agli investitori di acquisire una comprensione più completa delle diverse offerte presenti sul mercato. Questa riduzione delle barriere

⁵⁸Zetzsche, D. A., Buckley, R. P., Arner, D. W., & Föhr, L. (2020). *The Markets in Crypto-Assets Regulation (MiCA) and the EU Digital Finance Strategy*. *Capital Markets Law Journal*, 16(2), pp. 203-225.

informative facilita decisioni d'investimento più consapevoli e informate, promuovendo così la partecipazione a un mercato più accessibile e trasparente per tutti gli investitori.

Un aspetto fondamentale introdotto dal Regolamento MiCA è l'integrazione della sostenibilità e della responsabilità ambientale come principi chiave⁵⁹. In risposta alle crescenti preoccupazioni per l'impatto ambientale delle attività connesse ai cripto-asset, il nuovo quadro normativo mira a promuovere pratiche più sostenibili e a ridurre il consumo energetico nel settore, prevedendo in particolare:

- a. *Informazioni sull'impatto ambientale*: Secondo l'Articolo 19, gli emittenti di cripto-asset devono includere nel loro White Paper dettagli sull'impatto ambientale delle loro attività, in particolare per quanto riguarda il consumo energetico e l'impronta di carbonio. Questa trasparenza è essenziale per consentire agli investitori di valutare in modo consapevole anche l'impatto ambientale delle loro scelte.
- b. *Promozione di pratiche sostenibili*: l'impianto normativo incoraggia il ricorso a pratiche di mining e validazione più sostenibili, come il protocollo Proof of Stake, che richiede significativamente meno energia rispetto al più dispendioso Proof of Work. Questa transizione verso protocolli meno energivori non solo supporta la sostenibilità ambientale, ma è anche cruciale per la prosperità del settore in un contesto in cui cresce l'attenzione verso le questioni climatiche⁶⁰. Tale obiettivo si allinea con l'impegno dell'UE per la neutralità climatica entro il 2050, e MiCA rappresenta un passo concreto in questa direzione.
- c. *Integrazione con le politiche ambientali dell'UE*: la nuova disciplina si coordina con le politiche ambientali dell'Unione Europea, abbracciando una visione di economia sostenibile e resiliente. In questo modo, si inserisce nel più ampio panorama di iniziative ecologiche dell'UE, contribuendo agli sforzi per affrontare le sfide climatiche e promuovere modelli di business sostenibili.
- d. *Monitoraggio e gestione dei rischi ambientali*: L'Articolo 85 stabilisce che le autorità competenti monitorino l'impatto ambientale dei cripto-asset e delle operazioni di

⁵⁹European Commission. (2019). *The European Green Deal*. COM (2019) 640 final. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>.

⁶⁰Truby, J. (2018). *Decarbonizing Bitcoin: Law and Policy Choices for Reducing the Energy Consumption of Blockchain Technologies and Digital Currencies*. *Energy Research & Social Science*, 44, pp. 399–410.

mining. Questo approccio permette un intervento tempestivo da parte delle autorità in caso di rischi emergenti e favorisce un'evoluzione normativa che possa adattarsi ai cambiamenti tecnologici⁶¹.

- e. *Standardizzazione delle pratiche di sostenibilità*: La nuova cornice normativa promuove l'adozione di standard di sostenibilità che possano orientare le attività legate alle crypto verso pratiche più ecologiche. L'armonizzazione dei requisiti ambientali a livello europeo garantisce che gli operatori non solo rispettino le normative, ma contribuiscano anche a migliorare la responsabilità sociale e ambientale del settore.
- f. *Responsabilità condivisa di operatori e investitori*: La regolamentazione attribuisce un ruolo attivo sia agli operatori di mercato che agli investitori nella promozione della sostenibilità. Gli emittenti di crypto-asset sono tenuti a rendere pubbliche le loro pratiche ambientali, mentre gli investitori sono invitati a considerare l'impatto ambientale delle proprie scelte di investimento. Questo approccio partecipativo mira a costruire un mercato più consapevole e responsabile.

In questo modo, MiCA pone le basi per un futuro sostenibile dei crypto-asset in Europa, fissando standard chiari e inclusivi che tutti gli operatori possono adottare. Tale regolamentazione rafforza la fiducia degli investitori e promuove l'integrazione dei crypto-asset in un ecosistema economico più ampio, in cui sostenibilità e responsabilità sociale diventano elementi sempre più centrali.

1.3.3 Meccanismi di vigilanza

Nel contesto del Regolamento MiCA, la vigilanza sul mercato dei crypto-asset è svolta principalmente dalle *National Competent Authorities (NCAs)* degli Stati membri e dall'*European Securities and Markets Authority (ESMA)*, che collaborano per garantire la conformità alle normative e la stabilità complessiva del settore, creando così un ambiente di fiducia per gli investitori.

Le NCAs sono incaricate di monitorare direttamente le attività degli operatori di crypto-asset nei rispettivi Stati membri, assicurandosi che le loro pratiche siano conformi alle

⁶¹Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). *The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth*. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), pp. 599–608.

disposizioni del nuovo quadro normativo⁶². Un elemento fondamentale di questa supervisione è la capacità delle NCAs di effettuare ispezioni e audit sui fornitori di servizi di cripto-asset, per garantire che le informazioni fornite dagli emittenti siano accurate e che le operazioni vengano condotte con trasparenza e correttezza. Qualora si rilevi una violazione delle normative, le NCAs hanno il potere di imporre sanzioni, sospendere temporaneamente le attività dell'operatore o, nei casi più gravi, revocare l'autorizzazione ad operare. Questi poteri dissuasivi sono essenziali per mantenere elevati standard etici e operativi nel settore, rafforzando così la protezione degli investitori⁶³.

L'ESMA, invece, svolge un ruolo di supervisione e coordinamento a livello europeo. Oltre a fornire linee guida armonizzate per le NCAs, essa è incaricata di monitorare i rischi sistemici che potrebbero emergere nel mercato dei cripto-asset, con particolare attenzione agli emittenti di stablecoin che potrebbero influire sulla stabilità finanziaria dell'Unione Europea. L'ESMA collabora strettamente con le NCAs per garantire che l'applicazione delle norme sia uniforme in tutti gli Stati membri e può intervenire direttamente in situazioni di rischio per la stabilità del mercato europeo. Inoltre, è responsabile di valutare i report e le comunicazioni periodiche fornite dalle NCAs, verificando che le pratiche di vigilanza rispondano agli standard europei e promuovano una supervisione coerente in tutta l'UE.

Un aspetto cruciale della vigilanza prevista da MiCA è il monitoraggio dell'impatto ambientale associato al mining e all'impiego dei cripto-asset. A fronte delle crescenti preoccupazioni per l'elevato consumo energetico e le emissioni di carbonio legate a queste attività, il nuovo regolamento impone agli emittenti l'obbligo di fornire informazioni dettagliate sul loro impatto ambientale in maniera continua, specificamente in termini di consumo energetico e impronta di carbonio.

Le NCAs e l'ESMA sono quindi chiamate a monitorare attivamente le pratiche di sostenibilità nel settore dei cripto-asset. Le autorità competenti sono incoraggiate a promuovere l'adozione di modelli di consenso a basso consumo energetico, come il Proof

⁶²Regulation (EU) 2023/1114 of the European Parliament and of the Council on Markets in Crypto-Assets (MiCA). Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1114>.

⁶³European Banking Authority (EBA). (2014). *Opinion on 'virtual currencies'*. Disponibile su: <https://www.bancaditalia.it/compiti/sispaga-mercati/strumenti-pagamento/normativa/EBA-Op-2014-08-Opinion-on-Virtual-Currencies.pdf>.

of Stake, per limitare l'impatto ambientale delle operazioni di mining. Oltre al rispetto delle normative esistenti, le NCAs e l'ESMA devono garantire che gli operatori adottino anche pratiche che favoriscano la responsabilità sociale e ambientale, con attività di monitoraggio e audit sulle operazioni di mining per verificare che le informazioni ambientali dichiarate siano accurate e che gli emittenti rispettino pienamente i loro obblighi normativi.

Questo sistema di vigilanza proattivo non solo favorisce un mercato più sicuro, ma assicura anche che le pratiche sostenibili diventino parte integrante delle operazioni quotidiane nel settore dei cripto-asset. La vigilanza prevista da MiCA, quindi, va oltre la semplice garanzia di conformità normativa: essa incorpora un approccio anticipatorio per affrontare le sfide future del settore, tra cui quelle ambientali, contribuendo alla creazione di un mercato delle più responsabile e sostenibile.

1.3.4 Promozione dei requisiti ESG

In un panorama globale dove la sostenibilità e la responsabilità sociale acquisiscono crescente importanza, l'intersezione tra MiCA e i requisiti ambientali, sociali e di governance (ESG, acronimo di Environmental, Social and Governance) si rivela particolarmente rilevante. I requisiti ESG costituiscono una guida per aziende e investitori impegnati a operare in modo responsabile e sostenibile, e MiCA si inserisce in questo quadro cercando di promuovere un'industria dei cripto-asset più consapevole e orientata a pratiche di responsabilità.

I criteri ESG rappresentano un insieme di parametri che permettono di valutare la performance di un'azienda in relazione a pratiche ecologiche, sociali e di governance. Tali requisiti si suddividono in tre categorie principali:

- *Ambientali (E)*: Questa categoria si concentra sull'impatto ambientale delle operazioni aziendali, prendendo in considerazione elementi come il consumo energetico, le emissioni di carbonio, la gestione delle risorse naturali e la protezione della biodiversità. Le aziende sono valutate in base alla loro capacità di adottare pratiche sostenibili, ridurre l'impatto ambientale e gestire i rischi legati al cambiamento climatico. Nel settore dei cripto-asset, ad esempio, le modalità di mining e la provenienza dell'energia utilizzata giocano un ruolo fondamentale per garantire che l'industria si orienti verso un approccio più ecocompatibile.

- *Sociali (S)*: I criteri sociali valutano l'impatto delle attività aziendali sulla società, comprese le condizioni di lavoro, i diritti dei lavoratori, la diversità, l'inclusione e le relazioni con le comunità locali. Le aziende devono dimostrare un impegno verso pratiche che promuovano il benessere sociale e la responsabilità verso i propri stakeholder. Nell'ambito dei cripto-asset, questi parametri possono includere l'etica nelle operazioni, la tutela degli utenti e la promozione di una cultura aziendale che valorizzi la diversità e l'inclusione.
- *Governance (G)*: La governance si riferisce alle pratiche di amministrazione aziendale e include aspetti come la struttura del consiglio di amministrazione, la trasparenza nelle operazioni, la gestione del rischio e l'integrità nei processi decisionali. Una solida governance è cruciale per garantire che le aziende operino in modo etico e responsabile, preservando la fiducia degli stakeholder. Nel contesto dei cripto-asset, ciò significa assicurare che le operazioni siano condotte in modo trasparente e che esistano meccanismi di controllo efficaci per prevenire frodi e pratiche scorrette.

L'integrazione dei requisiti ESG nel settore dei cripto-asset è diventata indispensabile, in particolare per affrontare le preoccupazioni relative al loro impatto ambientale⁶⁴. MiCA, con le sue disposizioni mirate, incoraggia il settore a riconsiderare le proprie pratiche energetiche, promuovendo soluzioni meno impattanti e più allineate con gli obiettivi ambientali dell'Unione Europea.

La regolamentazione incoraggia implicitamente il passaggio a modelli energeticamente efficienti come il Proof of Stake, che riduce in modo significativo il consumo di energia rispetto al più dispendioso Proof of Work⁶⁵. Promuovendo questa transizione verso sistemi di validazione meno energivori, si contribuisce non solo alla riduzione dell'impatto ambientale del mining di criptovalute, ma porta anche vantaggi economici alle imprese grazie alla diminuzione dei costi operativi e all'aumento dell'efficienza.

Uno degli aspetti più innovativi è l'implementazione di incentivi per le aziende che si impegnano attivamente a rispettare pratiche sostenibili. Le imprese che dimostrano un impegno concreto verso la sostenibilità ambientale possono ottenere condizioni

⁶⁴De Vries, A. (2018). *Bitcoin's Growing Energy Problem*. *Joule*, 2(5), pp. 801-805.

⁶⁵Sedlmeir, J., Buhl, H.U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). *The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth*. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), pp. 599–608.

normative più vantaggiose, con minori costi di compliance e accesso a finanziamenti preferenziali, in particolare per chi adotta modalità di mining a basso impatto. Questo approccio sottolinea la priorità crescente per l'Unione Europea di incentivare modelli operativi sostenibili e rende il nuovo impianto regolatorio un elemento centrale nella promozione di un'economia a basse emissioni, che rispetti gli obiettivi climatici e sociali. In questo contesto, MiCA incoraggia le aziende del settore crypto a considerare attentamente il proprio impatto ambientale e a implementare pratiche che riducano il consumo energetico. La regolamentazione integra i requisiti ESG come parte fondamentale della strategia aziendale, allineandosi agli standard europei di sostenibilità. Gli operatori che rispettano questi criteri non solo accrescono la propria attrattiva agli occhi degli investitori, ma contribuiscono anche a garantire un futuro più sostenibile per l'intero settore, rafforzando così la reputazione del mercato e migliorandone la stabilità. Anche le stablecoin rientrano in questo impegno alla sostenibilità, presentando un caso particolarmente rilevante per i criteri ESG⁶⁶. Essendo ancorate a valute fiat e con una potenziale adozione su larga scala, le stablecoin possono avere un impatto significativo sulla stabilità finanziaria dell'Unione Europea, e gli emittenti sono perciò incentivati a rispettare pratiche sostenibili. Questo richiede una gestione delle riserve responsabile, così come la trasparenza nelle operazioni di emissione e amministrazione, in modo da non compromettere gli sforzi ambientali globali. Nel complesso, l'intersezione tra MiCA e i requisiti ESG rappresenta un passo importante verso la costruzione di un'industria dei crypto-asset più sostenibile e responsabile. Gli incentivi per pratiche ecologiche e l'integrazione dei criteri ESG mirano non solo a garantire la stabilità del mercato, ma anche a costruire un futuro in cui i crypto-asset possano prosperare in armonia con gli obiettivi climatici dell'Unione Europea. Questo approccio risponde alle sfide ambientali e sociali contemporanee, favorendo un ecosistema economico che promuova valori di sostenibilità e responsabilità sociale.

⁶⁶European Central Bank. (2020). *Stablecoins – no coins, but are they stable?*. ECB Economic Bulletin, Issue 7/2020.

1.4 MiCA a confronto con altre normative globali

Per comprendere appieno l'impatto e l'efficacia del Regolamento MiCA, è fondamentale confrontarlo con le normative vigenti in altre giurisdizioni chiave, come gli Stati Uniti e la Cina, nonché con altre normative internazionali. Questo confronto permette di evidenziare le differenze e le similitudini nei vari approcci regolatori, offrendo una prospettiva globale sulle tendenze e le sfide nella regolamentazione dei cripto-asset.

1.4.1 Normative statunitensi

Negli Stati Uniti, la regolamentazione dei cripto-asset risulta complessa e frammentata, poiché diverse agenzie federali e statali intervengono ciascuna con norme specifiche e interpretazioni proprie⁶⁷. Le principali autorità coinvolte a livello federale sono la Securities and Exchange Commission (SEC), la Commodity Futures Trading Commission (CFTC), il Financial Crimes Enforcement Network (FinCEN) e l'Internal Revenue Service (IRS).

La SEC considera alcuni cripto-asset come "securities" (titoli) in base al Securities Act del 1933 e al Securities Exchange Act del 1934. In tal caso, offerte e vendite di tali cripto-asset devono essere registrate presso la SEC o ottenere un'esenzione⁶⁸. Per determinare se un cripto-asset è da considerarsi un titolo, si utilizza il "test di Howey", il quale definisce una transazione come contratto di investimento qualora implichi l'investimento di denaro in un'impresa comune, con un'aspettativa di profitto derivante dagli sforzi di terzi.

Parallelamente, la CFTC classifica le criptovalute come "commodities" (merci) secondo il Commodity Exchange Act (CEA), il che le conferisce l'autorità di regolamentare i mercati di derivati sulle criptovalute, come i futures e le opzioni. Inoltre, la CFTC ha potere di intervenire contro frodi e manipolazioni nel mercato spot delle criptovalute⁶⁹.

⁶⁷SEC. (2019). *Framework for "Investment Contract" Analysis of Digital Assets*. Disponibile su: <https://www.sec.gov/corpfin/framework-investment-contract-analysis-digital-assets>.

⁶⁸SEC. (2017). *Report of Investigation Pursuant to Section 21(a) of the Securities Exchange Act of 1934: The DAO*. Disponibile su: <https://www.sec.gov/litigation/investreport/34-81207.pdf>.

⁶⁹CFTC. (2020). *CFTC Releases New Guidance on Digital Assets*. Disponibile su: https://www.cftc.gov/About/HistoryoftheCFTC/history_2020s.html.

Questo approccio differenziato, in cui la SEC tratta i cripto-asset come titoli e la CFTC come merci, riflette l'ampiezza delle categorie normative utilizzate.

Il FinCEN si occupa degli aspetti legati all'antiriciclaggio (AML) e al contrasto al finanziamento del terrorismo (CFT). Secondo il FinCEN, le aziende coinvolte nel trasferimento di denaro virtuale sono considerate "money services businesses" (MSB) e devono quindi registrarsi presso l'agenzia, implementare programmi di AML/CFT e segnalare eventuali transazioni sospette⁷⁰.

Per quanto riguarda l'aspetto fiscale, l'IRS considera le criptovalute come "property" (beni). Di conseguenza, tutte le transazioni effettuate in criptovalute sono soggette a tassazione su plusvalenze o minusvalenze, in base al valore dell'asset al momento della transazione⁷¹.

A livello statale, il quadro normativo è ancora più diversificato. Alcuni stati, come New York, hanno adottato normative rigide: ad esempio, richiedono una "BitLicense" per le aziende che operano con cripto-asset. Al contrario, altri stati come il Wyoming hanno approvato leggi più favorevoli, mirate ad attrarre aziende blockchain e di criptovalute, semplificando le procedure di compliance e incoraggiando l'innovazione.

Questa frammentazione normativa crea una rete complessa di regolamenti con cui le imprese devono confrontarsi, introducendo incertezze per operatori e investitori. La mancanza di una definizione univoca e condivisa a livello nazionale su cosa costituisca un cripto-asset aggrava ulteriormente questa situazione, creando ostacoli operativi e limitando la possibilità di un'applicazione uniforme.

La sostenibilità ambientale dei cripto-asset è diventata un tema di interesse crescente negli Stati Uniti, principalmente a causa dell'alto consumo energetico associato al mining di criptovalute come Bitcoin. Tuttavia, a differenza dell'Unione Europea con MiCA, gli Stati Uniti non hanno ancora introdotto requisiti specifici di sostenibilità nelle normative federali inerenti a tali asset.

Nel 2021, l'amministrazione Biden ha manifestato interesse per le questioni ambientali legate alle criptovalute. Il Presidente ha emesso un ordine esecutivo che invita diverse

⁷⁰FinCEN. (2019). *Application of FinCEN's Regulations to Certain Business Models Involving Convertible Virtual Currencies*. Disponibile su: <https://www.fincen.gov/sites/default/files/2019-05/FinCEN%20Guidance%20CVC%20FINAL%20508.pdf>.

⁷¹IRS. (2014). *Notice 2014-21*. Disponibile su: <https://www.irs.gov/pub/irs-drop/n-14-21.pdf>.

agenzie federali a collaborare per sviluppare un quadro politico sulle risorse digitali che tenga conto di aspetti come la protezione dei consumatori, la stabilità finanziaria, la sicurezza nazionale e i rischi ambientali⁷². Nell'ambito di questa iniziativa, il Dipartimento dell'Energia e l'Environmental Protection Agency (EPA) sono stati incaricati di studiare l'impatto ambientale del mining di criptovalute e di formulare raccomandazioni per mitigare i potenziali effetti negativi. Tuttavia, al momento non sono state emanate regolamentazioni federali specifiche che impongano standard ambientali per le operazioni di mining.

Alcuni membri del Congresso hanno cominciato a sollevare preoccupazioni riguardo all'impatto ambientale delle criptovalute. A titolo di esempio, il Crypto-Asset Environmental Transparency Act è stato proposto per richiedere alle aziende di mining di criptovalute di divulgare informazioni dettagliate sul loro consumo energetico e sulle emissioni di carbonio⁷³. Sebbene questa proposta rappresenti un passo verso l'integrazione della sostenibilità nelle normative federali sui crypto-asset, non è ancora stata approvata. A livello statale, lo Stato di New York ha adottato una posizione più decisa: nel 2022 è stata approvata una legge che impone una moratoria di due anni sulle nuove operazioni di mining di criptovalute che utilizzano metodi di consenso ad alta intensità energetica alimentati da fonti di energia a base di carbonio. Questa legge intende limitare l'impatto ambientale del mining di criptovalute e consentire una valutazione approfondita degli effetti delle operazioni esistenti.

Il confronto tra le normative statunitensi e MiCA mette in luce differenze significative sia nell'approccio regolatorio generale che nell'integrazione della sostenibilità ambientale:

- a. *Quadro normativo unificato vs. frammentato*: MiCA rappresenta un passo verso un quadro normativo unificato per i crypto-asset in tutti gli Stati membri dell'UE. Questo approccio facilita la chiarezza giuridica e fornisce protezione agli investitori, incentivando al contempo l'innovazione nel settore. Al contrario, negli Stati Uniti, la regolamentazione è frammentata, con numerose agenzie federali e statali che regolano

⁷²The White House. (2021). *Executive Order on Ensuring Responsible Development of Digital Assets*. Disponibile su: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/03/09/executive-order-on-ensuring-responsible-development-of-digital-assets/>.

⁷³U.S. Congress. (2021). *Crypto-Asset Environmental Transparency Act*. Disponibile su: <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/5210>.

diversi aspetti dei crypto-asset in base alle rispettive competenze, creando un quadro normativo complesso e non uniforme. La mancanza di una legislazione federale unitaria negli Stati Uniti introduce incertezza e complessità per le imprese del settore, ostacolando potenzialmente l'innovazione e limitando la competitività rispetto alle aziende europee, che possono beneficiare di una regolamentazione più coerente.

- b. *Integrazione della sostenibilità*: MiCA incorpora esplicitamente obiettivi di sostenibilità, promuovendo implicitamente l'adozione di modelli di consenso a basso consumo energetico e richiedendo alle imprese di divulgare dettagli sull'impatto ambientale delle loro attività. Negli Stati Uniti, pur essendo in aumento la consapevolezza sull'impatto ambientale dei crypto-asset, non esistono ancora requisiti normativi federali specifici che incorporino la sostenibilità nel settore⁷⁴. Le iniziative ambientali statunitensi restano limitate e si concentrano maggiormente a livello statale o su proposte legislative non ancora approvate. Queste differenze sottolineano un approccio più proattivo da parte dell'UE nell'affrontare le questioni ambientali legate al mercato crypto, mentre gli Stati Uniti si trovano ancora nelle fasi iniziali della discussione normativa sulla sostenibilità.
- c. *Protezione degli investitori e stabilità finanziaria*: Sia MiCA che le normative statunitensi mirano a proteggere gli investitori e a mantenere la stabilità finanziaria del mercato. Tuttavia, MiCA introduce un insieme di requisiti chiari per gli emittenti di crypto-asset, i fornitori di servizi e le piattaforme di trading, definendo obblighi di trasparenza, requisiti patrimoniali e regole di condotta precise. Negli Stati Uniti, invece, la SEC e la CFTC applicano le normative già esistenti ai prodotti e ai servizi crypto che rientrano nelle rispettive giurisdizioni. Tuttavia, la mancanza di chiarezza su quali crypto-asset debbano essere considerate titoli o merci crea un'incertezza normativa che può portare a interpretazioni incoerenti e a sfide legali per le aziende coinvolte⁷⁵.
- d. *Innovazione e competitività*: L'Unione Europea, attraverso MiCA, mira a bilanciare regolamentazione e innovazione, offrendo un quadro normativo chiaro e stabile che

⁷⁴Congressional Research Service. (2022). *Recent Cryptocurrency Developments: Energy and Environmental Implications*. Disponibile su: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF12286/3>.

⁷⁵SEC. (2021). *SEC Charges Decentralized Finance Lender and Top Executives for Unregistered Sales of Securities*. Disponibile su: <https://www.sec.gov/news/press-release/2021-145>.

consente alle imprese di operare in un contesto prevedibile. Questo approccio può rivelarsi attrattivo per gli investitori e incentivare lo sviluppo del settore. Negli Stati Uniti, al contrario, l'incertezza regolamentare può scoraggiare l'innovazione e spingere le imprese verso mercati con normative più favorevoli, con potenziali ricadute sulla futura leadership statunitense nel settore delle tecnologie finanziarie.

Il confronto tra MiCA e le normative statunitensi evidenzia quindi l'importanza di un approccio equilibrato, che contempra sia la protezione degli investitori sia la promozione dell'innovazione. Un aspetto cruciale è inoltre l'integrazione della sostenibilità, visto il significativo impatto ambientale legato ad alcune attività crypto. L'approccio proattivo dell'UE, che include anche misure per la sostenibilità, potrebbe rappresentare un modello per altre giurisdizioni.

Per gli Stati Uniti, adottare una legislazione federale più coerente potrebbe contribuire a risolvere sfide specifiche del settore, inclusi i rischi ambientali. Tuttavia, la complessità del sistema legislativo statunitense e la divisione dei poteri tra livello federale e statale rendono difficile l'introduzione di una normativa unificata come MiCA. La collaborazione inter-agenzia rappresenta infatti una delle principali sfide per l'adozione di un quadro normativo unificato.

Non mancano però segnali incoraggianti. Il crescente interesse del Congresso e delle agenzie federali per i crypto-asset e le loro implicazioni ambientali suggerisce una maggiore probabilità di futuri sviluppi normativi⁷⁶. Standard di divulgazione ambientale e incentivi per pratiche sostenibili potrebbero rappresentare passi importanti per avvicinare l'approccio degli Stati Uniti a quello dell'UE.

Il confronto tra MiCA e le normative statunitensi rivela differenze sostanziali sia nell'approccio regolatorio sia nell'attenzione dedicata alla sostenibilità. Mentre l'UE è già orientata verso un quadro normativo unificato che include anche misure per mitigare l'impatto ambientale, gli Stati Uniti restano in una fase iniziale, con normative frammentate e un'attenzione limitata alla sostenibilità nel settore dei crypto-asset.

⁷⁶SEC. (2022). *SEC Proposes Rules to Enhance and Standardize Climate-Related Disclosures for Investors*. Disponibile su: <https://www.sec.gov/news/press-release/2022-46>.

1.4.2 Normative cinesi

La Cina è uno dei casi più rilevanti di regolamentazione rigorosa nel settore cripto, adottando un approccio che si distingue per restrizioni estese sull'uso, il trading e il mining di criptovalute.

Già dal 2013, la Cina ha iniziato a limitare l'uso delle criptovalute, vietando alle istituzioni finanziarie di effettuare transazioni in Bitcoin⁷⁷. Successivamente, nel 2017, il governo ha inasprito le misure proibendo le Initial Coin Offerings (ICO) e chiudendo le piattaforme di scambio di criptovalute interne⁷⁸. La stretta definitiva è arrivata nel 2021, quando la Banca Popolare Cinese ha dichiarato illegali tutte le transazioni in criptovalute e imposto un divieto generale su trading e mining⁷⁹.

Le motivazioni di questo approccio restrittivo sono molteplici. Da un lato, il governo cinese teme che le criptovalute possano destabilizzare il sistema finanziario nazionale, favorendo attività illecite come il riciclaggio di denaro. Dall'altro, le criptovalute rappresentano una sfida al controllo statale sui flussi finanziari, che Pechino considera cruciale per la stabilità economica.

Contestualmente, la Cina ha avviato lo sviluppo di una propria valuta digitale della banca centrale (CBDC), il Digital Yuan o e-CNY. Questo progetto mira a modernizzare il sistema di pagamento cinese, aumentando l'efficienza delle transazioni e rafforzando il controllo del governo sulle transazioni finanziarie, distinguendosi dalle criptovalute decentralizzate.

Un aspetto importante dell'approccio cinese è l'attenzione alla sostenibilità. La Cina si è impegnata a ridurre le proprie emissioni di carbonio per raggiungere la neutralità climatica entro il 2060⁸⁰. Il mining di criptovalute, soprattutto di Bitcoin, pone sfide

⁷⁷State Council of the People's Republic of China. (2013). *Notice on Precautions Against the Risks of Bitcoin*. Disponibile su: http://www.gov.cn/zwggk/2013-12/05/content_2549096.htm.

⁷⁸People's Bank of China. (2017). *Announcement on Preventing Financial Risks from Initial Coin Offerings*. Disponibile su: <http://www.pbc.gov.cn/goutongjiaoliu/113456/113469/3374222/index.html>.

⁷⁹Reuters. (2021). *China's top regulators ban crypto trading and mining, sending bitcoin tumbling*. Disponibile su: <https://www.reuters.com/world/china/china-central-bank-vows-crackdown-cryptocurrency-trading-2021-09-24/>.

⁸⁰State Council of the People's Republic of China. (2020). *China's Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*. Disponibile

significative in questo contesto a causa dell'enorme consumo energetico che richiede. Prima del divieto del 2021, la Cina era infatti il maggiore hub mondiale per il mining di Bitcoin, favorito dai bassi costi energetici e dalla disponibilità di hardware. Tuttavia, gran parte di questa energia proveniva da fonti non rinnovabili, in particolare dal carbone, con un forte impatto in termini di emissioni di gas serra.

Nel 2021, come parte degli sforzi per ridurre l'impronta ambientale, il governo cinese ha vietato il mining di criptovalute in province ad alta intensità energetica, come Sichuan, Xinjiang e Inner Mongolia⁸¹. Questi interventi riflettono la determinazione della Cina a limitare l'impatto ambientale del mining e a promuovere la sostenibilità energetica.

L'approccio cinese alla regolamentazione dei crypto-asset si basa dunque su un controllo rigoroso e una forte attenzione alla sostenibilità. Tuttavia, questa strategia è ben diversa da quella adottata dall'Unione Europea con MiCA, che bilancia la regolamentazione con l'innovazione, garantendo sia la protezione degli investitori sia un contesto favorevole allo sviluppo del settore. In sintesi, mentre la Cina punta a un controllo diretto e stringente, l'Unione Europea mira a trovare un equilibrio tra regolamentazione e crescita del mercato.

L'approccio della Cina e quello dell'Unione Europea, riflettono visioni regolatorie e obiettivi di politica economica molto diversi:

- a. *Regolamentazione vs. divieto*: La Cina ha scelto un percorso di divieto quasi totale sulle criptovalute, eliminando quasi completamente il trading e il mining di crypto-asset all'interno dei suoi confini. Questo approccio radicale mira a contrastare i rischi sistemici che le criptovalute potrebbero presentare, stabilendo un confine netto rispetto all'economia tradizionale. L'Unione Europea, invece, con MiCA adotta un quadro regolatorio che permette ai crypto-asset di essere integrati nel sistema finanziario in modo sicuro. L'UE riconosce il potenziale di innovazione del settore, e intende regolamentarlo anziché vietarlo, consentendo uno sviluppo che sia al contempo sicuro e sostenibile.

su: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/China's%20Achievements%2C%20New%20Goals%20and%20New%20Measures%20for%20Nationally%20Determined%20Contributions.pdf>.

⁸¹CNBC. (2021). *China is kicking out more than half the world's bitcoin miners*. Disponibile su: <https://www.cnbc.com/2021/06/15/chinas-bitcoin-miner-exodus-.html>.

- b. *Integrazione della sostenibilità*: Sebbene entrambe le giurisdizioni affrontino le preoccupazioni ambientali, Cina e UE lo fanno con strategie differenti. La Cina ha vietato il mining di criptovalute nel 2021 come parte dei suoi obiettivi climatici, visti i consumi energetici elevati di alcune di esse, come il Bitcoin, il cui mining avviene tramite meccanismi di consenso energivori come il Proof of Work. L'UE, da parte sua, attraverso MiCA, non vieta il mining ma richiede trasparenza riguardo al consumo energetico e all'impatto ambientale delle attività cripto, creando così un contesto che favorisce soluzioni più sostenibili (come il Proof of Stake). In questo modo, si promuove un modello che bilancia innovazione e sostenibilità.
- c. *Sviluppo di una CBDC*: Entrambi i blocchi stanno sviluppando una CBDC (Central Bank Digital Currency), ma con approcci e stadi di avanzamento diversi. La Cina è già in fase avanzata con il Digital Yuan, che è in fase di sperimentazione in varie città e riflette l'approccio fortemente centralizzato e controllato che caratterizza la struttura politica cinese. Nell'UE, invece, la Banca Centrale Europea sta valutando l'introduzione di un Euro digitale, con studi e consultazioni attualmente in corso⁸². Sebbene l'Unione Europea condivida l'interesse per una CBDC, l'approccio dell'Euro digitale tende a essere più orientato alla privacy e alla tutela dei diritti degli utenti, nel rispetto del quadro normativo europeo.
- d. *Controllo finanziario e sicurezza nazionale*: La Cina considera le criptovalute una minaccia alla stabilità finanziaria e alla sicurezza nazionale, un rischio che ha portato a misure drastiche per ridurre l'impatto. Nel caso dell'UE, i rischi sono affrontati tramite una regolamentazione che include requisiti di licenza, supervisione e misure a tutela degli investitori, piuttosto che con il divieto. Questa differenza riflette approcci divergenti alla sicurezza finanziaria: mentre la Cina si affida a un controllo centralizzato per garantire la stabilità, l'UE promuove la trasparenza e la supervisione. L'approccio cinese ha avuto ripercussioni significative sul settore globale dei cripto-asset: il divieto del mining ha provocato una migrazione dei miner verso altri Paesi, come gli Stati Uniti e il Kazakistan⁸³. Questo spostamento ha ridistribuito l'hash rate globale

⁸²European Central Bank. (2021). *Eurosystem launches digital euro project*. Disponibile su: <https://www.ecb.europa.eu/press/pr/date/2021/html/ecb.pr210714~d99198ea23.en.html>.

⁸³Financial Times. (2021). *US overtakes China as biggest bitcoin mining hub after Beijing ban*. Disponibile su: <https://www.ft.com/content/50acdea5-cad1-4f39-8e6a-9be7ab78485d>.

(potenza di calcolo totale impiegata dai miner in tutto il mondo per verificare le transazioni su una rete blockchain, misurata in hash al secondo) e ha sollevato nuove questioni sulla sostenibilità delle operazioni di mining nelle regioni di destinazione, aumentando la pressione sulle infrastrutture energetiche di questi Paesi.

L'Unione Europea, con un approccio più aperto e regolato, potrebbe invece attrarre imprese e investitori alla ricerca di un ambiente normativo chiaro e prevedibile. Inoltre, la promozione della sostenibilità attraverso MiCA potrebbe posizionare l'UE come un leader nella regolamentazione responsabile dei cripto-asset, attirando iniziative che cercano di operare in un contesto stabile e rispettoso dell'ambiente.

Il confronto tra l'approccio cinese e quello previsto da MiCA mette in evidenza due modelli regolatori nettamente contrapposti. Da un lato, la Cina ha optato per un regime di controllo particolarmente rigido, motivato da preoccupazioni circa la stabilità finanziaria e l'impatto ambientale, ma che rischia di arginare l'innovazione nel settore dei cripto-asset. Dall'altro, l'Unione Europea, tramite MiCA, propone un quadro più flessibile e bilanciato, volto a disciplinare e integrare i cripto-asset all'interno del tessuto economico, favorendo una crescita sostenibile del comparto.

Questo confronto mette in risalto la necessità di trovare un equilibrio tra il controllo dei rischi e la promozione dell'innovazione: mentre l'UE appare orientata a perseguire tale bilanciamento, la Cina sembra privilegiare la stabilità, sacrificando la flessibilità.

1.4.3 Altre normative internazionali

Oltre a Cina e Stati Uniti, molte altre giurisdizioni globali stanno sviluppando regolamentazioni per i cripto-asset con un crescente focus sulla sostenibilità ambientale. Tra queste, Giappone, Regno Unito e Svizzera rappresentano esempi significativi, adottando approcci che riflettono le loro priorità economiche, ambientali e di sicurezza.

Il Giappone è stato uno dei primi paesi a riconoscere ufficialmente le criptovalute come metodo di pagamento legale. Attraverso la Financial Services Agency (FSA), il Giappone ha implementato regolamenti chiari per il settore, richiedendo agli exchange di criptovalute di registrarsi e rispettare standard rigorosi di conformità, inclusi requisiti antiriciclaggio. Sebbene non esistano leggi specifiche sull'impatto ambientale dei cripto-asset, il governo promuove iniziative per l'efficienza energetica e incoraggia le aziende

del settore a esplorare opzioni di mining sostenibile⁸⁴. Questa attenzione alla sostenibilità ambientale riflette l'impegno giapponese per soluzioni ecologiche anche in ambiti innovativi come quello cripto.

Il Regno Unito, sotto la supervisione della Financial Conduct Authority (FCA), adotta un approccio progressivo ma prudente per la regolamentazione dei cripto-asset. La FCA richiede la registrazione degli exchange di criptovalute e la conformità alle normative antiriciclaggio⁸⁵. Nel 2021, per proteggere gli investitori retail, ha vietato la vendita di derivati basati su criptovalute a causa dei rischi associati a questi prodotti⁸⁶. In tema di sostenibilità, il governo britannico ha introdotto il documento "Greening Finance: A Roadmap to Sustainable Investing", con l'obiettivo di integrare le considerazioni ambientali nelle decisioni finanziarie. Sebbene non regolamentino direttamente il settore cripto, queste linee guida indicano che il Regno Unito potrebbe includere presto il consumo energetico dei cripto-asset tra le priorità del quadro regolatorio, coerentemente con la spinta verso una finanza sostenibile.

La Svizzera, nota per essere un centro globale per cripto-asset e tecnologia blockchain, ha creato un contesto normativo favorevole all'innovazione tramite la FINMA, che fornisce linee guida chiare per le offerte di token e gli exchange⁸⁷. Sebbene la Svizzera non abbia norme specifiche sull'impatto ambientale di cripto-asset, è impegnata a rispettare gli obiettivi dell'Accordo di Parigi, e incoraggia le imprese a contribuire alla sostenibilità energetica nazionale adottando fonti rinnovabili. In questo contesto, le aziende del settore sono spinte a ridurre il proprio consumo energetico, in linea con gli obiettivi nazionali di sostenibilità.

⁸⁴Nikkei Asia. (2021). *Japan warns over environmental impact of cryptocurrency mining*. Disponibile su: <https://asia.nikkei.com>.

⁸⁵Financial Conduct Authority. (2021). *PS20/10: Prohibiting the sale to retail clients of investment products that reference cryptoassets*. Disponibile su: <https://www.fca.org.uk/publications/policy-statements/ps20-10-prohibiting-sale-retail-clients-investment-products-reference-cryptoassets>.

⁸⁶HM Treasury. (2021). *Greening Finance: A Roadmap to Sustainable Investing*. Disponibile su: <https://www.gov.uk/government/publications/greening-finance-a-roadmap-to-sustainable-investing>.

⁸⁷Swiss Financial Market Supervisory Authority FINMA. (2018). *Guidelines for enquiries regarding the regulatory framework for initial coin offerings (ICOs)*. Disponibile su: <https://www.finma.ch/en/news/2018/02/20180216-mm-ico-wegleitung/>.

Tra le giurisdizioni emergenti, Singapore, Canada e Australia stanno anch'esse sviluppando regolamentazioni che tengano conto della sostenibilità. Singapore, con il Payment Services Act del 2019, regola i servizi di pagamento digitali e include disposizioni specifiche per i token di pagamento digitale. La Monetary Authority of Singapore (MAS) promuove un contesto normativo stabile e, con il Green Finance Action Plan, mira a integrare la sostenibilità nel sistema finanziario, incentivando pratiche ecologiche⁸⁸. Sebbene non esistano normative specifiche per ridurre l'impatto ambientale dei crypto-asset, l'interesse per la sostenibilità del governo di Singapore potrebbe influenzare le future regolamentazioni del settore.

Il Canada è diventato una meta attrattiva per le attività di mining di criptovalute, grazie ai bassi costi energetici e al clima favorevole, che riduce i costi di raffreddamento dei dispositivi di mining. Tuttavia, l'espansione del settore ha sollevato preoccupazioni ambientali in alcune province. Il Québec, ad esempio, ha introdotto restrizioni sull'energia disponibile per le operazioni di mining, cercando di gestire il consumo energetico e incentivare l'uso di fonti rinnovabili. Questo approccio rappresenta un tentativo di bilanciare il potenziale economico del settore con la sostenibilità ambientale, promuovendo pratiche di mining più responsabili.

In Australia, i crypto-asset sono disciplinati prevalentemente in materia di antiriciclaggio. L'Australian Transaction Reports and Analysis Centre (AUSTRAC) impone la registrazione agli exchange di criptovalute e ne richiede la conformità alle normative antiriciclaggio. Sebbene non esistano ancora regolamentazioni ambientali specifiche per i crypto-asset, il governo australiano riconosce l'importanza della sostenibilità e sta investendo nelle energie rinnovabili. È quindi probabile che l'Australia, in linea con il proprio impegno verso l'energia sostenibile, possa in futuro integrare considerazioni ambientali nelle sue politiche crypto⁸⁹.

A livello internazionale, anche organizzazioni come la Financial Action Task Force (FATF) e l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE) stanno

⁸⁸Monetary Authority of Singapore. (2019). *Green Finance Action Plan*. Disponibile su: <https://www.mas.gov.sg/development/sustainable-finance>.

⁸⁹Australian Transaction Reports and Analysis Centre. (2020). *Digital Currency Exchange Providers*. Disponibile su: <https://www.austrac.gov.au/business/your-industry/digital-currency-cryptocurrency/digital-currency-exchange-providers>.

contribuendo alla diffusione di standard che promuovono la sostenibilità nel settore finanziario, con possibili ricadute sul settore cripto. La FATF, pur concentrandosi principalmente sulla prevenzione del riciclaggio e del finanziamento del terrorismo, riconosce la necessità di un approccio che permetta l'innovazione tecnologica senza compromettere la sicurezza e l'integrità del sistema finanziario⁹⁰. L'OCSE, da parte sua, ha evidenziato l'importanza di considerare la sostenibilità ambientale nelle politiche economiche, avviando discussioni sull'impatto del mining di criptovalute e sulla necessità di sviluppare tecnologie più efficienti dal punto di vista energetico⁹¹.

L'Unione Europea, con il Regolamento MiCA, si distingue per aver integrato esplicitamente la sostenibilità nel proprio quadro normativo. MiCA promuove infatti l'adozione di meccanismi di consenso a basso consumo energetico e impone alle imprese di rendere pubbliche informazioni sull'impatto ambientale delle loro attività. Questo approccio è coerente con gli obiettivi dell'Accordo di Parigi e potrebbe fungere da modello per altre nazioni. Mentre molte giurisdizioni riconoscono sempre più l'importanza della sostenibilità, poche hanno ancora implementato normative specifiche al riguardo. Tuttavia, l'interesse crescente verso la sostenibilità indica che altre giurisdizioni potrebbero seguire l'esempio dell'UE in futuro, anche grazie all'influenza di standard internazionali.

L'approccio europeo dimostra come l'integrazione di requisiti ambientali possa migliorare la reputazione del settore, stimolare lo sviluppo di tecnologie più efficienti e attrarre investimenti da parte di stakeholder sempre più attenti all'impatto ambientale. L'adozione di standard sostenibili a livello internazionale potrebbe contribuire alla creazione di un settore dei cripto-asset più responsabile e duraturo.

In definitiva, l'Unione Europea, grazie a MiCA, si pone come leader nell'integrazione della sostenibilità nelle normative sui cripto-asset, mentre altre giurisdizioni stanno progressivamente riconoscendo l'importanza di questo aspetto. L'adozione di standard

⁹⁰Financial Action Task Force. (2021). *Updated Guidance for a Risk-Based Approach to Virtual Assets and Virtual Asset Service Providers*. Disponibile su: <https://www.fatf-gafi.org/media/fatf/documents/recommendations/Updated-Guidance-VA-VASP.pdf>.

⁹¹Organisation for Economic Co-operation and Development. (2020). *Developing Sustainable Finance Definitions and Taxonomies*. Disponibile su: https://www.oecd.org/en/publications/developing-sustainable-finance-definitions-and-taxonomies_134a2dbe-en.html.

internazionali di sostenibilità e di politiche ambientali più rigorose potrebbe sostenere la transizione verso un settore crypto globalmente più sostenibile e responsabile. Questi sforzi congiunti non solo contribuirebbero a ridurre l'impatto ambientale dei crypto-asset, ma favorirebbero anche la creazione di un ecosistema finanziario innovativo, robusto e in linea con gli obiettivi di sviluppo sostenibile a lungo termine.

2. MiCA e sostenibilità: possibili riflessi sull'efficienza del mercato cripto

L'ascesa dei cripto-asset ha posto sfide significative, sia sul piano tecnologico sia su quello regolamentare. L'emergere di strumenti come le criptovalute e i token digitali ha infatti trasformato radicalmente l'ecosistema finanziario tradizionale, introducendo nuove modalità di scambio, investimento e conservazione del valore. Al tempo stesso, è emerso con chiarezza che non si può prescindere da un quadro normativo adeguato, necessario per tutelare gli investitori, garantire la stabilità finanziaria e favorire la trasparenza. In questo contesto, l'Unione Europea ha sviluppato il Regolamento MiCA (Markets in Crypto-Assets), un testo legislativo mirato a creare una base normativa solida e armonizzata per il settore. MiCA risponde alla necessità di coordinare gli approcci nazionali divergenti, fornendo regole uniformi su aspetti chiave come l'emissione di cripto-asset, la definizione dei diritti degli investitori, i requisiti di trasparenza e gli obblighi di registrazione e supervisione dei fornitori di servizi.

Un elemento particolarmente rilevante di MiCA, già introdotto precedentemente, è l'attenzione dedicata alla sostenibilità ambientale. Pur non imponendo direttamente un meccanismo di consenso specifico, la normativa richiede maggiore disclosure sul consumo energetico e l'impatto ecologico dei cripto-asset. Questa enfasi sulla sostenibilità non è casuale: la diffusione delle criptovalute basate su Proof of Work, come Bitcoin, ha sollevato crescenti critiche per l'intenso consumo di risorse, inducendo le istituzioni a riflettere su come incentivare modelli meno energivori.

Il passaggio al Proof of Stake, già intrapreso da Ethereum, rappresenta una soluzione tecnica che riduce drasticamente il consumo energetico e, più in generale, l'impatto ambientale del network. I cripto-asset, concepiti come alternative decentralizzate, trasparenti e resistenti alla censura, avevano posto in primo piano la sicurezza e la robustezza dei meccanismi di consenso, trascurando la dimensione della sostenibilità. MiCA, con la sua richiesta di maggiore trasparenza ambientale, non impone un cambio di protocollo, ma di fatto incentiva i progetti a optare per soluzioni meno impattanti, come il PoS, per risultare più attrattivi agli occhi di investitori attenti ai criteri ESG e per evitare eventuali pressioni normative future.

Questo capitolo riprende dunque il discorso dal punto in cui è stato lasciato: abbiamo un settore innovativo, in pieno fermento, ma al tempo stesso soggetto a crescente monitoraggio da parte di regolatori e opinione pubblica. L'obiettivo ora è di collegare l'aspetto normativo e ambientale alla questione dell'efficienza di mercato. In altre parole, dopo aver compreso perché l'UE spinga verso la sostenibilità e la trasparenza, ci chiederemo come tale spinta possa tradursi, in termini teorici, in un miglioramento dell'efficienza dei mercati crypto.

Successivamente, andremo a verificare empiricamente questa ipotesi, ma prima è necessario costruire un framework teorico: perché il PoS, reso più auspicabile dalla pressione normativa e dalla disclosure ambientale, potrebbe rendere i mercati più efficienti? Per rispondere a questa domanda, esamineremo le basi teoriche dell'efficienza di mercato, il ruolo dell'informazione e delle strutture di consenso, per poi mostrare come PoS possa favorire un mercato in cui i prezzi riflettono più rapidamente e accuratamente tutte le informazioni disponibili.

2.1 Riorientare i mercati crypto: MiCA, trasparenza ambientale e Proof of Stake

Come evidenziato nella sezione introduttiva, MiCA non si limita a fornire un quadro normativo unificato per i crypto-asset all'interno dell'Unione Europea, ma introduce anche principi chiave relativi alla sostenibilità e alla responsabilità ambientale. Pur non imponendo direttamente alle reti blockchain di adottare uno specifico meccanismo di consenso, MiCA stabilisce requisiti di trasparenza in merito al consumo energetico e alle emissioni di carbonio associate alle operazioni di mining e validazione⁹².

L'idea di fondo è che una maggiore disclosure ambientale possa giocare un ruolo indiretto nel plasmare le scelte tecnologiche degli sviluppatori e dei gestori di crypto-asset⁹³. In un contesto in cui la reputazione e il rispetto dei criteri ambientali, sociali e di governance

⁹²Regulation (EU) 2023/1114 of the European Parliament and of the Council on Markets in Crypto-Assets (MiCA). Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R1114>.

⁹³European Commission. (2021). *Digital Finance Strategy for the EU*. Disponibile su: https://finance.ec.europa.eu/publications/digital-finance-package_en.

(ESG) diventano fattori sempre più importanti per attrarre investitori⁹⁴, il semplice fatto di dover rendere pubbliche informazioni sull'impronta ecologica della rete potrebbe scoraggiare l'utilizzo di protocolli ad alto consumo energetico, come il Proof of Work. Questo non significa con certezza che tutti i progetti migreranno verso meccanismi meno energivori, né che questo passaggio (se avverrà su larga scala) porterà automaticamente a una maggiore efficienza di mercato. Tuttavia, l'ipotesi è che la pressione normativa e la sensibilizzazione degli investitori sui temi ambientali possano rendere più conveniente adottare modelli come il Proof of Stake, noti per il fabbisogno energetico significativamente inferiore⁹⁵. Il PoS, a sua volta, potrebbe incidere sulle dinamiche informative e sugli incentivi interni al network, con potenziali effetti del mercato. In sostanza, la regolamentazione europea e i suoi requisiti di sostenibilità costituiscono un motore di cambiamento: invece di obbligare esplicitamente l'abbandono del PoW, MiCA istituisce un ambiente in cui la trasparenza ambientale diventa un costo reputazionale e potenzialmente competitivo per chi insiste su modelli altamente energivori. Questo contesto potrebbe contribuire a un graduale riallineamento degli incentivi, favorendo, tra le alternative disponibili, quelle più sostenibili, tra cui, in primis, il PoS.

2.1.1 L'obbligo di disclosure ambientale come strumento di pressione indiretta

Una delle principali novità introdotte da MiCA è la richiesta, rivolta agli emittenti di crypto-asset e ai fornitori di servizi correlati, di fornire informazioni dettagliate e verificabili sull'impatto ambientale delle loro operazioni⁹⁶. Questa misura, sebbene apparentemente solo informativa, potrebbe avere conseguenze non trascurabili sulla struttura e sulla competitività dei mercati crypto. Il fulcro dell'intervento normativo non

⁹⁴Friede, G., Busch, T., & Bassen, A. (2015). ESG and financial performance: aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 5(4), pp. 210–233.

⁹⁵Ethereum Foundation. (2022). *The Merge: Proof-of-Stake FAQ*. Disponibile su: <https://ethereum.org/en/upgrades/merge/>.

⁹⁶European Banking Authority (EBA). (2021). *Report on management and supervision of ESG risks for credit institutions and investment firms*. Disponibile su: https://www.eba.europa.eu/sites/default/files/document_library/Publications/Reports/2021/1015656/EBA%20Report%20on%20ESG%20risks%20management%20and%20supervision.pdf.

consiste nell'imporre direttamente un particolare meccanismo di consenso, bensì nel garantire una maggiore trasparenza rispetto alle scelte tecnologiche ed energetiche dei singoli progetti⁹⁷. In tal modo, MiCA crea un contesto in cui le preferenze degli investitori, soprattutto quelli sensibili ai criteri ambientali, sociali e di governance (ESG), possono riflettersi più chiaramente nelle valutazioni di mercato.

La logica è quella di un effetto indiretto: a fronte dell'obbligo di rivelare il consumo energetico, l'origine delle fonti e l'impronta carbonica derivante dal processo di validazione delle transazioni, i progetti che si affidano a meccanismi di consenso ad alta intensità energetica, come il Proof of Work, risulteranno potenzialmente meno appetibili per una fetta crescente di investitori⁹⁸. Questi ultimi, consapevoli dei crescenti rischi climatici e delle responsabilità sociali delle imprese, potrebbero giudicare negativamente le reti che insistono su protocolli considerati dannosi per l'ambiente, preferendo investire in alternative più sostenibili⁹⁹. A questo punto, la divulgazione non è un semplice adempimento burocratico, ma un fattore che incide sulla reputazione del progetto e sulla percezione del suo rischio di medio-lungo termine.

Occorre poi considerare che la pressione non proviene solo dagli investitori orientati all'ESG. Anche soggetti meno sensibili alle tematiche ambientali potrebbero trovarsi a riconsiderare le loro scelte. Un elevato consumo energetico può essere indice di costi operativi intrinseci, di vulnerabilità ai cambiamenti regolamentari futuri (ad esempio, ulteriori tasse sul carbonio o restrizioni sull'uso di energia da fonti fossili) o di minore adattabilità del protocollo a un contesto in cui l'energia potrebbe diventare più cara o scarsa¹⁰⁰. In altre parole, la disclosure ambientale fa emergere costi non sempre espliciti, mettendo in luce la "bolletta energetica" del network. Questo può tradursi in una

⁹⁷European Securities and Markets Authority (ESMA). (2022). *Trends, Risks and Vulnerabilities Report*, No. 2. Disponibile su: https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma50-165-2229_trv_2-22.pdf.

⁹⁸CFA Institute. (2020). *ESG Integration in Europe, the Middle East, and Africa: Markets, Practices, and Data*. Disponibile su: <https://www.cfainstitute.org/en/research/esg-investing>.

⁹⁹United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *Emissions Gap Report 2021*. Disponibile su: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>.

¹⁰⁰Cambridge Centre for Alternative Finance (CCAF). (2021). *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)*. Disponibile su: <https://www.cbeci.org/>.

percezione del rischio diversa: se un protocollo ha costi fissi elevati in termini di energia, potrebbe essere meno resiliente agli shock e alle fluttuazioni di mercato rispetto a un protocollo più leggero e flessibile come il Proof of Stake¹⁰¹.

L'aspetto cruciale sta nella natura indiretta di questa pressione. MiCA non impone il passaggio a PoS, né stabilisce un tetto massimo di emissioni o un coefficiente obbligatorio di energia rinnovabile da utilizzare. Il regolatore si limita a chiedere trasparenza. Tuttavia, la trasparenza può diventare lo strumento attraverso cui il mercato, opportunamente informato, premia o punisce determinati modelli di business. Se i dati mostrano che mantenere un meccanismo PoW richiede un quantitativo di energia spropositato e provoca emissioni significative, coloro che gestiscono la rete potrebbero trovarsi davanti a un bivio: ignorare il sentiment del mercato, rischiando di perdere investitori e liquidità, oppure cercare soluzioni meno energivore per mantenere o aumentare l'attrattività del progetto.

Questa situazione può essere paragonata a quanto avvenuto in altri settori economici: quando i consumatori diventano consapevoli dell'impatto ambientale di un prodotto o servizio, la domanda si orienta verso alternative più sostenibili, costringendo i produttori ad adeguarsi. Nel caso dei crypto-asset, la differenza è che l'intervento normativo di MiCA fa emergere l'informazione in modo sistematico, riducendo la possibilità di greenwashing (pratica ingannevole in cui un'azienda o un'istituzione si presenta come sostenibile senza adottare reali misure ecologiche) o di sottovalutazione dei costi ambientali¹⁰². Nel lungo periodo, se tale dinamica dovesse consolidarsi, le reti che rimangono legate a soluzioni ad alto consumo energetico potrebbero essere penalizzate in termini di costo del capitale, percezione del rischio e accesso ai mercati istituzionali, mentre quelle che si dimostrano "eco-efficienti", anche grazie all'adozione di PoS, potrebbero godere di un vantaggio competitivo.

Dal punto di vista teorico, l'obbligo di disclosure ambientale introdotto da MiCA potrebbe influenzare la struttura complessiva dei mercati crypto, spingendo i progetti a preferire meccanismi di consenso meno costosi in termini energetici. Un sistema come il

¹⁰¹Fama, E.F. (1970). Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work. *The Journal of Finance*, 25(2), pp. 383–417.

¹⁰²Basel Committee on Banking Supervision (BCBS) (2022). *Prudential Treatment of Cryptoasset Exposures*. Disponibile su: <https://www.bis.org/bcbs/publ/d533.pdf>.

Proof of Stake, riducendo la dipendenza da hardware specializzato, incoraggia un numero più ampio di validatori e, di conseguenza, una diffusione più capillare dell'informazione. Con più attori coinvolti nel processo di validazione, si attenua il rischio di concentrazione del potere decisionale e si favorisce una rapida integrazione delle notizie nei prezzi.

Sebbene la semplice trasparenza sulle emissioni e sul consumo energetico non garantisca automaticamente un mercato più efficiente, essa crea le condizioni per una maggiore competitività informativa tra gli operatori. In tale scenario, i progetti possono trovare conveniente adottare soluzioni di consenso in grado di incorporare rapidamente gli eventi rilevanti, migliorando così la capacità del mercato di riflettere tutta l'informazione disponibile¹⁰³.

È importante sottolineare che si tratta di una prospettiva potenziale: non è certo che tutti i network abbandonino meccanismi ad alto dispendio energetico né che gli investitori puniscano sistematicamente i protocolli meno sostenibili. Tuttavia, qualora questa dinamica trovasse conferme nella pratica, potrebbe innescarsi un processo virtuoso in cui la sostenibilità, promossa dalla nuova regolamentazione, diviene un fattore competitivo, spingendo il mercato verso un equilibrio informativo più completo e una maggiore efficienza complessiva.

2.1.2 Riduzione dell'incertezza normativa e reputazionale

Se l'obbligo di disclosure ambientale introdotto da MiCA spinge indirettamente a riconsiderare i meccanismi di consenso, il Proof of Stake emerge come una soluzione particolarmente interessante non solo sotto il profilo energetico, ma anche in termini di riduzione dell'incertezza normativa e reputazionale. Dall'analisi svolta in precedenza, è chiaro come il mercato dei cripto-asset sia altamente sensibile alle percezioni degli investitori, i quali valutano costantemente non solo le prospettive tecniche ed economiche

¹⁰³Healy, P. M., & Palepu, K. G. (2001). *Information Asymmetry, Corporate Disclosure, and the Capital Markets: A Review of the Empirical Disclosure Literature*. *Journal of Accounting and Economics*, 31(1-3), pp. 405-440.

di un progetto, ma anche l'allineamento alle nuove sensibilità legate alla sostenibilità e alle normative in evoluzione¹⁰⁴.

Adottare PoS potrebbe offrire diversi benefici in questa direzione. Primo, dal punto di vista normativo, un protocollo che richiede una frazione minima dell'energia rispetto a PoW risulta meno esposto all'incertezza futura. Se dovessero emergere politiche più stringenti in materia di emissioni o tasse sul carbonio, una rete basata su PoW potrebbe trovarsi a fronteggiare costi operativi e obblighi di compliance molto più elevati¹⁰⁵. Al contrario, una blockchain PoS, già intrinsecamente più efficiente dal punto di vista energetico, potrebbe adattarsi con minori difficoltà a una stretta regolatoria ambientale¹⁰⁶. In un contesto europeo nel quale MiCA rappresenta solo il primo passo verso un approccio regolamentare più strutturato e integrato con gli obiettivi climatici dell'UE, minimizzare l'esposizione a possibili scenari avversi sul piano normativo diventa strategico.

Secondo, sul piano reputazionale, l'adozione di PoS può costituire un segnale forte verso gli stakeholder. Le criptovalute e le piattaforme che impiegano PoS non appaiono semplicemente più "green" agli occhi dell'opinione pubblica e dei media, ma sono anche più attraenti per operatori istituzionali che incorporano criteri ESG nelle loro strategie di investimento. Il mondo della finanza tradizionale sta integrando progressivamente tali criteri, e la capacità di un cripto-asset di presentarsi come sostenibile e attento all'impatto ambientale potrebbe favorire la sua inclusione in portafogli diversificati, fondi comuni o ETF tematici. Ciò, in ultima analisi, può tradursi in una maggiore profondità di mercato, una liquidità più elevata e una riduzione della volatilità non informativa¹⁰⁷.

La riduzione dell'incertezza normativa e reputazionale va inoltre contestualizzata in un ecosistema cripto ancora in fase di maturazione. Se i primi anni del mercato erano segnati

¹⁰⁴Ferrari, V. (2020). *The Regulation of Crypto-Assets in the EU - Investment and Payment Tokens under the Radar*. Maastricht Journal of European and Comparative Law, 27(3), pp. 325-342.

¹⁰⁵Stoll, C., Klaufen, L., & Gallersdörfer, U. (2019). *The Carbon Footprint of Bitcoin*. Joule, 3(7), pp. 1647-1661.

¹⁰⁶Kiayias, A., Russell, A., David, B., & Oliynykov, R. (2017). *Ouroboros: A Provably Secure Proof-of-Stake Blockchain Protocol*. In *Advances in Cryptology – CRYPTO 2017*, pp. 357–388.

¹⁰⁷Eccles, R. G., Newquist, S. C., & Schatz, R. (2007). *Reputation and Its Risks*. Harvard Business Review, 85(2).

da una deregolamentazione quasi totale, ora l'approccio sta cambiando rapidamente. Le autorità di vigilanza, le banche centrali e i governi stanno cercando di capire come inquadrare i crypto-asset nel sistema finanziario. In un ambiente dove le regole si stanno definendo e le aspettative degli investitori si affinano, trovarsi dalla parte "giusta", cioè quella delle reti sostenibili e facilmente conforme ai futuri standard, potrebbe essere un vantaggio competitivo significativo.

Nella prospettiva teorica che stiamo esplorando, tutto ciò influisce indirettamente sulla qualità e sulla quantità delle informazioni disponibili sul mercato. Se l'incertezza normativa cala perché il protocollo è considerato coerente con le linee di sviluppo regolamentare, e se la reputazione è solida grazie a una percezione di sostenibilità, gli operatori potrebbero sentirsi più sicuri nell'investire, scambiare e ribilanciare i propri portafogli. Questo incremento di fiducia, a sua volta, facilita una migliore formazione dei prezzi¹⁰⁸, poiché i partecipanti reagiscono con minore ritrosia alle nuove informazioni, integrandole più rapidamente nei prezzi degli asset. Anche qui, non si tratta di un nesso causale garantito, ma di una dinamica plausibile: meno incertezze (normative e reputazionali) e più trasparenza incoraggiano scambi più frequenti e informati, creando le condizioni per un mercato potenzialmente più efficiente.

Va ricordato che una maggiore efficienza di mercato non dipende solo dal meccanismo di consenso o dall'adozione di standard sostenibili: entrano in gioco fattori come la disponibilità di dati, la capacità degli operatori di elaborare tali informazioni, la presenza di arbitraggi e la complessità dei prodotti derivati¹⁰⁹. Tuttavia, ridurre la percezione del rischio normativo e migliorare l'immagine del network davanti al pubblico e alle istituzioni costituisce un passo nella direzione giusta. In altre parole, PoS può essere visto come un asset intangibile: non solo permette di ridurre i costi energetici, ma anche di navigare in un panorama regolamentare incerto con maggiore agilità, promuovendo la fiducia e, potenzialmente, avvicinando il mercato a un modello in cui i prezzi riflettono più rapidamente la totalità delle informazioni disponibili.

¹⁰⁸Healy, P. M., & Palepu, K. G. (2001). *Information Asymmetry, Corporate Disclosure, and the Capital Markets: A Review of the Empirical Disclosure Literature*. *Journal of Accounting and Economics*, 31(1-3), pp. 405-440.

¹⁰⁹Fama, E. F. (1998). *Market Efficiency, Long-Term Returns, and Behavioral Finance*. *Journal of Financial Economics*, 49(3), pp. 283-306.

2.1.3 Effetti sistemici: come la presenza istituzionale rafforza fiducia e ordine nel mercato

Le considerazioni affrontate finora sul ruolo della disclosure ambientale, sulla scelta di Proof of Stake e sulla riduzione delle incertezze normative e reputazionali assumono un valore ancora maggiore se considerate nel loro complesso impatto sistemico. Non ci troviamo di fronte a cambiamenti isolati, bensì a dinamiche potenzialmente in grado di ridisegnare la composizione stessa del mercato cripto e le interazioni tra i suoi partecipanti. Se l'adozione di PoS diventa più comune, incentivata da un contesto normativo in evoluzione (come quello configurato da MiCA) e da una maggiore consapevolezza degli investitori, i mercati cripto potrebbero acquisire alcune caratteristiche simili a quelle dei mercati finanziari tradizionali maturi, almeno sotto il profilo dell'ampiezza della partecipazione e della qualità dell'informazione circolante.

Uno degli effetti sistemici più rilevanti potrebbe essere l'ingresso o il rafforzamento della presenza di attori istituzionali¹¹⁰. Già da qualche anno si nota un crescente interesse di fondi d'investimento, hedge fund, società di gestione patrimoniale e banche verso le criptovalute. Tuttavia, l'incertezza regolamentare e, in certi casi, la cattiva fama legata al consumo energetico e all'impatto ambientale di alcuni protocolli hanno agito da freno, limitando l'esposizione delle istituzioni finanziarie più prudenti. Nel momento in cui un quadro normativo come MiCA offre maggiore chiarezza, e la pressione sulla sostenibilità spinge i progetti a optare per soluzioni meno energivore come il PoS, gli investitori istituzionali potrebbero sentirsi più a loro agio nell'includere cripto-asset nei loro portafogli.

Questo passaggio non è banale, perché le istituzioni finanziarie dispongono di risorse, competenze e capacità analitiche avanzate. Il loro ingresso non si limita a portare capitali freschi, ma introduce anche strategie di arbitraggio più sofisticate, metodologie di analisi fondamentali e tecniche di risk management consolidate. Una maggiore partecipazione istituzionale può dunque favorire una riduzione della volatilità non informativa (quella legata, ad esempio, a rumor privi di fondamento) e aumentare la rapidità con cui le notizie

¹¹⁰Lopez-de-Silanes, F., McCahery, J. A., & Pudschedl, P. C. (2024). *Institutional investors and ESG preferences*. Corporate Governance: An International Review.

materialmente rilevanti sono riflesse nei prezzi¹¹¹. In altre parole, l'ingresso di questi attori contribuisce a migliorare la qualità del processo di formazione dei prezzi, avvicinando i mercati cripto a uno scenario in cui l'efficienza (intesa come capacità di incorporare l'informazione disponibile) aumenta.

Un mercato più "istituzionalizzato" e sostenibile, anche dal punto di vista energetico, può inoltre alimentare la fiducia degli operatori retail e dei piccoli investitori. Se gli operatori professionali trovano l'ambiente meno opaco e più coerente con i principi ESG, i piccoli investitori, pur restando un gruppo molto eterogeneo e sensibile alle mode, possono almeno contare su segnali più chiari circa la solidità dei progetti. La presenza di standard minimi di disclosure ambientale, garantita da MiCA, riduce le asimmetrie informative legate all'effettivo costo di mantenimento della rete. Gli investitori non istituzionali possono così distinguere meglio tra progetti potenzialmente duraturi e affidabili, e progetti più fragili o a rischio di normative sfavorevoli in futuro¹¹².

A livello di sistema, questo conduce a una potenziale riduzione delle inefficienze dovute a informazione asimmetrica. Se, in passato, l'assenza di norme chiare consentiva ad alcuni progetti di prosperare su basi poco sostenibili e di "nascondere" i propri difetti energetici, ora la trasparenza obbligatoria forza questi progetti a mostrare le loro carte. Quelli che non riescono ad adeguarsi rischiano di perdere attrattività, mentre quelli che adottano PoS e migliorano la propria immagine ambientale possono ottenere un vantaggio competitivo. Nel medio-lungo termine, tale dinamica di selezione potrebbe portare a un mercato con meno progetti di bassa qualità e un numero maggiore di progetti solidi, sostenibili e consapevoli delle dinamiche regolamentari. Un mercato popolato da operatori più informati e progetti più affidabili riduce il "rumore" informativo, consentendo ai prezzi di riflettere più rapidamente i cambiamenti reali di valore e le notizie rilevanti, piuttosto che rispondere a hype o a manipolazioni dovute alla mancanza di informazioni chiare.

È importante sottolineare che stiamo parlando di una potenzialità e non di una certezza. L'efficacia di questi meccanismi dipende dalla reale reazione dei partecipanti al mercato:

¹¹¹Li, W., & Wang, S. S. (2010). *Daily institutional trades and stock price volatility in a retail investor dominated emerging market*. *Journal of Financial Markets*, 13(4), pp. 448-474.

¹¹²Tong, H. (2007). *Disclosure standards and market efficiency: Evidence from analysts' forecasts*. *Journal of International Economics*, 72(1), pp. 222-241.

gli investitori istituzionali potrebbero comunque scegliere di rimanere cauti per ragioni estranee alla sostenibilità, oppure alcuni progetti potrebbero non adeguarsi, preferendo rimanere fuori da certi standard. Inoltre, la maggiore efficienza di mercato è un concetto ampio che richiede molte condizioni: avere più informazione e partecipanti istituzionali è utile, ma bisogna anche considerare i costi di transazione, la maturità degli strumenti derivati e la stabilità dell'ecosistema delle infrastrutture (exchange, wallet, custodi, servizi di analisi)¹¹³.

Nonostante queste cautele, lo scenario resta interessante: MiCA potrebbe portare, indirettamente, a una riconfigurazione del mercato cripto in senso più sostenibile e ordinato. L'evidenza empirica dovrà confermare o meno queste ipotesi. Nel frattempo, però, il quadro teorico suggerisce che un contesto normativo che promuove la trasparenza ambientale può creare le basi per attrarre operatori istituzionali, incrementare la fiducia e la qualità informativa, e, in ultima analisi, migliorare il funzionamento dei mercati cripto. PoS, come scelta tecnologica sostenibile e meno costosa, si inserisce perfettamente in questo quadro, fornendo uno strumento operativo per tradurre le spinte normative e reputazionali in un cambiamento concreto della struttura di mercato, potenzialmente favorevole a una maggiore efficienza.

2.2 Mercati efficienti: l'ipotesi EMH

La riflessione sul potenziale impatto del quadro normativo introdotto da MiCA e sulla diffusione di meccanismi di consenso più sostenibili come il Proof of Stake non può prescindere da una considerazione teorica fondamentale: che cosa significa, in termini economici, rendere un mercato "più efficiente"? Il concetto di efficienza di mercato è stato a lungo studiato nella teoria finanziaria, trovando la sua formalizzazione più nota nell'Ipotesi di Mercato Efficiente (EMH), introdotta da Eugene Fama negli anni '70¹¹⁴. L'EMH, in sostanza, afferma che in un mercato efficiente i prezzi degli asset riflettono in ogni momento tutta l'informazione disponibile. Ciò implica che non dovrebbe essere

¹¹³Gilson, R. J., & Kraakman, R. H. (1984). *The mechanisms of market efficiency*. Va. L. Rev., 70, 549.

¹¹⁴Yen, G., & Lee, C. F. (2008). *Efficient market hypothesis (EMH): past, present and future*. Review of Pacific Basin Financial Markets and Policies, 11(02), pp. 305-329.

possibile, in modo sistematico e a lungo termine, ottenere rendimenti anomali (cioè superiori al mercato) utilizzando l'informazione pubblicamente disponibile, poiché qualsiasi nuova informazione viene immediatamente incorporata nel prezzo. Da questa prospettiva, i mercati efficienti non premiano i trader per la loro abilità di analisi dell'informazione nota, bensì per la loro capacità di gestire il rischio o di operare con informazioni realmente privilegiate (ipotesi che, nella forma più forte di EMH, non fornisce comunque un vantaggio persistente).

Tuttavia, l'efficienza di mercato non è una proprietà binaria, bensì un concetto sfaccettato: non si tratta di dire che un mercato è o non è efficiente. L'efficienza dipende dalla rapidità con cui le informazioni vengono incorporate nei prezzi, dalla qualità dell'informazione, dal numero e dalla tipologia degli operatori, dalla liquidità, dall'assenza di barriere all'ingresso e da molte altre condizioni. Nei mercati crypto, fino a tempi recenti, l'ambiente è stato caratterizzato da alta volatilità, partecipanti eterogenei (spesso non istituzionali), asimmetrie informative, rumor, e una scarsa chiarezza regolamentare. Tutti elementi che, teoricamente, possono limitare il grado di efficienza.

Nel contesto che stiamo esplorando, il collegamento tra EMH, MiCA e PoS è il seguente: se il passaggio a meccanismi di consenso più sostenibili e la pressione normativa della disclosure ambientale attraggono attori istituzionali, aumentano la qualità e la quantità dell'informazione e riducono le incertezze normative, è plausibile che i prezzi degli asset crypto diventino più rapidi nel riflettere le notizie materiali. In altre parole, le condizioni per avvicinarsi a un mercato più efficiente potrebbero migliorare.

Certo, l'EMH non garantisce che qualsiasi intervento normativo o qualsiasi evoluzione tecnologica porti a un incremento dell'efficienza. Inoltre, le criptovalute sono asset non tradizionali, privi di flussi di cassa intrinseci, la cui valutazione può risultare più complessa e, talvolta, legata a narrazioni o sentiment di comunità piuttosto che a fondamentali economici chiari. Tuttavia, la teoria dell'EMH fornisce una lente attraverso cui leggere l'evoluzione dei mercati: se migliora la trasparenza, se l'informazione è di migliore qualità, se si riducono i costi di transazione e il rischio di manipolazione, allora

l'informazione diventa più uniformemente distribuita e i prezzi possono riflettere le novità più prontamente¹¹⁵.

Alla base dell'EMH vi è un presupposto: gli agenti economici sono razionali o, quanto meno, la competizione tra loro è tale da eliminare rapidamente opportunità di profitto non giustificate. Questa assunzione è stata spesso criticata, perché gli esseri umani non sono sempre razionali, esistono “bolle speculative” e fenomeni comportamentali¹¹⁶. Tuttavia, l'EMH resta un punto di riferimento importante per comprendere le condizioni necessarie a rendere un mercato più simile a un ambiente informativo “perfetto”.

Prima di legare più direttamente EMH e mercato crypto, è utile distinguere le diverse forme di efficienza ipotizzate dalla teoria, in modo da capire a quale livello di efficienza si potrebbe aspirare e quali siano le sfide peculiari del settore crypto.

2.2.1 Le diverse forme di EMH

L'Ipotesi di Mercato Efficiente è stata articolata in tre forme principali¹¹⁷, che differiscono per il tipo di informazione che si presume sia già incorporata nei prezzi:

- *Forma debole (Weak Form)*: La forma debole dell'EMH sostiene che i prezzi riflettono già tutta l'informazione storica dei prezzi stessi e dei volumi di scambio. In un mercato con efficienza debole, non è possibile ottenere rendimenti extra utilizzando l'analisi tecnica, ossia analizzando pattern storici di prezzo e volume. Tutto ciò che è già avvenuto è noto, e il mercato ha già scontato questa informazione nei prezzi attuali. Questo è il grado più basilare di efficienza: se il mercato non è efficiente nemmeno in forma debole, significa che l'analisi dei dati storici di prezzo può fornire vantaggi sistematici, e quindi l'informazione storica non è ancora pienamente incorporata.
- *Forma semi-forte (Semi-Strong Form)*: La forma semi-forte afferma che i prezzi riflettono non solo i dati storici di mercato, ma anche tutte le informazioni

¹¹⁵Titan, A. G. (2015). *The efficient market hypothesis: Review of specialized literature and empirical research*. *Procedia Economics and Finance*, 32, pp. 442-449.

¹¹⁶Al Mamun, M., Syeed, M. A., & Yasmeen, F. (2015). *Are investors rational, irrational or normal?*. *Journal of Economic & Financial Studies*, 3(04), pp. 1-15.

¹¹⁷Fama, E. F. (1991). *Efficient Capital Markets: II*. *The Journal of Finance*, 46(5), pp. 1575–1617.

pubblicamente disponibili, comprese quelle contenute nei bilanci, nei comunicati stampa, negli annunci normativi e in ogni fonte di informazione accessibile a tutti. In un mercato semi-forte efficiente, l'analisi fondamentale non dovrebbe consentire profitti anomali, poiché ogni notizia già nota è immediatamente scontata nei prezzi. Per migliorare l'efficienza da debole a semi-forte occorre un sistema informativo chiaro e trasparente, un'elevata competizione informativa tra gli operatori e meccanismi che incentivino la rapida diffusione e comprensione delle notizie. L'idea è che nessun investitore possa ottenere guadagni sfruttando notizie pubbliche note a tutti, poiché il mercato è in grado di assimilarle istantaneamente.

- *Forma forte (Strong Form)*: La forma forte dell'EMH è la più ambiziosa: sostiene che i prezzi riflettono persino le informazioni private, quelle non ancora divulgate pubblicamente. Questo implica che anche l'insider trading, l'accesso a informazioni riservate, non conferisce un vantaggio persistente. In pratica, un mercato con efficienza forte è un ideale teorico: non esiste asimmetria informativa di alcun tipo. Il raggiungimento della forma forte è estremamente difficile, se non irrealistico, perché la natura stessa dell'informazione privilegiata presuppone l'esistenza di asimmetrie strutturali e limiti pratici alla diffusione istantanea di ogni dato.

Pur riconoscendo il valore teorico dell'EMH come modello di riferimento, è importante evidenziare come il contesto cripto presenti complessità peculiari. Sebbene una maggiore trasparenza, l'ingresso di attori istituzionali e la diffusione di meccanismi di consenso più sostenibili possano favorire il passaggio a forme di efficienza almeno debole o semi-forte, occorre tenere conto della volatilità intrinseca degli asset digitali, della scarsità di fondamentali chiari e dell'impatto di elementi comportamentali e narrativi. Tali caratteristiche rendono il raggiungimento di una piena efficienza di mercato una sfida ben più ardua rispetto ai mercati tradizionali, suggerendo di interpretare le implicazioni dell'EMH in ambito cripto con maggiore prudenza.

Nella realtà, i mercati finanziari tradizionali sono considerati almeno efficienti in forma debole, e in molti casi mostrano segni di efficienza semi-forte. L'efficienza forte è invece quasi sempre fuori portata. Perfino nei mercati azionari più sviluppati e regolamentati, l'insider trading e le asimmetrie informative restano problemi concreti, seppur mitigati

da normative stringenti e una vigilanza attiva¹¹⁸. Nel settore cripto, la situazione è ancor più complessa: in passato molti investitori hanno ottenuto profitti utilizzando analisi tecniche o sfruttando “leak” d’informazione non ancora noti al grande pubblico¹¹⁹. Ciò suggerisce che il mercato non sia efficiente nemmeno in forma debole, almeno in certi periodi. Inoltre, la presenza di partecipanti non professionali, le “balene” che detengono ingenti quantità di token, e l’opacità di alcune piattaforme hanno storicamente favorito la persistenza di pattern di prezzo e la sfruttabilità di informazioni non uniformemente distribuite.

Tuttavia, con il progredire della regolamentazione, la crescita della trasparenza e la partecipazione di investitori esperti, ci si potrebbe attendere un passaggio graduale verso una efficienza almeno di tipo debole, e forse semi-forte, in certi segmenti del mercato o per i principali cripto-asset. Ad esempio, se importanti exchange di criptovalute e piattaforme di analisi consolidano i propri standard informativi, rendendo disponibili dati di alta qualità su volumi, ordini, liquidità e, grazie a MiCA, anche su parametri ambientali e di governance, gli operatori potrebbero non riuscire più a ottenere profitti consistenti usando semplicemente l’analisi dei dati passati. La riduzione delle asimmetrie informative di base (come la scarsa chiarezza sulle attività dei validatori, sui rischi normativi o sull’impatto ambientale) potrebbe dunque rendere meno efficaci le strategie basate su informazioni note da tempo, portando il mercato almeno allo stadio di efficienza debole.

Nel medio termine, la possibilità di raggiungere un grado di efficienza semi-forte dipenderà dalla qualità e dalla tempestività con cui le informazioni non strettamente legate a pattern storici (come comunicazioni delle autorità di vigilanza, annunci su innovazioni tecnologiche o partenariati strategici) vengono inglobate nei prezzi. Se la trasparenza creata dalle normative europee aiuta a rendere note, quasi in tempo reale, le novità su aggiornamenti di protocollo, cambiamenti nel meccanismo di consenso, parametri ESG o nuove forme di cooperazione tra stakeholder, allora il mercato cripto potrebbe incorporare tali informazioni con prontezza, riducendo la possibilità di guadagni

¹¹⁸Bollerslev, T., & Hodrick, R. J. (1999). *Financial market efficiency tests*. Handbook of Applied Econometrics Volume 1: Macroeconomics, pp. 361-399.

¹¹⁹Félez-Viñas, E., Johnson, L., & Putniņš, T. J. (2022). *Insider Trading in Cryptocurrency Markets*. Disponibile su: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4184367.

anomali basati sull'analisi fondamentale. In questo scenario, almeno per le criptovalute più mature (ad esempio Ethereum dopo il passaggio a PoS e l'adozione di metriche di sostenibilità), potremmo osservare un comportamento dei prezzi più coerente con la forma semi-forte, dove l'informazione pubblica rilevante è rapidamente integrata¹²⁰.

La domanda diventa dunque: l'introduzione di standard di sostenibilità, la riduzione delle asimmetrie informative e l'adozione di meccanismi di consenso come PoS (che riducono incertezze, costi energetici e potenzialmente barriere informative) possono creare le condizioni necessarie per migliorare il livello di efficienza dei mercati crypto? Non si parla qui di raggiungere l'efficienza forte, che resta un traguardo teoricamente ideale e quasi irraggiungibile, ma di osservare una maturazione che consenta almeno di eliminare i vantaggi basati sull'analisi tecnica o sull'informazione pubblica tempestivamente nota¹²¹. Se i prezzi dei crypto-asset incorporeranno più rapidamente le notizie regolamentari, ambientali, e tecniche (come l'introduzione di nuove funzionalità o la risoluzione di bug), allora avremo un mercato tendenzialmente più vicino alla forma semi-forte.

Questo passaggio potrebbe non avvenire in modo uniforme per tutte le criptovalute e tutti i settori dell'ecosistema. Alcune nicchie di mercato, token meno liquidi o piattaforme prive di trasparenza potrebbero rimanere ancora a uno stadio di efficienza inferiore. Tuttavia, se l'azione regolamentare e la spinta verso standard informativi elevati si concentreranno sugli asset e sulle reti di maggiore rilevanza, si potrà innescare un effetto positivo a catena. Le buone pratiche di trasparenza, governance e sostenibilità saranno premiate dagli investitori, aumentando la liquidità e la competizione informativa in quei segmenti, e da lì potranno diffondersi anche ad altri progetti.

2.2.2 Informazione e trasparenza: come i mercati incorporano i dati più rapidamente

L'EMH si fonda sulla disponibilità, la diffusione e la fruibilità dell'informazione. In un mercato efficiente, non appena emerge una notizia rilevante, i prezzi si adeguano quasi

¹²⁰Kang, H. J., Lee, S. G., & Park, S. Y. (2022). *Information efficiency in the cryptocurrency market: The efficient-market hypothesis*. *Journal of Computer Information Systems*, 62(3), pp. 622-631.

¹²¹Noda, A. (2021). *On the evolution of cryptocurrency market efficiency*. *Applied Economics Letters*, 28(6), pp. 433-439.

istantaneamente, rendendo impossibile ottenere profitti anomali sfruttando dati già noti. Questo quadro richiede che l'informazione circoli senza ostacoli, sia facilmente accessibile a tutti i partecipanti e che il costo di transazione per agire sul mercato sia sufficientemente basso da incoraggiare un rapido adeguamento dei prezzi. Inoltre, è necessario che un numero sufficiente di operatori abbia sia gli incentivi sia le capacità di analizzare e interpretare l'informazione, trasformandola in scelte di portafoglio coerenti con quanto appreso¹²².

In un contesto come quello cripto, nel quale il passato è stato segnato da opacità, rumor, asimmetrie informative e incertezze normative, qualsiasi iniziativa che migliori la trasparenza contribuisce potenzialmente a rendere il processo di formazione del prezzo più efficiente. MiCA, imponendo standard di disclosure ambientale e incoraggiando, in modo indiretto, l'adozione di meccanismi di consenso meno costosi in termini energetici come il Proof of Stake, può favorire l'emergere di un ecosistema informativo più ricco e credibile. La disponibilità di dati affidabili sull'impatto energetico di un protocollo, sulle sue pratiche di governance o sui rischi normativi ai quali è esposto, offre elementi utili agli investitori per valutare con maggiore precisione il valore intrinseco dell'asset¹²³.

Concordando con l'idea che una maggiore trasparenza informativa rappresenti un presupposto fondamentale per l'efficienza, è opportuno sottolineare che questa condizione, pur necessaria, non è di per sé sufficiente. Infatti, sebbene la disponibilità di dati chiari e accessibili a tutti riduca le asimmetrie informative, l'effettiva rapidità con cui queste informazioni vengono elaborate dal mercato dipende anche dalla capacità degli operatori di interpretarle correttamente, dall'assenza di rumor fuorvianti e dal contesto generale di maturità del settore. In altre parole, la trasparenza facilita il processo, ma restano importanti il livello di competenza degli investitori e la qualità dei meccanismi di analisi e diffusione delle informazioni.

Se la scelta di adottare PoS riduce le barriere d'ingresso per nuovi validatori, ne consegue che più attori informati partecipano al network, incrementando la diversità delle fonti informative e l'intensità della competizione informativa tra i partecipanti. In tal modo,

¹²²Ho, T. S., & Michaely, R. (1988). *Information quality and market efficiency*. Journal of Financial and Quantitative Analysis, 23(1), pp. 53-70.

¹²³Brunnermeier, M. K. (2005). *Information leakage and market efficiency*. The Review of Financial Studies, 18(2), pp. 417-457.

l'integrazione delle notizie nei prezzi può diventare più rapida. Per esempio, nel momento in cui emerge una novità tecnologica (come l'introduzione di un aggiornamento al protocollo) o un cambiamento normativo (come l'approvazione di una nuova direttiva sull'impronta ambientale), un maggior numero di operatori è in grado di reagire con prontezza, comprando o vendendo e influenzando il prezzo. Questo costante monitoraggio e adattamento ha il potenziale di rendere la curva di apprendimento collettiva più ripida e di ridurre i ritardi nell'incorporazione dell'informazione¹²⁴.

Non si tratta, tuttavia, di un semplice esercizio di teoria. L'ingresso di operatori istituzionali nel mercato, attratti da condizioni normative più chiare e da protocolli meno esposti a rischi ambientali e reputazionali, introduce un attore capace di processare l'informazione in maniera sofisticata e sistematica. Gli investitori istituzionali dispongono di team di analisti, strumenti quantitativi avanzati e un approccio disciplinato alla gestione del rischio¹²⁵. Il loro operato può contribuire a stabilizzare il mercato, poiché riduce le opportunità di profitto basate su distorsioni informative e incentiva la rapida correzione dei prezzi verso livelli coerenti con le notizie disponibili.

È importante sottolineare che maggiore informazione e minori asimmetrie non significano necessariamente minore volatilità. Un mercato può restare volatile se le informazioni disponibili sono contraddittorie o se gli scenari futuri sono incerti, ma questa volatilità rispecchierebbe eventi e fondamentali reali, non errori di comunicazione, lacune informative o manipolazioni basate sull'ignoranza degli attori coinvolti. In sostanza, un mercato più trasparente e maturo rimane esposto alle reali incertezze del mondo, ma riduce la quota di volatilità imputabile alle inefficienze e alle imperfezioni del flusso informativo¹²⁶.

Il passaggio a un sistema più informato e trasparente, incentivato dalle regole di MiCA e dalla tendenza verso la sostenibilità, non garantisce da solo l'approdo a un mercato pienamente efficiente. Tuttavia, crea le premesse affinché l'informazione diventi un bene

¹²⁴Zhou, W., Zhong, G. Y., & Li, J. C. (2022). *Stability of financial market driven by information delay and liquidity in delay agent-based model*. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*.

¹²⁵Breugem, M., & Buss, A. (2019). *Institutional investors and information acquisition: Implications for asset prices and informational efficiency*. *The Review of Financial Studies*, 32(6), pp. 2260-2301.

¹²⁶Fleming, J., Kirby, C., & Ostdiek, B. (1998). *Information and volatility linkages in the stock, bond, and money markets*. *Journal of financial economics*, 49(1), pp. 111-137.

condiviso, ben distribuito e prontamente utilizzato dagli attori più esperti. Se questa evoluzione andrà di pari passo con una riduzione dei costi di transazione, una maggiore liquidità e l'ingresso di specialisti in grado di cogliere ogni opportunità di arbitraggio informativo, allora l'efficienza potrà aumentare. In altre parole, un mercato crypto che incorpora la lezione della trasparenza e della sostenibilità potrà, nel tempo, avvicinarsi allo scenario delineato dall'EMH, in cui i prezzi riflettono, con tempistiche sempre più brevi, i cambiamenti nell'informazione disponibile.

2.2.3 Nesso tra efficienza di mercato e blockchain

Un elemento distintivo dei mercati crypto rispetto ai mercati finanziari tradizionali è la natura decentralizzata e distribuita della tecnologia sottostante, la blockchain. Se da un lato la decentralizzazione ha implicato inizialmente l'assenza di regolamentazioni chiare e uniformi, dall'altro essa offre potenzialmente condizioni favorevoli a una diffusione più simmetrica dell'informazione. In un mercato finanziario convenzionale, parte del vantaggio informativo può derivare dalla posizione di intermediari centralizzati o di soggetti che, grazie a relazioni privilegiate o a strutture di mercato complesse, possono accedere a dati o canali informativi prima di altri. Ciò può favorire asimmetrie e inefficienze, poiché i prezzi non incorporano le informazioni in modo equo e tempestivo¹²⁷.

La blockchain, al contrario, registra ogni transazione in modo pubblico e immutabile su un ledger distribuito, accessibile a tutti gli utenti senza discriminazioni. I dati sono disponibili istantaneamente e globalmente: chiunque disponga di una connessione internet può osservare i movimenti di fondi, l'attività dei validatori, le modifiche al protocollo e le interazioni tra smart contract. Questa trasparenza "strutturale" riduce la dipendenza da intermediari informativi e la possibilità che alcuni operatori si avvantaggino di informazioni non ufficialmente divulgate. Se la tecnologia è progettata per essere aperta e consultabile, il "vantaggio informativo" di un singolo attore risulta

¹²⁷Güth, W., Krahn, J. P., & Rieck, C. (1997). *Financial markets with asymmetric information: A pilot study focusing on insider advantages*. *Journal of Economic Psychology*, 18(2-3), pp. 235-257.

limitato, almeno dal punto di vista dei dati on-chain, e l'efficienza di mercato può teoricamente beneficiarne¹²⁸.

L'integrazione di PoS in questo contesto rappresenta un ulteriore passo. Come discusso nei paragrafi precedenti, PoS può attrarre più partecipanti, inclusi validatori istituzionali ed esperti, che hanno interesse a mantenere l'ecosistema stabile e informativamente trasparente. Un numero crescente di validatori indipendenti significa minori chance di concentrare il potere di validazione e minore probabilità che l'informazione resti confinata nelle mani di pochi attori. Più validatori non significa automaticamente maggiore efficienza informativa, ma aumenta le probabilità che, qualora emergano nuove informazioni rilevanti, esse vengano rapidamente tradotte in pressioni di acquisto o vendita, riflettendosi nei prezzi di mercato.

Il nesso tra efficienza di mercato e blockchain si concretizza dunque in due direzioni. Prima, la blockchain mette a disposizione l'informazione in modo simultaneo per tutti gli attori, riducendo così i canali privilegiati e, di conseguenza, una tradizionale fonte di inefficienza informativa. Seconda, la distribuzione del potere di validazione, unita alla riduzione dei costi di partecipazione (favorita sia dai meccanismi PoS sia dalla trasparenza introdotta da MiCA), promuove una concorrenza più ampia tra gli operatori, accelerando l'incorporazione dei dati nei prezzi. Se questa dinamica si consolida, il mercato può evolvere verso un modello in cui le opportunità di profitto, derivanti da informazioni note a tutti, svaniscono rapidamente, in linea con i principi dell'Efficient Market Hypothesis (EMH).

2.2.4 Riduzione della persistenza dei rendimenti: segnale di un mercato più reattivo

Un modo concreto per valutare se un mercato si stia effettivamente avvicinando a uno stato di maggiore efficienza è analizzare la persistenza dei rendimenti nel tempo. In un mercato inefficiente, i prezzi possono mostrare pattern prevedibili, come un trend ascendente che si autoalimenta, oppure episodi in cui i prezzi rimbalzano

¹²⁸Rizal Batubara, F., Ubacht, J., & Janssen, M. (2019). *Unraveling transparency and accountability in blockchain*. In Proceedings of the 20th annual international conference on digital government research, pp. 204-213.

sistematicamente dopo un calo, rendendo possibile anticipare i movimenti futuri. Questo tipo di prevedibilità è un segnale di inefficienza informativa, poiché suggerisce che non tutta l'informazione disponibile è stata incorporata nei prezzi, consentendo a determinati operatori di sfruttare pattern noti per ottenere profitti¹²⁹. In altre parole, l'esistenza di regolarità temporali facilmente identificabili implica che il mercato non integra immediatamente le notizie nel prezzo dell'asset, lasciando uno spazio temporale in cui approfittare di tale ritardo.

Al contrario, in un mercato efficiente, le serie storiche dei rendimenti tendono a comportarsi come un "random walk" o, più precisamente, a non presentare autocorrelazioni significative. Ciò significa che i rendimenti passati non forniscono indicazioni utili per prevedere i rendimenti futuri¹³⁰. Quando ogni nuova informazione viene immediatamente incorporata nei prezzi, questi ultimi non mostrano pattern prevedibili: ciascun aggiustamento dei prezzi riflette esclusivamente i nuovi dati emersi, senza dipendere da andamenti precedenti. Questo scenario riduce la potenzialità di ottenere guadagni sistematici sfruttando soltanto l'analisi del passato. Per gli investitori, ciò equivale a dire che nessuna strategia basata unicamente sullo storico dei prezzi garantisce profitti anomali nel lungo periodo.

Nel caso delle criptovalute, diversi studi hanno esaminato la persistenza dei rendimenti per comprendere se il mercato stesse maturando verso forme di maggiore efficienza. Uno degli strumenti analitici più citati a tal riguardo è l'Hurst exponent, un indicatore statistico che misura il grado di persistenza o anti-persistenza di una serie storica. Un valore di Hurst exponent superiore a 0,5 indica tendenze persistenti, mentre valori intorno a 0,5 suggeriscono un comportamento più casuale (simile a un random walk). Se, dopo un cambiamento strutturale l'Hurst exponent di una criptovaluta si avvicina a 0,5, ciò può

¹²⁹Givoly, D., & Lakonishok, J. (1979). *The information content of financial analysts' forecasts of earnings: Some evidence on semi-strong inefficiency*. *Journal of Accounting and Economics*, 1(3), pp. 165-185.

¹³⁰Jacobsen, R. (1988). *The persistence of abnormal returns*. *Strategic management journal*, 9(5), pp. 415-430.

essere interpretato come un segnale empirico di riduzione della prevedibilità e, dunque, di maggiore efficienza informativa¹³¹.

In altre parole, se prima dell'intervento normativo e del cambio di protocollo l'andamento dei prezzi era parzialmente prevedibile sulla base di pattern storici, ma successivamente tali pattern scompaiono, è possibile inferire che il mercato si è avvicinato a uno stato in cui l'informazione disponibile viene integrata più rapidamente nei prezzi. Ovviamente, non basta osservare una singola misura per trarre conclusioni definitive: occorre un'analisi approfondita, controllando per fattori esterni e per periodi di mercato differenti. Tuttavia, la direzione è chiara: un calo nella persistenza dei rendimenti è coerente con l'idea di un mercato più efficiente.

Un approccio di questo tipo conferma che la riduzione della prevedibilità nei rendimenti limita le opportunità di profitto basate sull'analisi storica, favorendo un mercato più reattivo alle informazioni disponibili. Una simile situazione riduce la possibilità per gli attori di sfruttare inefficienze transitorie e contribuisce a creare un contesto in cui le fluttuazioni di mercato derivano principalmente da dati appena emersi, piuttosto che da schemi consolidati. In tal modo, si ottiene un segnale empirico a favore del processo di maturazione del mercato, che si allontana da comportamenti prevedibili per avvicinarsi a uno scenario di maggiore efficienza informativa.

Questa considerazione teorica servirà a ispirare l'analisi empirica successiva, in cui andremo ad applicare un approccio quantitativo a un caso di studio concreto, quello di Ethereum. L'idea sarà proprio quella di confrontare il grado di persistenza dei rendimenti prima e dopo il passaggio a PoS, verificando se tale cambiamento sia coerente con un aumento dell'efficienza di mercato.

2.3 Perché il Proof of Stake può favorire l'efficienza di mercato

Le riflessioni precedenti hanno evidenziato come la combinazione di un quadro normativo più chiaro (quale MiCA) e la ricerca di soluzioni energeticamente sostenibili

¹³¹Qian, B., & Rasheed, K. (2004). *Hurst exponent and financial market predictability*. In IASTED conference on Financial Engineering and Applications. Cambridge, MA: Proceedings of the IASTED International Conference, pp. 203-209.

possa migliorare le condizioni per una maggiore efficienza informativa. In questo scenario, l'adozione del Proof of Stake non è solo una risposta tecnica alla domanda di sostenibilità: essa introduce anche modifiche sostanziali nella struttura competitiva e operativa della rete, con ripercussioni sui meccanismi di formazione del prezzo.

Diversamente dal PoW, che richiede un'elevata potenza di calcolo e quindi un'ingente spesa energetica, il PoS riduce le barriere d'ingresso e i costi fissi, consentendo a un più ampio insieme di attori di diventare validatori¹³². Questa maggiore apertura incide direttamente sull'informazione disponibile nel mercato: con più validatori attivi e diversificati, diminuisce il rischio di concentrazione del potere decisionale, si moltiplicano i canali informativi e si favorisce una più rapida integrazione delle notizie rilevanti nei prezzi.

In sostanza, PoS può fungere da catalizzatore per una concorrenza informativa più intensa. Ciò significa che eventuali inefficienze o ritardi nell'assorbimento delle informazioni da parte del mercato trovano meno spazio, poiché operatori con differenti orizzonti, competenze e strategie avranno l'incentivo a sfruttare immediatamente ogni nuovo dato¹³³. Un ambiente così strutturato tende progressivamente ad assomigliare a un modello in cui i prezzi riflettono prontamente il flusso informativo, avvicinandosi all'ideale dell'efficienza semi-forte delineato dalla teoria dell'EMH.

Il ruolo di PoS, dunque, va oltre il mero risparmio energetico: stabilisce un contesto in cui le reti blockchain hanno caratteristiche più vicine a quelle di mercati maturi e trasparenti, nei quali la rapida incorporazione delle informazioni diventa la norma, riducendo la persistenza di rendimenti prevedibili e le opportunità di arbitraggio basate su dati noti.

¹³²Zhang, R., & Chan, W. K. V. (2020). *Evaluation of energy consumption in block-chains with proof of work and proof of stake*. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1584, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.

¹³³Gaži, P., Kiayias, A., & Zindros, D. (2019). *Proof-of-stake sidechains*. In *2019 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*, pp. 139-156.

2.3.1 Riduzione di costi e barriere all'ingresso

Per comprendere più concretamente perché PoS possa favorire l'efficienza di mercato, è utile mettere a confronto le logiche operative di PoW e PoS in termini di costi e barriere d'ingresso¹³⁴. Nel modello Proof of Work, i miner competono risolvendo problemi computazionali via hardware specializzato e ad alto consumo energetico. Ciò crea una selezione basata principalmente sulla disponibilità di risorse finanziarie ed energetiche: la partecipazione è limitata, i costi iniziali sono elevati e chi non dispone di capitali sufficienti per investire in macchinari, infrastrutture e fonti energetiche a basso costo resta escluso. Il risultato è spesso la concentrazione del potere di mining in pochi attori, capaci di gestire grandi impianti e di influenzare, in parte, la sicurezza e la velocità di aggiornamento del registro.

Il Proof of Stake ribalta questa logica: la validazione dei blocchi non dipende dalla potenza computazionale, bensì dalla quantità di criptovaluta messa in stake. Sebbene richieda comunque un impegno di capitale, PoS è generalmente più accessibile. Non occorrono impianti di mining né spese energetiche esorbitanti: chiunque posseda i token necessari e li collochi a garanzia può diventare validatore. Ciò consente una partecipazione più ampia e geograficamente distribuita, riducendo il rischio che l'informazione rimanga confinata in poche mani. Più validatori, provenienti da contesti e con strategie diverse, aumentano la concorrenza informativa: ogni volta che emerge una nuova notizia, c'è un maggior numero di operatori pronti a reagire, integrandola nei prezzi¹³⁵.

Come si può vedere dalla Figura 5, la distribuzione dei nodi Ethereum (una delle principali reti passate al PoS) è diffusa su scala mondiale, con nodi localizzati in numerose regioni. Questa mappa evidenzia come l'adozione del PoS consenta di superare la tendenza alla concentrazione tipica del PoW, poiché non esiste più la necessità di centralizzarsi vicino a fonti energetiche convenienti. Il risultato è un ecosistema più

¹³⁴Brown-Cohen, J., Narayanan, A., Psomas, A., & Weinberg, S. M. (2019, June). *Formal barriers to longest-chain proof-of-stake protocols*. In Proceedings of the 2019 ACM Conference on Economics and Computation, pp. 459-473.

¹³⁵O'Dair, M., & O'Dair, M. (2019). *Barriers to Adoption*. Distributed Creativity: How Blockchain Technology will Transform the Creative Economy, pp. 59-79.

inclusivo e variegato, in cui i validatori operano da diverse aree geografiche, riducendo così la possibilità che l'informazione si concentri in poche mani.

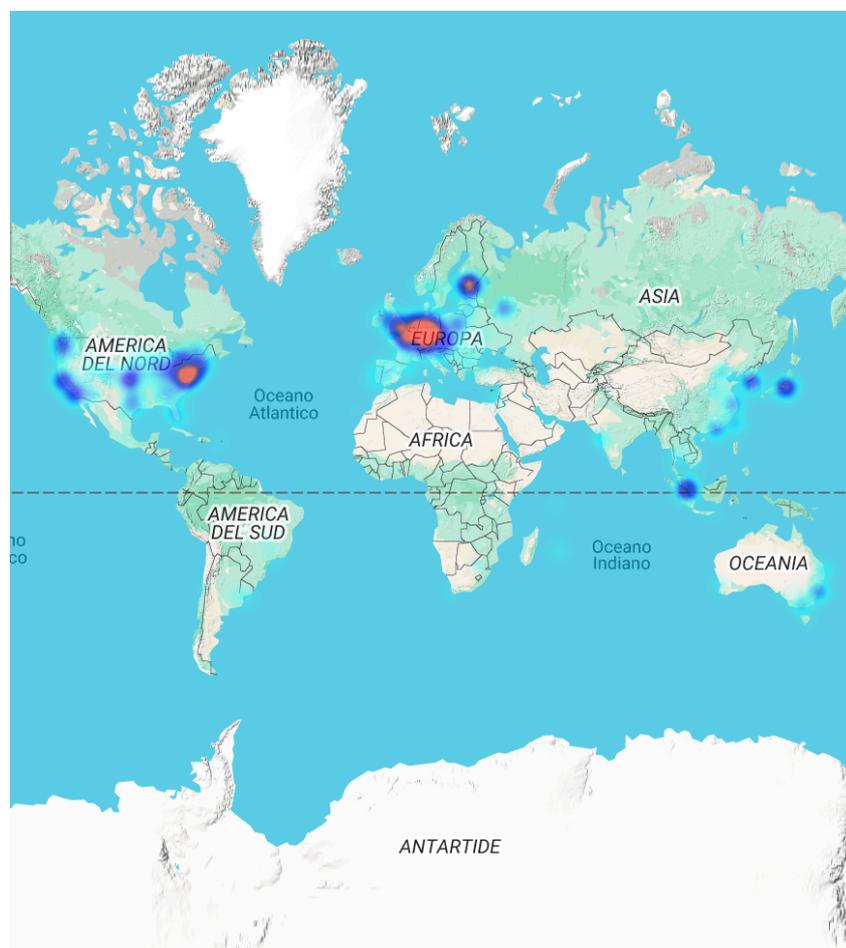


Figura 5: Mappa della distribuzione globale dei nodi di Ethereum¹³⁶

L'abbattimento delle barriere d'ingresso implica dunque una riduzione dell'asimmetria informativa strutturale¹³⁷, perché i flussi di dati rilevanti vengono tradotti in decisioni di trading con maggiore tempestività. Mentre nel PoW la concentrazione di potere di calcolo poteva rallentare l'effettiva integrazione dell'informazione, nel PoS la pluralità di

¹³⁶Ethernodes (2024). Dati sulla distribuzione globale dei nodi Ethereum. Disponibili su: <https://www.ethernodes.org/countries>.

¹³⁷Seamans, R. C. (2013). *Threat of entry, asymmetric information, and pricing*. Strategic Management Journal, 34(4), pp. 426-444.

validatori e la minore dipendenza da infrastrutture energivore creano una dinamica in cui l'informazione, una volta resa nota, trova più rapidamente un canale per riflettersi nei prezzi di mercato. Tale contesto è essenziale per rendere credibile l'ipotesi di un miglioramento effettivo dell'efficienza informativa complessiva.

2.3.2 Scalabilità aumentata e finalizzazione rapida

Uno dei vantaggi chiave del Proof of Stake, oltre alla riduzione dei costi energetici e delle barriere d'ingresso, è la maggiore scalabilità rispetto ai modelli basati su Proof of Work. La scalabilità, intesa come capacità di elaborare un numero significativo di transazioni per secondo (TPS) e di gestire un volume elevato di attività sulla rete, riveste un ruolo cruciale per la reattività dei mercati rispetto alle informazioni¹³⁸. In un ambiente finanziario, la rapidità con cui un mercato assimila le novità è un elemento essenziale dell'efficienza: se la rete blockchain può processare un maggior numero di operazioni in tempi ridotti, la formazione del prezzo, ossia l'assorbimento dell'informazione nei valori degli asset, diviene più rapida e coerente con le attese dell'Ipotesi di Mercato Efficiente. Con l'adozione del PoS, le reti spesso raggiungono un throughput (capacità di elaborazione delle transazioni) superiore rispetto ai sistemi basati su PoW, che risultano limitati dalla competizione energetica e dal costo computazionale richiesto per minare i blocchi. Un aumento del throughput implica che gli operatori, appena resa nota una notizia rilevante (ad esempio una nuova regolamentazione, un'innovazione tecnica, un accordo di partnership o la scoperta di una vulnerabilità) possano agire immediatamente, inoltrando ordini di acquisto o vendita che vengono rapidamente registrati sulla blockchain¹³⁹. Questo riduce il ritardo tra l'emergere dell'informazione e la sua riflessione nei prezzi, migliorando la tempestività della risposta del mercato.

Un altro aspetto centrale è la finalizzazione rapida delle transazioni e dei blocchi. Un network PoS ben strutturato è in grado di raggiungere il consenso sulla validità dei blocchi in tempi relativamente brevi, riducendo il rischio di fork indesiderati e di situazioni di

¹³⁸Hill, M. D. (1990). *What is scalability?*. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 18(4), pp. 18-21.

¹³⁹Gao, Y., Kawai, S., & Nobuhara, H. (2019). *Scalable blockchain protocol based on proof of stake and sharding*. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 23(5), pp. 856-863.

incertezza sulla legittimità delle transazioni incluse¹⁴⁰. Nel contesto dei mercati finanziari, la sicurezza di una finalizzazione rapida significa che gli operatori non devono attendere a lungo per avere certezza sulle proprie operazioni. Ciò è fondamentale per mantenere la fiducia degli investitori: in un mercato dove le transazioni vengono confermate e rese definitive in pochi secondi o minuti, gli agenti sono incoraggiati a reagire prontamente alle notizie, poiché sanno che i loro scambi non verranno sovrascritti o invalidati successivamente.

La riduzione della latenza informativa, cioè del tempo necessario affinché l'informazione diventi effettivamente operativa nel mercato, è un ingrediente cardine per l'efficienza. Più l'informazione fluisce rapidamente e viene integrata nei prezzi, minore sarà la possibilità di ottenere profitti anomali sfruttando ritardi o inefficienze nella diffusione dei dati¹⁴¹. Questo non significa, come già sottolineato, che scompaiano volatilità e incertezza: il mercato può restare volatile se la notizia è complessa, se gli investitori reagiscono in modo eterogeneo o se l'evento è intrinsecamente ambiguo. Tuttavia, questa volatilità riflette le reali divergenze di opinione e le autentiche incertezze degli operatori rispetto al futuro, non l'incapacità tecnica della rete di processare e integrare l'informazione.

2.3.3 Stabilità del network e minori distorsioni da fattori esogeni

Uno degli aspetti meno evidenti, ma altrettanto rilevanti, dell'adozione del Proof of Stake è la maggiore stabilità complessiva del network rispetto ai sistemi basati su Proof of Work. La stabilità, in questo caso, va intesa non solo in termini tecnici, come resilienza a guasti, attacchi o malfunzionamenti, ma anche in termini economici e informativi. Se il network è meno esposto a fattori esogeni che nulla hanno a che fare con l'informazione finanziaria rilevante per la valutazione degli asset, allora il segnale informativo che

¹⁴⁰Ren, L. (2014). *Proof of stake velocity: Building the social currency of the digital age*. Self-published white paper.

¹⁴¹Chordia, T., & Miao, B. (2020). *Market efficiency in real time: Evidence from low latency activity around earnings announcements*. *Journal of Accounting and Economics*.

giunge ai prezzi risulta più pulito e fedele, limitando le distorsioni che in passato potevano alimentare inefficienze di mercato¹⁴².

Nel modello PoW, la sicurezza della rete dipende in larga misura dalla potenza computazionale investita dai miner e, di conseguenza, dal costo dell'energia e dalla disponibilità di componenti hardware specializzate. Questi fattori, tutt'altro che stabili o prevedibili, introducono nella dinamica di mercato un "rumore" non informativo¹⁴³. Per esempio, un improvviso aumento del costo dell'energia può incidere sulla redditività del mining, spingendo alcuni miner a spegnere le macchine o a migrare verso altre criptovalute, con effetti sul tempo di estrazione dei blocchi, sulla sicurezza percepita della rete e, in ultima analisi, sul sentiment degli investitori. Allo stesso modo, problemi nella catena di fornitura dell'hardware o restrizioni legate a politiche ambientali e fiscali possono alterare la disponibilità di potenza di calcolo, causando fluttuazioni che non riflettono alcun cambiamento nel valore intrinseco dell'asset, ma solo condizioni esterne che influenzano l'infrastruttura del network.

Con PoS, la dipendenza da queste variabili viene fortemente ridimensionata. La sicurezza della rete non è più una funzione diretta dell'energia consumata, bensì della quantità di token messa in stake dai validatori. Questo sposta l'attenzione dalla dimensione fisica e industriale del mining verso una dimensione finanziaria: i validatori, detenendo una quota di token messa a garanzia, sono incentivati a comportarsi correttamente per non subire penalità. Il costo marginale per mantenere il network sicuro è nettamente inferiore e non dipende più da approvvigionamenti energetici o dalla produzione di hardware, bensì dalla stabilità degli incentivi economici interni al sistema¹⁴⁴.

Questa maggiore stabilità infrastrutturale riduce significativamente le distorsioni nel rapporto tra informazioni e prezzi dovute a shock esterni non correlati ai fondamentali dei crypto-asset. Se l'aumento del costo dell'energia in un determinato paese non influisce più sulla sicurezza della rete, gli investitori non devono temere una riduzione improvvisa

¹⁴²Vashchuk, O., & Shuwar, R. (2018). *Pros and cons of consensus algorithm proof of stake*. Difference in the network safety in proof of work and proof of stake. *Electronics and Information Technologies*, 9(9), pp. 106-112.

¹⁴³Sklavos, N. (2010). *On the hardware implementation cost of crypto-processors architectures*. *Information Security Journal: A Global Perspective*, 19(2), pp. 53-60.

¹⁴⁴Larimer, D. (2013). *Transactions as proof-of-stake*.

della velocità di produzione dei blocchi o una temporanea vulnerabilità agli attacchi del 51% (tentativi di compromissione della rete in cui un singolo soggetto o gruppo controlla più del 50% della potenza di calcolo, potendo manipolare transazioni, riorganizzare la blockchain e impedire la conferma di nuove operazioni)¹⁴⁵. Le dinamiche interne del network risultano più prevedibili e stabili, favorendo un contesto in cui i partecipanti possono concentrarsi sull'analisi dei fattori informativi propriamente finanziari: nuovi sviluppi tecnologici, annunci regolamentari, partnership industriali, introduzione di funzionalità avanzate e così via.

Inoltre, l'eliminazione del legame diretto tra sicurezza e potenza computazionale può attenuare l'influsso di speculazioni legate a eventi non correlati all'economia del progetto, come la volatilità del prezzo dell'elettricità, le difficoltà nella fornitura di hardware o i blocchi politici sul mining in determinate giurisdizioni. Con PoS, il focus torna sul valore del crypto-asset stesso, sulla fiducia nella governance interna, sull'equilibrio tra domanda e offerta di token e sulla capacità del network di evolvere in risposta alle esigenze degli utenti. Questo allineamento tra fattori tecnici ed economici riduce il "rumore" non informativo, rendendo i prezzi più riflessivi dei fondamentali e meno soggetti a distorsioni di breve termine.

La stabilità del network ha anche implicazioni sul comportamento degli operatori istituzionali. Questi ultimi, come visto in precedenza, possono decidere di entrare nel mercato con capitali significativi solo se percepiscono che i meccanismi di funzionamento del network non siano soggetti a fluttuazioni erratiche dovute a fattori estranei alla logica finanziaria. Un network PoS, essendo meno vulnerabile a shock energetici o tecnologici, offre un contesto più rassicurante e coerente con i paradigmi di investimento tradizionali¹⁴⁶. Più investitori istituzionali portano maggiore liquidità e più arbitraggi, che a loro volta riducono la persistenza di pattern di prezzo sfruttabili a fini speculativi.

¹⁴⁵Ye, C., Li, G., Cai, H., Gu, Y., & Fukuda, A. (2018). *Analysis of security in blockchain: Case study in 51%-attack detecting*. In 2018 5th International conference on dependable systems and their applications (DSA), pp. 15-24.

¹⁴⁶Phelan, G., Ruchti, T., & Hempel, S. (2024). *Does Lock-up Lead to Stability? Implications for Runs in the Proof-of-Stake Protocol*.

Risulta condivisibile la prospettiva secondo cui tale scenario, limitando l'influenza di fattori estranei ai fondamentali, possa rendere il mercato più propenso ad assimilare rapidamente l'informazione realmente rilevante, pur senza eliminare il bisogno di valutare il contesto macroeconomico e geopolitico in cui l'ecosistema cripto si colloca.

2.3.4 Incentivi al buon comportamento dei validatori

Un tratto distintivo del Proof of Stake è l'insieme di incentivi economici che lega direttamente il comportamento dei validatori alla salute della rete. Mentre nel Proof of Work i miner competono per ottenere ricompense tramite potenza computazionale, nel PoS i validatori mettono in gioco (in stake) una quantità di token come garanzia del proprio operato. Se agiscono in modo scorretto o tentano di manipolare la rete, possono subire penalizzazioni finanziarie, perdendo parte o tutto il capitale depositato¹⁴⁷. Questo meccanismo rende conveniente mantenere la rete sicura, stabile e affidabile, poiché ogni validatore ha un interesse diretto a non danneggiare il sistema di cui fa parte.

Dal punto di vista dell'efficienza di mercato, tale allineamento degli incentivi riduce comportamenti opportunistici e la diffusione di informazioni fuorvianti. Validatori corretti, interessati a proteggere il proprio stake e a guadagnare ricompense nel lungo periodo, saranno meno inclini a favorire instabilità o a sfruttare asimmetrie informative a danno del sistema. Ne deriva una circolazione di informazioni più trasparente e coerente, utile a rendere il processo di formazione dei prezzi più rapido e aderente alle novità rilevanti. Questo facilita l'integrazione immediata di eventi e notizie nei prezzi, limitando la persistenza di trend prevedibili e riducendo le opportunità di profitto basate su informazioni superate o incomplete.

Una dinamica di questo genere appare pienamente in linea con il concetto secondo cui una struttura di incentivi adeguata migliora sensibilmente la qualità informativa del mercato, poiché lega il corretto operato dei validatori alla costante riduzione di interferenze superflue. In tale scenario, la capacità dei prezzi di riflettere con maggiore prontezza e precisione le novità risulta ulteriormente potenziata, sostenendo così un

¹⁴⁷Lundin, F., & Rahm, F. (2018). *Evaluating risk and reward for validators in a cryptocurrency Proof-of-Stake network*.

mercato più reattivo, coerente con i segnali disponibili ed efficiente nel recepire tempestivamente gli stimoli provenienti dall'ambiente esterno.

2.4 Interazione tra efficienza e Proof of Stake: scenari futuri

L'analisi fin qui sviluppata ha messo in luce un meccanismo potenzialmente virtuoso: la spinta verso la sostenibilità, promossa da MiCA attraverso la maggiore disclosure ambientale, e l'adozione del Proof of Stake, con le sue implicazioni in termini di riduzione del consumo energetico e di incentivo alla partecipazione informata, potrebbero creare le condizioni per mercati crypto più efficienti¹⁴⁸. Queste condizioni non sono garantite con certezza, ma delineano un percorso plausibile di evoluzione del settore. Come ogni trasformazione profonda, richiederà tempo e impegno da parte dei diversi attori del mercato, inclusi sviluppatori, investitori, istituzioni finanziarie e regolatori.

Se l'esperienza di Ethereum, che ha recentemente abbandonato il Proof of Work per adottare il Proof of Stake con la transizione nota come "The Merge", costituirà un precedente rilevante, potremmo assistere nei prossimi anni a una diffusione più ampia di blockchain che scelgono il PoS, non solo per motivi ambientali, ma anche per la potenziale capacità di rendere più dinamico e reattivo il processo di formazione dei prezzi¹⁴⁹. Questi cambiamenti, a loro volta, potrebbero attirare nuovi capitali istituzionali, contribuire a consolidare la fiducia degli utenti retail e, in ultima istanza, favorire la maturazione dell'intero ecosistema. In questo scenario, MiCA non verrebbe ricordato soltanto come una normativa volta a ridurre i rischi per gli investitori, ma anche come uno stimolo a riconsiderare le basi stesse del funzionamento dei mercati crypto, orientandoli verso standard di qualità informativa e di governance più elevati.

Certo, non tutte le piattaforme e i crypto-asset seguiranno questa traiettoria. Alcune potrebbero scegliere di ignorare o minimizzare l'importanza delle spinte normative e ambientali, continuando a operare su meccanismi ad alto consumo energetico e restando legate a un modello più opaco e volatile. Altre, invece, potrebbero trovare nelle nuove

¹⁴⁸Shah, A. (2022). *Proposal to Ban Proof-of-Work Mining*.

¹⁴⁹De Vries, A. (2023). Cryptocurrencies on the road to sustainability: Ethereum paving the way for Bitcoin. *Patterns*, 4(1).

regole e nelle innovazioni come il PoS un fattore di competitività, sfruttandolo per accrescere la propria reputazione, attrarre investimenti e migliorare la resilienza di lungo periodo.

Il risultato finale dipenderà dalla capacità dell'ecosistema di apprendere dalla storia recente, dalle sperimentazioni tecniche già effettuate e dai segnali offerti dal contesto normativo. Se l'intero comparto saprà cogliere l'opportunità di ridefinire i propri equilibri, allora la sinergia tra sostenibilità e PoS, con MiCA come catalizzatore, potrà aprire la strada a mercati più ordinati, informati e capaci di incorporare rapidamente le novità rilevanti.

2.4.1 Ethereum come apripista

L'esperienza di Ethereum, passata dal PoW al PoS con la transizione nota come “The Merge”, rappresenta un caso emblematico per comprendere come un cambiamento tecnologico possa avere ripercussioni su molteplici aspetti del mercato. In seguito, analizzeremo i dati concreti per valutare eventuali segnali di maggiore efficienza successiva all'adozione del PoS, ma è già possibile ipotizzare che tale evoluzione fungerà da esempio per altre blockchain.

Se Ethereum, una delle principali reti, può mostrare che ridurre il consumo energetico e migliorare l'assimilazione dell'informazione nei prezzi non è soltanto un progetto teorico, ma una strada percorribile, questo precedente offrirà uno stimolo concreto ad altre piattaforme.

Come evidenziato dal confronto tra la Figura 6 e la Figura 7, la transizione di Ethereum a PoS ha determinato una drastica riduzione del consumo energetico, dimostrando in modo tangibile come l'adozione di meccanismi di consenso più sostenibili possa mitigare una delle principali criticità del settore cripto. Tale miglioramento non riguarda solo la reputazione e la conformità agli standard ESG, ma crea anche i presupposti per una maggiore chiarezza informativa. Se i progetti energivori appaiono meno attraenti alla luce dei requisiti di disclosure ambientale previsti da MiCA, la prospettiva di una partecipazione istituzionale più ampia e di una più rapida incorporazione delle informazioni rilevanti nei prezzi diventa più concreta, favorendo un graduale avvicinamento ai criteri di efficienza di mercato.

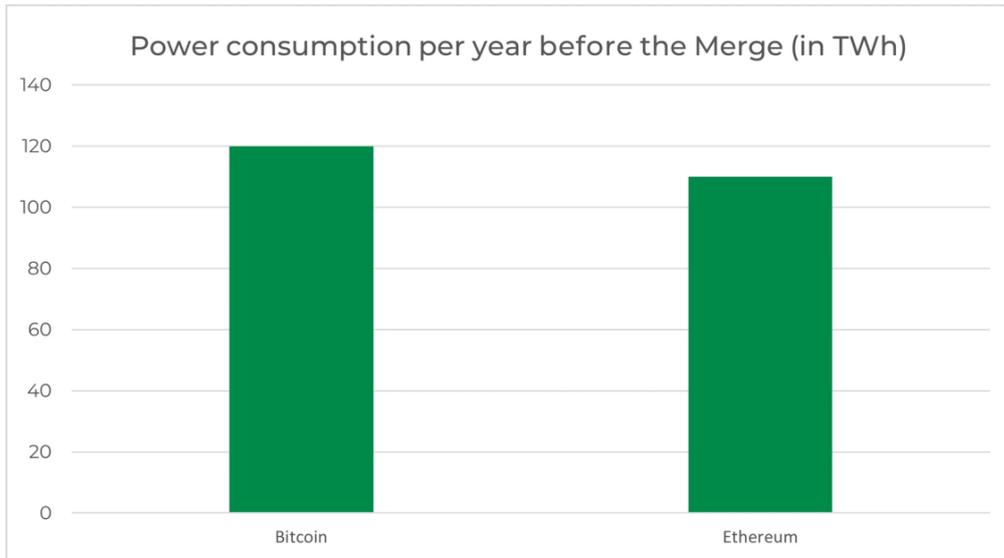


Figura 6: Consumo energetico annuo prima del Merge (in TWh)¹⁵⁰

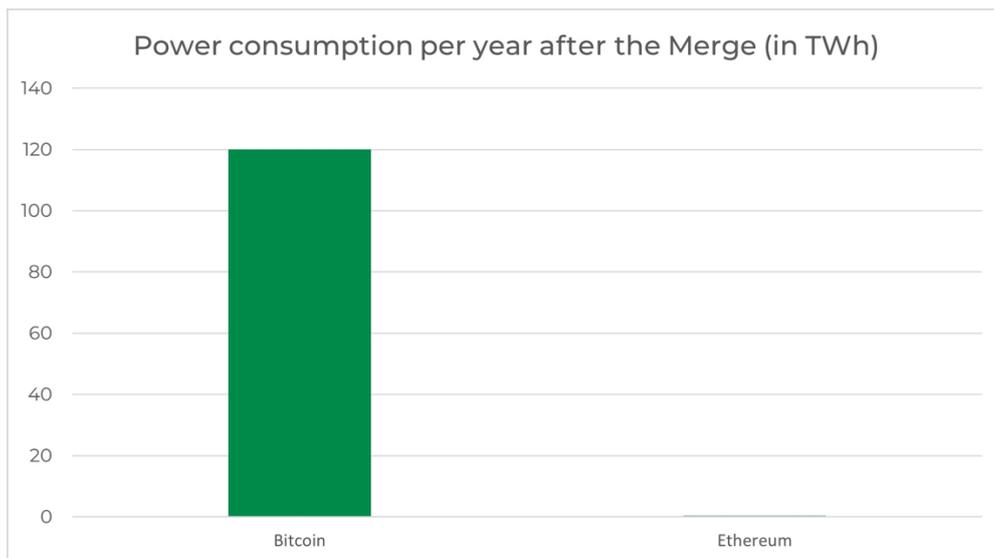


Figura 7: Consumo energetico annuo dopo il Merge (in TWh)¹⁵¹

¹⁵⁰GreenCryptoResearch (2023). Dati sul consumo energetico annuo di Ethereum prima del Merge (in TWh). Disponibili su: <https://www.greencryptoresearch.com>.

¹⁵¹GreenCryptoResearch (2023). Dati sul consumo energetico annuo di Ethereum dopo il Merge (in TWh). Disponibili su: <https://www.greencryptoresearch.com>.

MiCA, richiedendo maggiore trasparenza sull’impatto ambientale e favorendo di fatto i meccanismi di consenso meno energivori, può rafforzare questo segnale¹⁵². Le reti ancora basate su PoW, constatando l’interesse degli investitori istituzionali per progetti più sostenibili e la crescente sensibilità del pubblico verso il tema ambientale, potrebbero decidere di seguire le orme di Ethereum, adottando gradualmente il PoS o altri protocolli alternativi più “green”. L’emulazione non riguarderà solo l’aspetto ambientale, ma anche la gestione della governance, i meccanismi di incentivazione interna e la promozione di una concorrenza informativa tra validatori ed operatori.

Ciò non significa che il passaggio a PoS diventerà un obbligo o uno standard unico. La diversità è sempre stata una caratteristica chiave del panorama cripto, e continuerà a esserlo. Tuttavia, se MiCA contribuisce a mettere in evidenza i costi reputazionali, regolatori e finanziari legati a un modello ad alto consumo energetico, mentre Ethereum fornisce una dimostrazione pratica della fattibilità del cambiamento, è naturale attendersi che almeno una parte delle reti possa orientarsi verso soluzioni più efficienti e sostenibili¹⁵³. Questo trend, se confermato, porterebbe a un ecosistema dove la pressione a migliorare è costante, incrementando la qualità complessiva del mercato e il suo livello di efficienza nell’integrare l’informazione rilevante.

2.4.2 Altri progetti in transizione verso PoS: un panorama in evoluzione

L’esperienza di Ethereum, passata con successo dal Proof of Work al Proof of Stake e divenuta un caso emblematico di come la sostenibilità possa conciliarsi con i principi della decentralizzazione, non rappresenta un evento isolato nel panorama cripto. Diversi altri progetti hanno già intrapreso, o stanno valutando seriamente, un percorso analogo, attratti dalle prospettive di minore consumo energetico, maggiore scalabilità e, potenzialmente, di una più efficiente incorporazione dell’informazione nei prezzi. L’emulazione del caso Ethereum e le spinte normative esercitate da MiCA non agiscono

¹⁵²Khan, F., & Mer, A. (2024). *Regulations and directives that are on the European Union’s table and how this will affect the financial services industry and related industries*. In *Greening Our Economy for a Sustainable Future*, pp. 127-136.

¹⁵³Woitschig, P., Uddin, G. S., Xie, T., & Härdle, W. K. (2023). *The energy consumption of the ethereum-ecosystem*.

in un vuoto: si innestano in un ecosistema dinamico e competitivo, dove le piattaforme cercano costantemente soluzioni per distinguersi e restare attraenti per investitori e utenti. Tra i progetti più rilevanti che hanno mostrato interesse verso il PoS si possono citare Cardano, Polkadot, Tezos e Algorand, ognuno con una propria visione, architettura e modello di governance. Non si tratta unicamente di adottare un meccanismo di consenso meno energivoro, ma anche di sperimentare nuove forme di partecipazione, delega e validazione che possano rendere il network più inclusivo e reattivo. Questo fenomeno, se considerato nel suo insieme, sta progressivamente disegnando un nuovo standard di riferimento nel settore, dove PoS diviene non solo una scelta tecnica, ma un asset strategico che può facilitare l'ingresso di capitali istituzionali, l'attenuazione di rumor e manipolazioni e, infine, la propensione del mercato a riflettere più tempestivamente ogni informazione rilevante.

Cardano è un esempio notevole in questo senso. Nato sin dall'inizio con un protocollo basato su PoS (Ouroboros)¹⁵⁴, si presenta come uno dei pionieri nell'adozione di un consenso sostenibile ed efficiente dal punto di vista energetico. Cardano ha cercato di bilanciare ricerca accademica rigorosa, sviluppo graduale e sicurezza formale delle implementazioni, con l'obiettivo di offrire un ambiente affidabile per applicazioni decentralizzate (dApp) e smart contract. Sul piano dell'efficienza informativa, sebbene gli studi siano ancora in corso, l'architettura PoS di Cardano potrebbe contribuire ad accelerare la risposta del mercato ai cambiamenti nel panorama regolatorio, alle novità tecnologiche e agli annunci di partnership. In un contesto in cui l'UE, tramite MiCA, spinge per una maggiore disclosure ambientale, la già consolidata reputazione di Cardano come rete "green" potrebbe favorire un ulteriore afflusso di operatori informati e attenti ai criteri ESG, alimentando così la competizione informativa e riducendo la persistenza di pattern prevedibili nei prezzi¹⁵⁵.

Polkadot, altra rete di nuova generazione, si distingue per il suo approccio modulare e la capacità di connettere diverse blockchain (parachain) in un unico ecosistema interoperabile. Sin dal suo lancio, Polkadot ha adottato un meccanismo di consenso PoS

¹⁵⁴Barbian, G., & Mellentin, F. (2021). *The cardano proof-of-stake protocol "ouroboros"*.

¹⁵⁵Ovezik, C., & Kiayias, A. (2022). *Decentralization Analysis of Pooling Behavior in Cardano Proof of Stake*. In Proceedings of the Third ACM International Conference on AI in Finance, pp. 18-26.

denominato Nominated Proof of Stake (NPoS), in cui i nominatori scelgono i validatori affidabili a cui delegare i propri token. Questo modello incentiva una partecipazione più ampia e democratica, riduce la concentrazione del potere di validazione e stimola la concorrenza informativa tra operatori con competenze e fonti informative differenti. Inoltre, Polkadot, grazie alla sua capacità di integrare rapidamente aggiornamenti e nuove parachain, offre un contesto flessibile e adattabile, dove le informazioni circolano con grande rapidità. Man mano che la regolamentazione europea rende più chiaro e trasparente il quadro degli obblighi ambientali, Polkadot potrebbe trarre vantaggio da una posizione già fortemente orientata verso la sostenibilità, incrementando la sua attrattività presso investitori istituzionali e rendendo ancora più rapida la traduzione delle notizie rilevanti in pressioni di acquisto o di vendita¹⁵⁶.

Un altro progetto degno di nota è *Tezos*, che fin dall'inizio ha fatto del PoS uno dei suoi pilastri fondamentali. Tezos ha introdotto il concetto di “baking”, in cui i possessori di token possono diventare baker (equivalenti a validatori), o delegare i propri token ad altri baker, senza cedere la custodia delle risorse. Questo approccio combinato di PoS e delega rafforza la diversità informativa, poiché i validatori devono guadagnare la fiducia di coloro che delegano i token, dimostrando affidabilità e reattività alle informazioni di mercato. La governance on-chain di Tezos, inoltre, consente aggiornamenti del protocollo senza hard fork, favorendo l'evoluzione continua della rete verso standard di sostenibilità, sicurezza e efficienza informativa più elevati. In un mercato in cui MiCA evidenzia l'importanza di trasparenza e responsabilità, Tezos può sfruttare la flessibilità del suo design per recepire le best practice suggerite dalle autorità europee e dagli investitori attenti all'ESG¹⁵⁷.

Algorand, infine, propone un modello PoS peculiare (Pure Proof of Stake) con finalizzazione rapida dei blocchi e bassissimo consumo energetico. Algorand mira a un'elevata scalabilità e a una latenza molto ridotta, condizioni ideali per un ambiente in cui i prezzi reagiscono tempestivamente alle informazioni disponibili. Con un throughput

¹⁵⁶Boehmer, N., Brill, M., Cevallos, A., Gehrlein, J., Sánchez-Fernández, L., & Schmidt-Kraepelin, U. (2024, March). *Approval-based committee voting in practice: a case study of (over-) representation in the Polkadot blockchain*. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 38(9), 9519-9527.

¹⁵⁷Neuder, M., Moroz, D. J., Rao, R., & Parkes, D. C. (2021). *Selfish behavior in the tezos proof-of-stake protocol*.

elevato e transazioni confermate in pochi secondi, l'integrazione delle novità nei prezzi potrebbe essere quasi immediata, avvicinando ulteriormente la rete a un ideale di mercato informativamente efficiente. Se Algorand riuscisse ad attrarre una base diversificata di investitori professionali, grazie anche alla conformità con gli standard europei emergenti, potrebbe rappresentare una testimonianza vivente di come PoS e i requisiti di sostenibilità imposti da regolatori come l'UE si traducano in una migliore capacità del mercato di riflettere le informazioni¹⁵⁸.

Il confronto tra questi progetti evidenzia un trend comune: la volontà di andare oltre la semplice riduzione del consumo energetico, utilizzando PoS come leva per ridefinire l'intera struttura competitiva e informativa del network. L'adozione di PoS non è più percepita soltanto come una soluzione "green", ma come uno strumento per creare mercati crypto più maturi, in grado di incorporare rapidamente le notizie e di attenuare le distorsioni non informative. La pressione normativa di MiCA non costringe tali progetti a fare scelte contro la loro volontà, ma fornisce un incentivo a rafforzare e comunicare le proprie caratteristiche positive, mostrando come la sostenibilità e la trasparenza siano ormai fattori determinanti per attrarre capitali istituzionali e migliorare l'esperienza degli utenti retail.

Certo, restano sfide tecniche e strategiche da affrontare: nessuna rete è esente da vulnerabilità potenziali, squilibri nella distribuzione dei token o incertezze sugli sviluppi futuri della regolamentazione. La transizione verso PoS non è una tendenza universale. Tuttavia, l'emergere di un vero e proprio "ecosistema PoS", in cui diversi progetti condividono l'obiettivo di ridurre consumi energetici, incentivare una partecipazione diffusa e migliorare la qualità del flusso informativo, suggerisce che la direzione intrapresa dal mercato va ben oltre il singolo caso di Ethereum. Se il successo di quest'ultimo fungerà da precedente rassicurante, gli altri progetti avranno maggiori motivazioni per adeguarsi, creando un effetto a cascata che può riallineare i mercati verso modelli più efficienti e, di conseguenza, meno prevedibili e manipolabili.

L'analisi di questi progetti in transizione verso PoS conferma che la pressione normativa europea e l'esempio di Ethereum non restano fenomeni isolati, ma agiscono in un contesto

¹⁵⁸Dimitri, N. (2022). *Proof-of-stake in algorand*. Distributed Ledger Technologies: Research and Practice, 1(2), pp. 1-17.

in evoluzione, dove le reti cercano di posizionarsi in modo strategico per intercettare la domanda di mercati più trasparenti e sostenibili. Questa dinamica, se consolidata, potrebbe portare a un panorama cripto sostanzialmente diverso da quello dei primi anni, più maturo, meno soggetto a pattern prevedibili nei prezzi e, per l'appunto, più vicino a quell'ideale di efficienza di mercato che la teoria ha delineato ma che pochi segmenti della finanza decentralizzata sono riusciti finora anche solo ad avvicinare.

2.4.3 Prospettiva strategica e normativa

Gli esempi presentati delineano un quadro in cui l'interesse verso il Proof of Stake non si configura più come un semplice adeguamento tecnico pensato per contenere il dispendio energetico. Al contrario, l'adozione di PoS, nelle circostanze illustrate, assume le sembianze di una strategia articolata e lungimirante, attraverso cui le reti cercano di consolidare la propria presenza competitiva, migliorare la percezione della propria reputazione presso gli operatori più esigenti e attirare una categoria di investitori qualificati, orientati verso criteri ESG e modalità operative pienamente trasparenti. Le piattaforme citate hanno saputo cogliere l'opportunità offerta da un meccanismo di consenso meno energivoro e più inclusivo per limitare le asimmetrie informative, rendere più fluidi e veloci i flussi di dati utili e, in definitiva, facilitare la tempestiva assimilazione delle novità nel processo di formazione dei prezzi. Questo approccio, riducendo gli spazi per speculazioni fondate su lacune informative, prefigura un ambiente di mercato nel quale le decisioni degli investitori possono poggiare su elementi più solidi e affidabili.

Quanto ai risultati effettivamente conseguiti, non è ancora possibile affermare con sicurezza se i progetti abbiano pienamente centrato gli obiettivi auspicati. Alcuni segnali, tuttavia, indicano che la transizione verso PoS ha quantomeno posto le fondamenta per un contesto di mercato più ordinato, reattivo e coerente con le esigenze dei partecipanti più qualificati. In una simile cornice, l'informazione di qualità non fatica a circolare rapidamente, la concorrenza informativa si intensifica e gli attori istituzionali possono trovare condizioni più aderenti ai propri standard di affidabilità, responsabilità e stabilità di lungo termine. Sebbene la piena efficienza resti un traguardo ambizioso e non privo di ostacoli, la scelta di PoS appare coerente con l'intento di attenuare quei fattori che, in passato, hanno alimentato la volatilità non informativa, favorito l'emergere di pattern prevedibili e rallentato l'integrazione delle novità nei prezzi. Pur non offrendo garanzie

assolute, questo orientamento strategico lascia intravedere la possibilità di un miglioramento progressivo, con il graduale recepimento delle nuove direttive operative, l'innalzamento degli standard informativi e il consolidamento di pratiche più responsabili nella gestione delle reti.

Sotto il profilo normativo, l'analisi di queste dinamiche suggerisce che l'adozione del PoS rappresenti anche una risposta particolarmente accorta alle pressioni esercitate da un ambiente sempre più severo in termini di sostenibilità, trasparenza e accountability. Le crescenti richieste di disclosure, unite alla rilevanza assunta dai parametri ESG nel panorama degli investimenti internazionali, creano un clima in cui le reti non conformi rischiano di subire tensioni reputazionali, incontrare difficoltà nell'accedere a capitali di qualità e misurarsi con interventi regolamentari più restrittivi in un futuro non così remoto. La strategia di puntare su PoS offre dunque un duplice vantaggio: da una parte, consente di anticipare e soddisfare le attese di un mercato esigente ed evoluto; dall'altra, predispone le reti a dialogare con un pubblico di investitori e operatori professionali che pretendono garanzie su criteri ambientali, processi di governance chiari e informazioni verificabili. Alla luce di ciò, l'adozione di PoS, nei casi analizzati, non può essere interpretata come un mero aggiustamento tecnico: appare piuttosto come un'evoluzione intenzionale del modello operativo, finalizzata a integrare le nuove sensibilità normative e reputazionali nel tessuto quotidiano del mercato. Questo approccio, incentivando condizioni più favorevoli alla rapida e accurata riflessione delle informazioni nei prezzi e alla riduzione delle inefficienze di sistema, amplia le prospettive di una futura maturazione del comparto, orientandolo verso uno scenario in cui l'efficienza informativa diventa progressivamente più tangibile e stabile.

2.4.4 Possibili limiti teorici

Nonostante i benefici potenziali delineati, è opportuno adottare un approccio realistico nel valutare l'impatto di MiCA e del passaggio a PoS sull'efficienza di mercato del comparto crypto. Non tutte le criptovalute e le piattaforme, infatti, reagiranno allo stesso modo alle spinte normative e alle innovazioni tecnologiche. Da un lato, alcuni progetti potrebbero continuare a puntare su meccanismi di consenso energivori, accettando i costi reputazionali e regolamentari connessi, magari perché il loro modello di business o la loro comunità di riferimento li considera secondari rispetto ad altre priorità, come la massima

sicurezza o una determinata immutabilità del network. Dall'altro, non è detto che la trasparenza ambientale o la diffusione di PoS bastino, da sole, a eliminare ogni inefficienza¹⁵⁹. Ad esempio, l'assenza di fondamentali chiari in molte criptovalute rimane un problema strutturale: senza flussi di cassa o metriche oggettive di valutazione, anche un mercato più informato e attento alla sostenibilità può soffrire di narrazioni speculative e mode passeggere.

Inoltre, resta da vedere come le normative europee si integreranno con quelle di altre giurisdizioni. Se l'UE spinge verso la trasparenza ambientale e l'adozione di modelli energeticamente più sostenibili, ma altre importanti piazze finanziarie mantengono un approccio più permissivo o meno coerente, si potrebbe creare un "arbitraggio normativo", in cui i progetti meno inclini al cambiamento scelgono di operare in contesti con minori vincoli. Una simile divergenza, anziché aumentare l'efficienza a livello globale, potrebbe limitare l'impatto positivo di MiCA sul lungo periodo e rallentare la convergenza verso standard di mercato più elevati¹⁶⁰.

Esiste anche la questione della tempistica: la maturazione di un mercato non avviene da un giorno all'altro. Sebbene MiCA e PoS offrano premesse favorevoli, la transizione verso un mercato più efficiente richiederà tempo, sperimentazioni, aggiustamenti normativi e forse ulteriori interventi legislativi e tecnologici. La storia dei mercati finanziari tradizionali mostra che l'efficienza è un obiettivo dinamico, mai realmente raggiunto in modo definitivo, ma piuttosto un orizzonte verso cui tendere. Lo stesso discorso vale per i mercati crypto¹⁶¹.

Nonostante queste limitazioni, la tendenza resta chiara: la combinazione di una maggiore responsabilità ambientale, legata ai requisiti di MiCA, e l'emergere di meccanismi di consenso meno dispendiosi e più inclusivi, come PoS, può inaugurare una fase in cui

¹⁵⁹Nguyen, C. T., Hoang, D. T., Nguyen, D. N., Niyato, D., Nguyen, H. T., & Dutkiewicz, E. (2019). *Proof-of-stake consensus mechanisms for future blockchain networks: fundamentals, applications and opportunities*. IEEE access, 7, 85727-85745.

¹⁶⁰Jiménez-Serranía, V., Parra-Domínguez, J., De La Prieta, F., & Corchado, J. M. (2021). *Cryptocurrencies impact on financial markets: Some insights on its regulation and economic and accounting implications*. International Congress on Blockchain and Applications, pp. 292-299.

¹⁶¹Beaulieu, M. C. (1998). *Time to maturity in the basis of stock market indices: Evidence from the S&P 500 and the MMI*. Journal of Empirical Finance, 5(3), pp. 177-195.

l'efficienza di mercato migliora sensibilmente per i progetti che scelgono di adattarsi. In definitiva, non si tratta di una trasformazione istantanea o universale, ma di un cambio di paradigma che crea incentivi per un mercato più ordinato, più trasparente e, dunque, più incline a riflettere tempestivamente le informazioni disponibili nei prezzi.

Questo richiamo alla complessità del panorama internazionale appare giustificato, poiché le differenze tra approcci normativi e le incertezze sulla tempistica dei cambiamenti strutturali ostacolano una convergenza immediata verso l'efficienza di mercato. In tale contesto, la spinta alla sostenibilità e alla trasparenza offre un indirizzo evolutivo rilevante, ma non esaurisce da sola l'insieme dei fattori determinanti, confermando l'importanza di considerare una molteplicità di variabili per interpretare correttamente l'evoluzione del settore crypto.

2.5 Collegamenti per l'analisi quantitativa

L'intero percorso teorico affrontato finora si è mosso lungo una direttrice chiara: comprendere come l'incentivo alla sostenibilità introdotto da MiCA, combinato con l'adozione di meccanismi di consenso meno energivori come il Proof of Stake, possa incidere sulla struttura e sulla qualità informativa dei mercati crypto, contribuendo potenzialmente a ridurre i livelli di inefficienza. Tuttavia, le argomentazioni fin qui proposte restano sul piano teorico, delineando scenari, condizioni e tendenze, senza ancora una verifica empirica.

Nella fase successiva passeremo dall'elaborazione concettuale all'evidenza quantitativa. L'obiettivo sarà quello di applicare uno strumento analitico, per valutare se, concretamente, esistano segnali di un miglioramento dell'efficienza di mercato in seguito a eventi chiave come la transizione di Ethereum dal PoW al PoS. Tale cambiamento, come si è detto, può essere interpretato come un caso esemplare: Ethereum, una delle principali criptovalute per capitalizzazione e rilevanza tecnologica, ha infatti completato la migrazione a PoS in un periodo in cui l'attenzione verso la sostenibilità e la trasparenza regolamentare andava crescendo. L'idea è dunque di verificare se, confrontando i dati prima e dopo il passaggio a PoS, emerge una riduzione della persistenza dei rendimenti, indicativa di una maggiore efficienza.

Questa analisi empirica si legherà strettamente ai temi affrontati nel presente capitolo. Come discusso, l'EMH e il concetto di efficienza di mercato non sono solo costruzioni teoriche, ma offrono un quadro interpretativo per comprendere l'evoluzione dei prezzi: se le informazioni sono integrate più rapidamente, se gli arbitraggisti hanno meno spazio per profitti anomali, se il flusso informativo è più omogeneo e trasparente, allora i rendimenti tendono ad assumere un andamento più simile a un random walk. Utilizzando metriche specifiche, come l'Hurst exponent, sarà possibile quantificare il grado di persistenza dei rendimenti di Ethereum, valutando se, dopo il passaggio a PoS, si osservi un calo della persistenza coerente con un incremento dell'efficienza di mercato.

L'analisi non si limita a Ethereum in modo isolato: l'obiettivo è soprattutto mostrare un metodo replicabile e un criterio valutativo. Se Ethereum, che ha scelto il PoS, mostra segnali di maggior efficienza, si potrà ragionare su come altri progetti, spinti dal contesto normativo europeo (MiCA) e dalla necessità di risultare sostenibili agli occhi degli investitori, potranno ottenere risultati analoghi. Al contrario, se i dati non dovessero confermare l'ipotesi, potremmo dedurre che l'approccio teorico necessita di ulteriori sfumature o che i fattori che incidono sull'efficienza di mercato sono più numerosi e complessi di quanto ipotizzato.

3. Dal Proof of Work al Proof of Stake: impatti del “Merge” di Ethereum sull’efficienza di mercato

Nei capitoli precedenti si è delineato un quadro in cui le sollecitazioni normative, racchiuse nel Regolamento MiCA, spingono verso una maggiore sostenibilità e trasparenza per l’intero ecosistema dei cripto-asset. L’ipotesi emersa è che l’adozione di protocolli meno energivori e più aperti, in linea con le indicazioni europee, possa non solo attenuare l’impronta ambientale ma anche promuovere un miglior assorbimento delle informazioni da parte del mercato. Da qui prende avvio la proposta di esplorare se, riducendo la dipendenza da hardware specializzato e rendendo più accessibile il ruolo di validatore, le reti blockchain possano guadagnare in competitività informativa, accelerare il processo di formazione dei prezzi e, in definitiva, avvicinarsi a condizioni di maggiore efficienza.

Tra i contesti in cui tale ipotesi può essere messa alla prova, il Merge di Ethereum spicca per rilevanza: la seconda blockchain al mondo per capitalizzazione di mercato, storicamente basata su Proof of Work, ha infatti migrato nel settembre 2022 a Proof of Stake. L’enorme attenzione mediatica e tecnica riservata a questo passaggio si giustifica sia per i possibili benefici ambientali, con un calo radicale del consumo energetico, sia per la prospettiva di una più ampia e diffusa partecipazione al processo di validazione. All’interno dello scenario delineato nei capitoli precedenti, il Merge diventa un caso di studio privilegiato per verificare se la ricerca di sostenibilità, incoraggiata a livello politico e normativo, si possa tradurre in un effettivo miglioramento della tempestività con cui i prezzi riflettono gli eventi.

3.1 Introduzione al caso di studio

L’evento noto come “Merge” ha segnato il definitivo abbandono del mining energivoro su Ethereum, sostituendo il meccanismo di consenso PoW con un modello basato sullo

stake delle criptovalute possedute dai validatori¹⁶². Questo passaggio si inserisce in un dibattito già vivo sull'importanza di ridurre l'impatto ambientale delle blockchain e, al contempo, di rafforzarne la solidità informativa. Ethereum, grazie alla sua importanza nell'ecosistema cripto, sia per la capitalizzazione di mercato, sia per il ruolo centrale ricoperto nella finanza decentralizzata (DeFi) e nello sviluppo di smart contract, rappresenta un contesto privilegiato per osservare se una validazione più "green" e inclusiva possa effettivamente influire sulla qualità dei segnali di prezzo¹⁶³.

Le riflessioni sviluppate in precedenza hanno evidenziato come MiCA, pur senza imporre algoritmi di consenso specifici, insista su criteri ESG e sulla necessità di divulgare le metriche legate al consumo di risorse. Una blockchain che si conformi a tali indicazioni potrebbe risultare più appetibile per investitori istituzionali e utenti attenti al tema della sostenibilità, incrementando la competitività informativa. Se, fino a poco tempo fa, Ethereum utilizzava un protocollo PoW con elevati consumi energetici, la transizione a PoS, finalizzata nel settembre 2022, offre l'esempio più emblematico di come un network di grandi dimensioni possa adottare una soluzione meno dispendiosa. Resta da verificare, tuttavia, se la riduzione dell'impatto ambientale si traduca in un mercato potenzialmente più reattivo alle novità.

Per comprendere meglio le ragioni che rendono il Merge di Ethereum un caso studio di riferimento, occorre considerare la posizione di rilievo che questa blockchain riveste. Anzitutto, la grande quantità di sviluppatori, token e applicazioni decentralizzate che gravitano nell'ecosistema Ethereum fa sì che ogni cambiamento al protocollo abbia ripercussioni sistemiche su una molteplicità di progetti¹⁶⁴. Inoltre, la capitalizzazione di Ethereum e i volumi di scambio elevati rendono i movimenti di prezzo altamente significativi: qualsiasi segnale di accelerazione (o rallentamento) nella capacità di

¹⁶²De Vries, A. (2023). Cryptocurrencies on the road to sustainability: Ethereum paving the way for Bitcoin. *Patterns*, 4(1).

¹⁶³Kushwaha, S. S., Joshi, S., Singh, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). *Ethereum smart contract analysis tools: A systematic review*. *Ieee Access*, 10, 57037-57062.

¹⁶⁴Teng, H., Tian, W., Wang, H., & Yang, Z. (2022). *Applications of the Decentralized Finance (DeFi) on the Ethereum*. In 2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers, pp. 573-578.

assimilare le informazioni può emergere in modo chiaro, data la presenza di numerosi operatori e fonti informative.

All'interno di questo quadro, la scelta di passare a PoS non si limita a un risparmio energetico radicale, ma si inserisce in una traiettoria di crescita e trasformazione orientata a rispondere ad alcune delle sollecitazioni emerse nel panorama normativo. MiCA, richiedendo maggiore disclosure ambientale e attenzione ai criteri ESG, ha posto in luce come i protocolli energivori possano risultare meno sostenibili anche sul piano reputazionale. Ethereum, pur non essendo “costretta” dal legislatore, ha comunque realizzato uno dei cambiamenti più rilevanti nella storia delle criptovalute, mostrandosi coerente con l'idea che sistemi a basso impatto ambientale possano risultare preferibili e, potenzialmente, attirare più capitali e validatori.

Nei paragrafi che seguono verranno esplicitati gli obiettivi conoscitivi e le domande di ricerca che guideranno l'indagine empirica. L'intento è di inquadrare il Merge all'interno di un orizzonte teorico in cui la sostenibilità, promossa anche dal contesto di regole delineato in precedenza, possa associarsi a una maggiore rapidità di aggiustamento dei prezzi alle informazioni. Se, confrontando i rendimenti di Ethereum prima e dopo l'aggiornamento, emergerà una riduzione di pattern persistenti e una maggiore reattività alle novità, si potrà sostenere che la svolta “green” di Ethereum abbia contribuito a un'evoluzione positiva sul piano dell'efficienza di mercato. Al contrario, un comportamento invariato suggerirebbe che altri fattori, non direttamente legati al passaggio da PoW a PoS, continuano a orientare le dinamiche di prezzo.

3.1.1 Domande di ricerca

Dopo aver illustrato il quadro generale in cui si inserisce l'analisi, occorre chiarire in che modo la transizione da Proof of Work a Proof of Stake, nel caso di Ethereum, possa offrire evidenze empiriche sul possibile collegamento tra un meccanismo di consenso meno dispendioso e l'efficienza del mercato. Si è visto come i requisiti di disclosure ambientale e i criteri ESG, seppur non direttamente prescrittivi di una particolare architettura di rete, possano spingere gli ecosistemi crypto a privilegiare protocolli più “green” e

potenzialmente più aperti¹⁶⁵. Il Merge di Ethereum, rappresentando uno dei cambiamenti più significativi finora realizzati su una blockchain di ampia portata, diventa quindi un test d'elezione per comprendere se, e fino a che punto, una maggiore sostenibilità possa tradursi in un mercato più reattivo all'informazione.

In questa prospettiva, lo studio si concentra su due domande di fondo:

- *Il passaggio da PoW a PoS può incidere concretamente sulla rapidità con cui le quotazioni di Ethereum si adeguano alle notizie rilevanti?*

L'idea di fondo è che un protocollo "green" e meno vincolato al possesso di hardware specializzato riduca le barriere d'ingresso per i validatori e innalzi la competizione informativa. In un mercato più contendibile, eventuali ritardi o inefficienze dovute a bassa trasparenza, gossip speculativo o concentrazione del potere di mining dovrebbero affievolirsi, favorendo una risposta più tempestiva agli eventi e, dunque, una minore prevedibilità dei rendimenti.

- *Confrontando i rendimenti di Ethereum in un periodo pre e post-Merge, emergono segnali di "maturazione" del mercato?*

Per rispondere alla prima domanda, si sfrutterà una strategia che affianca l'osservazione dei prezzi su un campione temporale antecedente al Merge e un campione successivo. Qualora, nella finestra successiva all'aggiornamento, i rendimenti di Ethereum manifestino una riduzione di pattern persistenti e un'accresciuta reattività alle novità, si potrà ritenere che la "svolta ecologica" di Ethereum abbia effettivamente contribuito a ridurre le inefficienze informative. Al contrario, se non si rilevassero variazioni degne di nota rispetto al regime precedente, si aprirebbe la strada a una riflessione su altri fattori (speculativi, macroeconomici, comportamentali) che restano dominanti nell'orientare la formazione dei prezzi.

Questo schema di indagine mira dunque a verificare se i presupposti teorici, secondo cui la conformità ai criteri ESG e la trasparenza sui consumi energetici¹⁶⁶ potrebbero favorire, indirettamente, mercati più rapidi nel tradurre l'informazione in variazioni di prezzo,

¹⁶⁵Raschner, P., & Kosenkov, O. (2023). *Exporting Environmental-Friendly Digitalisation? Implications of EU's MiCA Regulation on the Global Governance of Crypto Systems*. Implications of EU's MiCA Regulation on the Global Governance of Crypto Systems (April 4, 2023).

¹⁶⁶Lal, A., & You, F. (2023). *Climate concerns and the future of nonfungible tokens: Leveraging environmental benefits of the Ethereum Merge*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 120(29).

trovino un riscontro pratico. Il Merge di Ethereum, simbolo di un passaggio a un consenso meno impattante, si rivela un contesto privilegiato per misurare l'eventuale evoluzione del mercato verso una condizione di maggiore efficienza informativa, coerentemente con l'impostazione sostenuta in precedenza.

3.1.2 Ipotesi di ricerca

L'analisi qui proposta parte dall'idea che il passaggio di Ethereum a Proof of Stake possa avere ripercussioni ben più ampie del solo risparmio energetico, incidendo sul comportamento del mercato e, potenzialmente, sulla rapidità con cui le notizie rilevanti si riflettono nei prezzi. A questo proposito, si delineano due ipotesi fondamentali:

- *Ipotesi A: Miglioramento dell'efficienza di mercato*

Questa ipotesi si fonda sull'idea che un protocollo meno oneroso dal punto di vista energetico riduca le barriere d'ingresso per i validatori, attirando un numero più elevato di partecipanti competenti e, in particolare, soggetti istituzionali interessati a soluzioni conformi ai principi ESG¹⁶⁷. La maggiore pluralità di operatori e la concorrenza informativa che ne scaturisce potrebbero accelerare l'assimilazione delle notizie, minimizzando la persistenza di pattern prevedibili nei rendimenti di Ethereum. In altre parole, se davvero la transizione a PoS favorisce una rete più accessibile e competitiva, ci si aspetta che l'andamento dei prezzi rifletta con maggior tempestività i segnali rilevanti, riducendo eventuali vantaggi per coloro che si basano su analisi dei trend passati o su inefficienze informative. Sotto questo profilo, il Merge rappresenterebbe un elemento di maturazione del mercato di Ethereum: da un insieme di dinamiche speculative basate su barriere tecnologiche ed energetiche, si passerebbe a una configurazione in cui le logiche di prezzo sono più snelle, flessibili e pronte a integrare i nuovi input esterni.

- *Ipotesi B: Impatto limitato del nuovo protocollo*

In contrapposizione a tale visione, non è da escludere che fattori speculativi, volatilità strutturale e atteggiamenti comportamentali degli investitori continuino a prevalere

¹⁶⁷Lopez-de-Silanes, F., McCahery, J. A., & Pudschedl, P. C. (2024). *Institutional investors and ESG preferences*. Corporate Governance: An International Review.

sulle novità di carattere ambientale e tecnico¹⁶⁸. In sostanza, la migrazione a PoS potrebbe non essere sufficiente a intaccare le radici profonde di un mercato che, storicamente, ha mostrato comportamenti ciclici, fluttuazioni violente e una spiccata propensione a seguire il sentiment del momento. Qualora tali dinamiche si confermino, la prevedibilità dei rendimenti di ETH rimarrebbe sostanzialmente simile a quella sperimentata prima del Merge, indicando che la riforma del protocollo, per quanto vantaggiosa sul fronte del risparmio energetico, non abbia portato cambiamenti apprezzabili in termini di efficienza. In questo scenario, la “spinta green” derivante dall’attenzione ai principi ESG verrebbe circoscritta soprattutto all’aspetto reputazionale, senza generare evoluzioni significative nel modo in cui il mercato integra le informazioni.

In entrambi i casi, l’interrogativo di fondo riguarda la rapidità e la qualità con cui Ethereum riesce a scontare le notizie potenzialmente rilevanti, dagli annunci normativi alle innovazioni tecniche, fino agli eventi di natura macroeconomica che interessano l’intero comparto crypto. Se i dati empirici evidenzieranno un calo dei pattern di persistenza o di prevedibilità nel periodo successivo al Merge, sarà possibile affermare che l’adozione di PoS ha prodotto un miglioramento concreto dell’efficienza, coerentemente con le premesse teoriche legate alla maggiore inclusività e sostenibilità del protocollo. Al contrario, in mancanza di differenze tangibili rispetto alla fase pre-Merge, occorrerà riconoscere che, almeno allo stato attuale, il vantaggio energetico non si è tradotto in un’effettiva evoluzione delle logiche di prezzo.

Nei paragrafi seguenti verrà quindi presentata un’analisi empirica che confronterà i rendimenti di Ethereum in due fasi temporali distinte: prima e dopo l’implementazione del PoS. Tale confronto, focalizzato sulla verifica dell’eventuale diminuzione di schemi ricorrenti, costituirà il test cruciale per stabilire se l’ipotesi di un “salto di qualità” in termini di efficienza informativa sia da ritenersi valida o se, viceversa, il cambiamento di protocollo non abbia influito in modo apprezzabile sulle dinamiche di mercato.

¹⁶⁸Barnes, P. (2018). *Crypto currency and its susceptibility to speculative bubbles, manipulation, scams and fraud*. Journal of Advanced Studies in Finance (JASF), 9(2 (18)), pp. 60-77.

3.2 Dataset e configurazione dell'analisi

L'elaborazione di un dataset adeguato rappresenta un passaggio fondamentale per assicurare che il confronto tra Ethereum prima e dopo il Merge risulti coerente e rilevante. Da un lato, occorre individuare un periodo di osservazione che includa una fase antecedente al cambiamento di protocollo e una successiva, così da disporre di un insieme di dati omogeneo per entrambe le situazioni. Dall'altro, è opportuno selezionare criptovalute di riferimento che mantengano un meccanismo di consenso invariato nello stesso arco temporale, offrendo così un paragone utile per isolare eventuali effetti legati alla transizione di Ethereum.

La configurazione dell'analisi si basa quindi sulla raccolta di informazioni relative a Ethereum e a un gruppo di criptovalute che non hanno subito modifiche analoghe nel proprio modello di validazione. Una volta stabiliti l'orizzonte temporale e le fonti da cui attingere i dati, sarà possibile verificare, nei paragrafi successivi, se l'aggiornamento di Ethereum abbia comportato variazioni significative nella prevedibilità dei rendimenti e nella velocità con cui il mercato integra gli stimoli esterni.

3.2.1 Orizzonte temporale e fonte dati

La data del 15 settembre 2022, corrispondente al completamento formale del Merge, è stata assunta come spartiacque per distinguere in modo netto due fasi diverse di Ethereum: la prima, in cui era ancora attivo il meccanismo Proof of Work, e la seconda, avviata subito dopo l'adozione di Proof of Stake¹⁶⁹. Per assicurare un confronto sufficientemente robusto, si è deciso di analizzare dodici mesi che precedono l'aggiornamento e un intervallo della stessa ampiezza nel periodo successivo, così da ottenere un numero omogeneo di osservazioni in entrambe le finestre. Il criterio cronologico adottato, che bilancia il campione "pre-Merge" con quello "post-Merge" su un arco temporale complessivo di due anni, consente di attenuare fattori esterni tipici di intervalli limitati (ad esempio, eventi congiunturali di breve termine o improvvisi picchi di volatilità), circoscrivendo il rischio di sovra-interpretare oscillazioni anomale. Inoltre, il

¹⁶⁹Asif, R., & Hassan, S. R. (2023). *Shaping the future of Ethereum: Exploring energy consumption in Proof-of-Work and Proof-of-Stake consensus*. *Frontiers in Blockchain*, 6, 1151724.

mantenimento di una durata simile nelle due fasi mira a dare evidenza di eventuali cambiamenti strutturali nel comportamento di Ethereum, isolandoli quanto più possibile dalle normali fluttuazioni di mercato.

Il reperimento delle quotazioni è stato effettuato su base giornaliera, attraverso l'utilizzo di Yahoo Finance, una piattaforma che fornisce dati storici affidabili e omogenei per le principali criptovalute. L'utilizzo di un'unica fonte contribuisce a ridurre possibili divergenze determinate da metodologie di registrazione differenti. Inoltre, la cadenza giornaliera appare adeguata a evidenziare eventuali cambiamenti di medio periodo, senza il rumore tipico di rilevamenti intraday.

In questo modo, la base informativa risulta composta da prezzi di chiusura, registrati con criteri uniformi lungo l'intero orizzonte temporale di riferimento e per tutte le criptovalute incluse nell'analisi. Tale impostazione consente non solo di coprire gli episodi più significativi che hanno interessato il mercato, ma anche di evitare una frammentazione eccessiva della serie temporale, semplificando così l'identificazione di trend e discontinuità. Inoltre, essa crea le premesse ideali per condurre le successive verifiche volte a individuare possibili cambiamenti nella prevedibilità dei rendimenti di Ethereum, in concomitanza con la sua transizione verso un meccanismo di consenso meno energivoro.

3.2.2 Selezione delle criptovalute di confronto

Per valutare se la transizione di Ethereum a Proof of Stake abbia concretamente modificato la reattività dei rendimenti di Ethereum, si è ritenuto opportuno includere nell'analisi alcune criptovalute che non abbiano introdotto cambiamenti analoghi al protocollo. La scelta si è concentrata su tre progetti che adottano, tuttora, un modello PoW, preservando stabilità e un discreto volume di scambi, così da fornire un confronto credibile.

La prima moneta presa in considerazione è Bitcoin (BTC), la criptovaluta più conosciuta e capitalizzata a livello mondiale. Oltre a costituire un punto di riferimento quasi obbligato per ogni studio sul mercato crypto, Bitcoin ha mantenuto la sua struttura PoW

lungo l'arco temporale scelto, rendendosi ideale come “benchmark” di un consenso basato sul mining tradizionale¹⁷⁰.

In aggiunta a BTC, sono stati inclusi Litecoin (LTC)¹⁷¹ e Dogecoin (DOGE)¹⁷², due monete che, pur condividendo la logica PoW, presentano caratteristiche e comunità piuttosto differenti. Litecoin, spesso definita la “silver” accanto all’“oro” rappresentato da Bitcoin¹⁷³, è nata con l'obiettivo di offrire transazioni più rapide e commissioni inferiori. Questa finalità l'ha resa un asset discretamente popolare e con un buon volume di scambi, pur senza mai raggiungere la fama di BTC. Dogecoin, invece, deriva originariamente da un fork di Litecoin, ma nel tempo ha assunto un profilo unico: in apparenza una “meme coin”, si è poi consolidata grazie a una community vivace e all'attenzione mediatica, arrivando a esprimere capitalizzazioni di mercato significative¹⁷⁴.

L'idea di prendere in esame tutte e tre queste criptovalute risponde a un'esigenza di pluralità all'interno della categoria PoW. Bitcoin incarna la dimensione più “istituzionale” e storica, Litecoin offre uno spaccato di moneta con costi di transazione tipicamente minori rispetto a BTC¹⁷⁵, mentre Dogecoin si colloca in una sfera talvolta più speculativa e popolare¹⁷⁶, benché anch'essa abbia mantenuto il mining come meccanismo centrale. Analizzare il comportamento di queste criptovalute nel medesimo arco temporale permetterà di individuare eventuali divergenze tra chi resta saldo nel protocollo PoW e chi, come Ethereum, ha scelto di evolvere verso un consenso basato sullo stake.

¹⁷⁰Bhaskar, N. D., Wanfeng, C., Haili, L., & Chuen, D. L. K. (2024). *Bitcoin mining technology*. In Handbook of digital currency, pp. 41-64.

¹⁷¹Charlie Lee (2011). *Litecoin - a lite version of Bitcoin. Launched!*. Disponibile su: <https://bitcointalk.org/index.php?topic=47417.0>.

¹⁷²Markus, B. e Palmer, J. (2013). *Dogecoin Core*. Disponibile su: <https://github.com/dogecoin/dogecoin>.

¹⁷³Yu, H., Sun, Y., Liu, Y., & Zhang, L. (2024). *Bitcoin Gold, Litecoin Silver: An Introduction to Cryptocurrency Valuation and Trading Strategy*. In Future of Information and Communication Conference pp. 573-586.

¹⁷⁴Chohan, U. W. (2021). *A history of Dogecoin*. Discussion Series: Notes on the 21st Century.

¹⁷⁵Jumaili, M. L. F., & Karim, S. M. (2021). *Comparison of two cryptocurrencies: Bitcoin and Litecoin*. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1963, No. 1, p. 012143). IOP Publishing.

¹⁷⁶Kukacka, J., & Kristoufek, L. (2023). *Fundamental and speculative components of the cryptocurrency pricing dynamics*. Financial Innovation, 9(1), 61.

Questa impostazione, nel suo complesso, mira a isolare le possibili differenze legate alla svolta “green” di Ethereum, confrontando i dati di ETH con quelli di progetti che, nello stesso periodo, non hanno adottato modifiche di portata comparabile. In tal modo, se emergessero anomalie o variazioni significative nel comportamento dei rendimenti di Ethereum, risulterebbe più agevole collegarle al passaggio da Proof of Work a Proof of Stake, piuttosto che attribuirle a oscillazioni generali del comparto cripto.

3.3 Metodologia

L’approccio metodologico si concentra sulla valutazione dei possibili cambiamenti nella prevedibilità dei rendimenti di Ethereum a seguito del passaggio dal Proof of Work al Proof of Stake. Per raggiungere tale scopo, si procede dapprima alla trasformazione delle quotazioni giornaliere in log-rendimenti, così da ottenere serie adatte agli strumenti di analisi statistica. Successivamente, si verifica la stazionarietà dei dati, passaggio essenziale per molte tecniche di valutazione dei pattern temporali. Infine, si applica un indicatore specifico per la persistenza delle serie, al fine di verificare se, e in quale misura, l’aggiornamento di Ethereum abbia ridotto la prevedibilità dei prezzi, mettendo a confronto i risultati con le criptovalute rimaste su un consenso basato su Proof of Work.

3.3.1 Preparazione del dataset

Il punto di partenza consiste nell’avere a disposizione, per ognuna delle criptovalute considerate, la serie temporale dei prezzi di chiusura giornalieri. Questi valori, estratti su un intervallo che copre sia il periodo antecedente sia quello successivo al Merge di Ethereum, rappresentano la base su cui si andranno a svolgere le analisi relative alla prevedibilità e all’eventuale persistenza dei rendimenti. Tuttavia, l’uso diretto dei prezzi non risulta ottimale per individuare pattern o correlazioni temporali: appare quindi opportuno passare dai prezzi ai rendimenti.

Nell'ambito degli studi empirici in finanza e in economia, è ormai consolidata la prassi di adottare i log-rendimenti anziché i rendimenti semplici (percentuali)¹⁷⁷. Il log-rendimento giornaliero tra un giorno t e il giorno precedente $t - 1$ si definisce come:

$$r_t = \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right),$$

dove P_t e P_{t-1} indicano il prezzo di chiusura registrato, rispettivamente, al giorno t e al giorno $t - 1$. Questa scelta non è meramente formale, bensì si fonda su diverse considerazioni di natura statistica, pratica e interpretativa.

- *Proprietà additive*: quando si considerano intervalli temporali più lunghi della singola giornata, i rendimenti logaritmici consentono di sommare in modo lineare le variazioni frazionate nel tempo. Con i rendimenti semplici, l'aggregazione su più giorni risulta meno immediata, mentre l'uso del log consente di trattare le variazioni come se fossero incrementi successivi di un processo cumulativo.
- *Distribuzione più vicina alla normalità*: sebbene i rendimenti delle criptovalute presentino spesso code pesanti e volatilità elevata, l'impiego del logaritmo riduce l'impatto delle variazioni molto ampie e tende a "simmetrizzare" leggermente la distribuzione¹⁷⁸. Questo aspetto facilita l'applicazione di test statistici che presuppongono, quanto meno, una forma non troppo lontana da quella gaussiana.
- *Riduzione del bias in caso di grandi variazioni di prezzo*: quando un asset subisce movimenti molto marcati da un giorno all'altro, i rendimenti semplici amplificano il peso di tali variazioni, soprattutto in presenza di valori di prezzo molto diversi tra loro in due momenti distinti. Il rendimento logaritmico introduce una scala proporzionale, limitando l'effetto di differenze eclatanti nella quotazione¹⁷⁹.

¹⁷⁷Panna, M. (2017). *Note on simple and logarithmic return*. APSTRACT: applied studies in agribusiness and commerce, 11, pp. 127-136.

¹⁷⁸Quigley, L., & Ramsey, D. (2008). *Statistical analysis of the log returns of financial assets*. Financial mathematic, University of Limerick, 32.

¹⁷⁹Figueiredo, F., Gomes, M. I., & Neves, M. (2011). *Adaptive reduced bias estimation of financial log-returns*. Risk & Extreme Values in Insurance and Finance.

- *Interpretabilità finanziaria*: benché più abituale nei mercati azionari, l'utilizzo dei log-rendimenti è divenuto una sorta di standard anche per le criptovalute. Risulta infatti più comodo confrontare e combinare rendimenti “log-based” su orizzonti differenti; ad esempio, tre giorni di incrementi successivi hanno un effetto cumulativo che si approssima a $r_t + r_{t+1} + r_{t+2}$ in termini logaritmici, mentre con i rendimenti percentuali l'aggregazione sarebbe meno lineare.

Nel contesto specifico dello studio, i log-rendimenti sono calcolati per tutte le criptovalute considerate. Per ogni giornata di osservazione, si calcola r_t in base al rapporto tra il prezzo di chiusura odierno e quello del giorno precedente. Tale formula si applica in modo identico lungo l'intero periodo considerato, consentendo di costruire una serie di valori r_t di lunghezza pari al numero di giornate utili al confronto. È importante che, a livello operativo, si controlli la coerenza dei dati: qualora un giorno presentasse un prezzo mancante o palesemente errato (evento raro, ma possibile), verrebbe meno la possibilità di calcolare correttamente il log-rendimento di quel giorno.

Il risultato finale è un dataset omogeneo, costituito da log-rendimenti giornalieri, con cui diventa più agile rilevare le dinamiche dei prezzi. Diviene in tal modo possibile applicare test di stazionarietà, modelli di persistenza (come il calcolo dell'Hurst exponent) e altre metodologie che beneficiano della maggiore regolarità apportata dai log-rendimenti rispetto ai rendimenti percentuali.

3.3.2 Verifica di stazionarietà

Dopo aver convertito i prezzi giornalieri in log-rendimenti, la verifica della stazionarietà costituisce un passaggio metodologico fondamentale. In termini generali, una serie $\{r_t\}$ si definisce stazionaria se le sue proprietà statistiche (in particolare, media, varianza e autocorrelazioni) rimangono invariate nel corso del tempo¹⁸⁰. Tale condizione non è puramente formale: la maggior parte dei test e degli strumenti utilizzati per sondare la persistenza o la prevedibilità presuppone che i rendimenti non presentino trend deterministici, salti di regime o radici unitarie significative.

¹⁸⁰Witt, A., Kurths, J., & Pikovsky, A. (1998). *Testing stationarity in time series*. Physical Review E, 58(2), 1800.

Per stabilire se i log-rendimenti di una criptovaluta siano compatibili con l'ipotesi di stazionarietà, è prassi applicare alcuni test ben noti nella letteratura economico-finanziaria. Uno dei più diffusi è l'*Augmented Dickey-Fuller test (ADF)*, il quale nasce per verificare la presenza di radici unitarie¹⁸¹. L'ipotesi nulla (\mathcal{H}_0) è che la serie $\{y_t\}$ contenga una radice unitaria e non sia dunque stazionaria¹⁸². Per intercettare eventuali autocorrelazioni e dinamiche ritardate, si considera un modello di tipo:

$$\Delta y_t = \alpha + \beta y_{t-1} + \sum_{j=1}^p \gamma_j \Delta y_{t-j} + \varepsilon_t,$$

dove:

- y_t è la variabile di interesse (i log-rendimenti nel nostro contesto),
- $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$ rappresenta la differenza prima,
- α è il termine costante (drift),
- β è il coefficiente chiave per rilevare la radice unitaria,
- γ_j sono parametri che correggono l'autocorrelazione residua nei differenziali,
- ε_t è il residuo.

Se $\beta = 0$ (ipotesi nulla), la serie presenta una radice unitaria e si configura come non-stazionaria. Se, invece, β è stimato nettamente minore di zero, la statistica di test assume un valore molto negativo e, in tal caso, si rifiuta \mathcal{H}_0 , concludendo che y_t non ha radici unitarie rilevanti, indicando stazionarietà.

Il software statistico calcola una t-statistica e la confronta con valori tabulati per la cosiddetta distribuzione di Dickey-Fuller (non standard). Più il risultato è “sotto” la soglia critica (ossia più negativo), maggiore l'evidenza per respingere l'ipotesi nulla. Un p-value molto basso va nella stessa direzione: significa che sarebbe estremamente improbabile, sotto ipotesi di radice unitaria, ottenere una statistica così negativa. Se si rifiuta l'ipotesi nulla, si conclude che la serie è (verosimilmente) stazionaria.

¹⁸¹Mushtaq, R. (2011). *Augmented dickey fuller test*.

¹⁸²Lopez, J. H. (1997). *The power of the ADF test*. Economics Letters, 57(1), pp. 5-10.

Un secondo strumento, molto affine all'ADF, è il test di *Phillips-Perron (PP)*, risolve in modo diverso i problemi di autocorrelazione e eteroschedasticità che possono affliggere il modello di regressione, ma la formulazione di base resta simile¹⁸³:

$$y_t = \rho y_{t-1} + \eta_t,$$

dove:

- ρ è il coefficiente che cattura il grado di dipendenza di y_t dal proprio valore passato,
- η_t è il termine di errore che influenza il processo a ogni passo temporale.

Il procedimento di correzione dei residui differisce, consentendo di arrivare a un'altra statistica che verifica la presenza di una radice unitaria. Anche in questo caso, l'ipotesi nulla è che la serie non sia stazionaria.

Il metodo PP adotta stime non parametriche della varianza dei residui per rendere più robuste le conclusioni. Una volta calcolata la statistica PP, la si raffronta a valori critici derivati da simulazioni Monte Carlo o da tabelle specifiche, anch'esse non standard. Se risulta molto negativa (o si osserva un p-value sufficientemente basso), si rifiuta la radice unitaria, riconoscendo la serie come (probabilmente) stazionaria. Se, viceversa, non è abbastanza al di sotto della soglia critica, non ci sono evidenze per respingere la non-stazionarietà¹⁸⁴.

Vi è poi il test di *KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin)*, che assume però un approccio pressoché opposto rispetto ad ADF e PP. In questo caso, l'ipotesi nulla sostiene che la serie sia stazionaria, mentre l'ipotesi alternativa prevede la presenza di trend o elementi di non-stazionarietà¹⁸⁵. Il modello di riferimento si basa su una decomposizione del tipo:

¹⁸³Breitung, J., & Franses, P. H. (1998). *On Phillips-Perron-type tests for seasonal unit roots*. *Econometric Theory*, 14(2), pp. 200-221.

¹⁸⁴Cheung, Y. W., & Lai, K. S. (1997). *Bandwidth selection, prewhitening, and the power of the Phillips-Perron test*. *Econometric Theory*, 13(5), pp. 679-691.

¹⁸⁵Hobijn, B., Franses, P. H., & Ooms, M. (2004). *Generalizations of the KPSS-test for stationarity*. *Statistica Neerlandica*, 58(4), pp. 483-502.

$$y_t = \mu + \delta t + u_t,$$

dove:

- μ è un livello costante,
- δt rappresenta un trend lineare,
- u_t è un processo stazionario.

Se la statistica di test KPSS è troppo alta, si conclude che i dati mostrano segnali di radice unitaria o di non-stazionarietà. Se il valore di test rimane contenuto (con un p-value elevato), non si hanno elementi per rifiutare l'ipotesi di stazionarietà¹⁸⁶.

Nell'ambito di questa analisi, la scelta di affidarsi a tutti e tre i test (ADF, PP e KPSS) è finalizzata ad avere un quadro più completo della natura dei log-rendimenti. Con ADF e PP si indaga la possibilità che la serie presenti una radice unitaria, mentre KPSS verifica, dall'altro lato, se la serie può essere "accusata" di non-stazionarietà. Quando i risultati convergono, ossia ADF e PP suggeriscono l'assenza di radici unitarie e KPSS non solleva obiezioni alla stazionarietà, cresce la fiducia nella stabilità statistica del processo che genera i rendimenti. Al contrario, se i test fossero in conflitto (ad esempio ADF indica stazionarietà, mentre KPSS rifiuta fortemente l'ipotesi nulla), occorrerebbe procedere con analisi più approfondite, magari suddividendo ulteriormente il campione per verificare la presenza di momenti di regime shift o adottando metodologie di differenziazione aggiuntiva.

Per i cripto-asset selezionati, la stazionarietà dei rendimenti riveste particolare importanza, poiché risulta indispensabile per applicare correttamente la misura dell'Hurst exponent, di cui ci si avvarrà per individuare fenomeni di persistenza o di random walk. Una volta accertato che i log-rendimenti non presentano caratteristiche di trend deterministico, la strada per l'analisi della persistenza risulta aperta: sarà possibile confrontare in modo attendibile la struttura delle autocorrelazioni prima e dopo il passaggio al PoS, riconoscendo se e dove emergano differenze sostanziali rispetto alle reti rimaste su PoW.

¹⁸⁶Lee, D., & Schmidt, P. (1996). *On the power of the KPSS test of stationarity against fractionally-integrated alternatives*. *Journal of econometrics*, 73(1), pp. 285-302.

3.3.3 Calcolo e interpretazione dell'Hurst exponent

L'Hurst exponent, proposto originariamente da Hurst (1951), rappresenta uno strumento molto diffuso per sondare la memoria di lungo periodo nelle serie temporali, cioè la tendenza di un processo a prolungare o a invertire i movimenti osservati in passato. Per calcolarlo, si utilizza di norma l'analisi R/S (Rescaled Range)¹⁸⁷, basata sul rapporto fra l'escursione massima cumulativa (Range) e la deviazione standard (Standard Deviation) dei dati, valutato su diverse lunghezze di sottocampioni.

Più concretamente, si consideri una serie di log-rendimenti $\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ e la relativa media \bar{r}_n , da qui si possono definire:

$$R_n = \max_{1 \leq t \leq n} (\sum_{k=1}^t (r_k - \bar{r}_n)) - \min_{1 \leq t \leq n} (\sum_{k=1}^t (r_k - \bar{r}_n)),$$

$$S_n = \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (r_t - \bar{r}_n)^2 \right)^{1/2},$$

dove:

- R_n è la massima escursione cumulativa dopo aver sottratto la media,
- S_n è la deviazione standard dei rendimenti.

Calcolando il rapporto $\frac{R_n}{S_n}$ (Rescaled Range) per diverse sottosequenze di lunghezza n , Hurst (1951) osservò che esso si avvicina spesso a una relazione del tipo:

$$\frac{R_n}{S_n} \approx c \cdot n^H,$$

dove c è una costante, mentre H è l'Hurst exponent¹⁸⁸. Prendendo i logaritmi, si può ottenere la seguente relazione lineare:

¹⁸⁷Bassingthwaighe, J. B., & Raymond, G. M. (1994). *Evaluating rescaled range analysis for time series*. *Annals of biomedical engineering*, 22, pp. 432-444.

¹⁸⁸Chamoli, A., Bansal, A. R., & Dimri, V. P. (2007). *Wavelet and rescaled range approach for the Hurst coefficient for short and long time series*. *Computers & Geosciences*, 33(1), pp. 83-93.

$$\log\left(\frac{R_n}{S_n}\right) = \log(c) + H \log(n),$$

cosicché la stima di H coincide con la pendenza della retta in un diagramma $\log - \log$, ricavata tramite regressione lineare.

L'interpretazione dei possibili valori di H risulta relativamente immediata¹⁸⁹:

- $H > 0.5$: indica persistenza. I movimenti passati tendono a rafforzarsi, rendendo più probabile la continuazione di un trend in atto. In termini di efficienza, valori maggiori di 0.5 suggeriscono che il mercato non si comporta come un puro random walk.
- $H \approx 0,5$: implica un random walk. La serie non conserva memoria delle variazioni precedenti: ciascun nuovo passo risulta indipendente dalla storia recente, in linea con l'Ipotesi di Mercato Efficiente (EMH).
- $H < 0.5$: si ha anti-persistenza. Dopo un movimento rialzista (o ribassista), le probabilità che la tendenza prosegua diminuiscono, lasciando spazio a un cambio di direzione. È un meccanismo di “correzione” piuttosto che di rafforzamento del trend in corso.

Nello studio dell'impatto del Merge di Ethereum, il calcolo dell'Hurst exponent appare particolarmente utile per valutare eventuali modifiche nella struttura del mercato. Se, dopo l'aggiornamento, i valori di H si discostano sensibilmente rispetto alla fase PoW, potrebbe emergere un cambiamento nella memoria di lungo termine dei rendimenti; ad esempio, un incremento di H oltre 0.5 potrebbe segnalare un mercato più persistente (e meno casuale), mentre un avvicinamento a 0.5 richiamerebbe maggiore coerenza con un random walk. Parallelamente, il riscontro sulle monete PoW (come Bitcoin, Litecoin o Dogecoin) aiuta a discriminare se un eventuale scostamento dell'Hurst exponent di Ethereum sia da imputare alla svolta PoS o se, invece, rispecchi condizioni generali del mercato cripto in quel determinato periodo. Se le altre criptovalute non mostrano cambi apprezzabili di H , mentre Ethereum si avvicina alla soglia dello 0.5, si ha un indizio di effetto specifico del nuovo meccanismo di consenso sulla dinamica dei rendimenti. In definitiva, l'Hurst exponent rappresenta una misura di come la storia passata incida, o

¹⁸⁹Gómez-Águila, A., Trinidad-Segovia, J. E., & Sánchez-Granero, M. A. (2022). *Improvement in Hurst exponent estimation and its application to financial markets*. *Financial Innovation*, 8(1), 86.

meno, sulla futura evoluzione dei prezzi. Valori prossimi a 0.5 sostengono l'ipotesi di un mercato "senza memoria", in linea con l'efficienza informativa; scostamenti positivi o negativi indicano, rispettivamente, tendenze persistenti o anti-persistenti.

3.4. Risultati empirici

Le analisi fin qui descritte trovano compimento nella presentazione dei risultati ottenuti, suddivisi in più fasi: anzitutto, viene illustrato se e in quale misura i log-rendimenti delle criptovalute selezionate presentino condizioni di stazionarietà; successivamente, si passa a indagare il loro comportamento in termini di persistenza, valutando l'Hurst exponent calcolato sui campioni temporali. L'obiettivo conclusivo è stabilire se, in corrispondenza del Merge di Ethereum, emerga un cambiamento effettivo nella struttura dei rendimenti, o se, invece, la dinamica di mercato di Ethereum resti sostanzialmente in linea con quella di altre criptovalute non soggette ad aggiornamenti di protocollo. A seconda del responso, si potrà trarre un giudizio più solido sugli eventuali effetti del passaggio a Proof of Stake sul piano dell'efficienza dei mercati crypto.

3.4.1 Stazionarietà dei rendimenti: esiti dei test

Un passaggio cruciale per validare le successive analisi sulle dinamiche di mercato è la verifica della stazionarietà nei log-rendimenti delle criptovalute prese in considerazione, poiché gran parte degli strumenti statistici di persistenza e prevedibilità (come l'Hurst exponent) presuppongono che la serie non presenti radici unitarie né trend deterministici. Osservando la Figura 8, che ritrae l'andamento dei log-rendimenti di Ethereum (ETH), Bitcoin (BTC), Litecoin (LTC) e Dogecoin (DOGE) per il periodo compreso tra il 15 settembre 2021 e il 15 settembre 2023, si nota come non emergano pattern di lungo periodo o pendenze particolarmente persistenti. Questa prima evidenza qualitativa trova poi conferma nei risultati dei test di stazionarietà riportati nella Tabella 1.

In particolare, i test di Augmented Dickey-Fuller (ADF) e Phillips-Perron (PP) rifiutano l'ipotesi nulla secondo cui le serie avrebbero una radice unitaria: le statistiche risultano molto negative e i relativi p-value si attestano al di sotto della soglia critica (5%), indicando un'evidenza solida a favore della stazionarietà. Parallelamente, il test di Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS), che parte dall'ipotesi nulla di stazionarietà

e la rifiuta soltanto se la serie risulta affetta da trend o radici unitarie, mostra invece p-value elevati, coerenti con l'idea che non si riscontrino fenomeni di non-stazionarietà.

Criptovaluta	ADF (stat)	ADF (p-val)	PP (stat)	PP (p-val)	KPSS (stat)	KPSS (p-val)
Ethereum	-27.0799	p < 0.05	-27.0797	p < 0.05	0.1150	p > 0.05
Bitcoin	-26.3072	p < 0.05	-26.3156	p < 0.05	0.1820	p > 0.05
Litecoin	-26.8909	p < 0.05	-26.9829	p < 0.05	0.1306	p > 0.05
Dogecoin	-7.7310	p < 0.05	-29.4507	p < 0.05	0.0849	p > 0.05

Tabella 1: Test di stazionarietà di Ethereum, Bitcoin, Litecoin e Dogecoin nel periodo pre e post Merge

La convergenza tra ADF, PP e KPSS costituisce un segnale significativo: quando i primi due test escludono la presenza di radici unitarie e, allo stesso tempo, il KPSS non mette in dubbio la stazionarietà, si rafforza la conclusione che la media, la varianza e l'autocorrelazione dei log-rendimenti non subiscano mutamenti sistematici nel tempo¹⁹⁰. Per Ethereum, che attraversa un cambiamento strutturale (il passaggio da Proof of Work a Proof of Stake), emerge dunque che, malgrado l'aggiornamento del protocollo, i rendimenti si confermano statisticamente stazionari anche nel sotto-periodo successivo al Merge. Analogamente, Bitcoin, Litecoin e Dogecoin, rimaste inalterate sul modello Proof of Work, mostrano un comportamento analogo, senza evidenze di non-stazionarietà.

Oltre alla valenza metodologica (i test di stazionarietà qualificano l'uso corretto delle tecniche di analisi della persistenza) questi risultati testimoniano che, in linea generale, i log-rendimenti delle criptovalute esaminate non presentano trend deterministici né salti di regime così marcati da comprometterne le proprietà statistiche di base.

Tale condizione risulta particolarmente importante nel momento in cui si desidera misurare il grado di memoria e di prevedibilità delle serie temporali¹⁹¹: solo se i log-rendimenti si mantengono stazionari è possibile applicare in modo coerente l'Hurst

¹⁹⁰Zuo, X. (2019). *Several important unit root tests*. In 2019 IEEE 2nd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP), pp. 10-14.

¹⁹¹Geweke, J., & Porter-Hudak, S. (1983). *The estimation and application of long memory time series models*. Journal of time series analysis, 4(4), pp. 221-238.

exponent, utile a delineare se i movimenti di prezzo siano riconducibili a un random walk o se, invece, si riscontrino forme di persistenza o anti-persistenza.

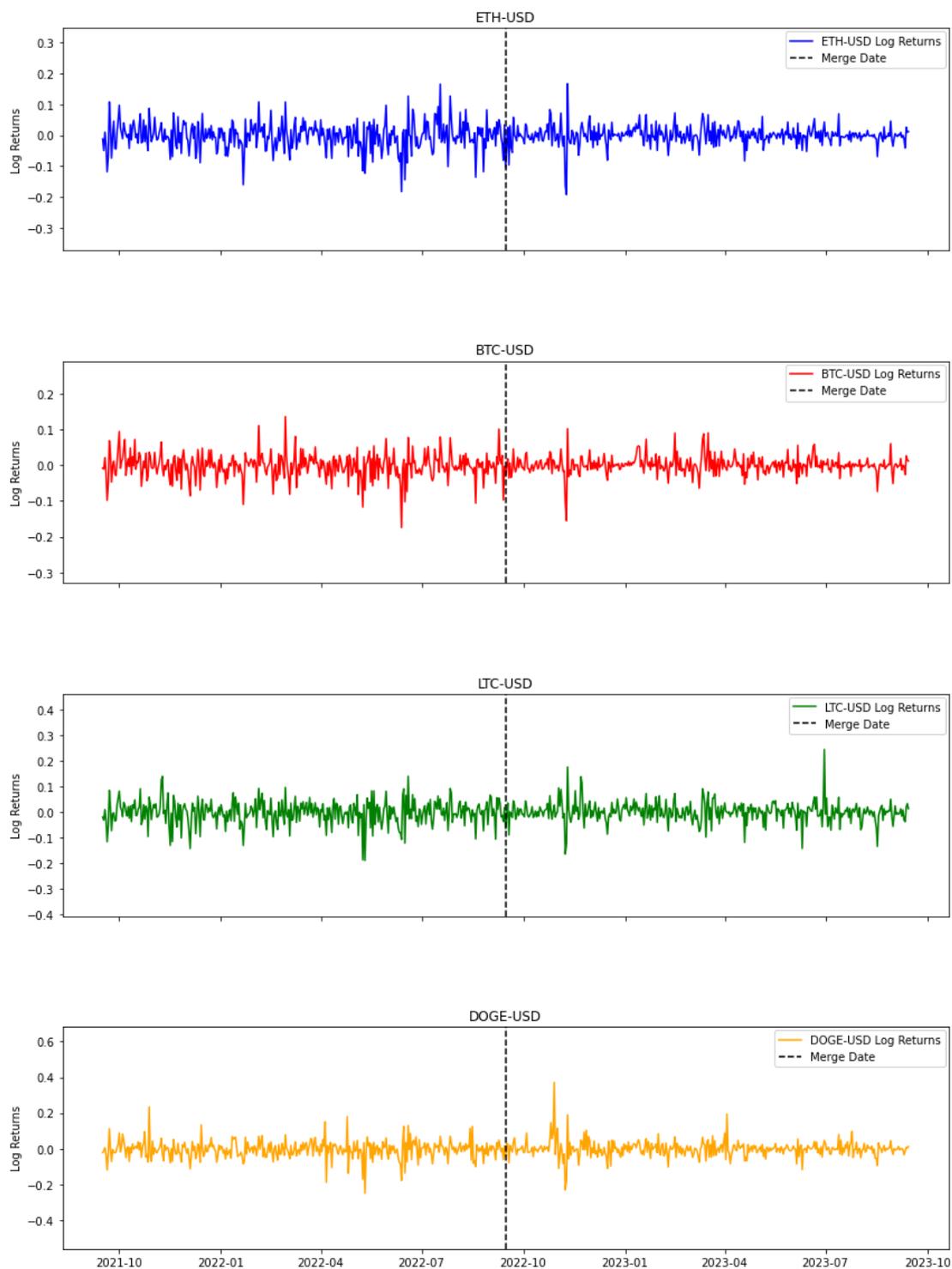


Figura 8: Log-rendimenti giornalieri di Ethereum, Bitcoin, Litecoin e Dogecoin pre e post Merge

3.4.2 Hurst exponent: confronto tra prima e dopo il “Merge”

La Tabella 2 riporta i valori dell’Hurst exponent H relativi a Ethereum (ETH), Bitcoin (BTC), Litecoin (LTC) e Dogecoin (DOGE), calcolati nel periodo di dodici mesi antecedenti e di dodici mesi successivi al Merge di Ethereum. L’obiettivo di questo confronto è comprendere se il passaggio di Ethereum dal Proof of Work al Proof of Stake possa aver condotto i rendimenti di ETH verso una configurazione più vicina al random walk ($H \approx 0.5$), tipica di mercati informativamente più “maturi”. A differenza di Ethereum, che ha introdotto un cambiamento radicale nel protocollo, le altre tre criptovalute non hanno adottato soluzioni analoghe e sono pertanto rimaste ancorate a meccanismi PoW.

Criptoaluta	H (1 anno prima del Merge)	H (1 anno dopo il Merge)
Ethereum	0.6055	0.4971
Bitcoin	0.6249	0.5598
Litecoin	0.6586	0.4550
Dogecoin	0.6245	0.4533

Tabella 2: Hurst exponent di Ethereum, Bitcoin, Litecoin e Dogecoin nel Periodo Pre e Post Merge

Dall’analisi dei dati emerge che:

- Ethereum (ETH), prima del Merge, presentava un coefficiente H moderatamente superiore a 0.6, rientrando nella fascia della persistenza: il mercato tendeva a mantenere i trend di breve periodo, offrendo a chi ne individuava i pattern la possibilità di guadagni sfruttando l’inerzia dei movimenti. Nel periodo successivo all’implementazione del PoS, invece, ETH vede ridursi nettamente l’Hurst exponent, passando a un valore di poco sotto 0.5, ossia in prossimità di un comportamento random walk. Tale spostamento indica che, dopo il Merge, i movimenti di prezzo di Ethereum incorporano le novità in modo più rapido e meno condizionato da memorie passate; in altre parole, si riducono le opportunità di anticipare direzioni di mercato basate sulle autocorrelazioni storiche. Nel quadro dell’Efficient Market Hypothesis (EMH), un coefficiente $H \approx 0.5$ viene solitamente interpretato come un miglior

assorbimento dell'informazione disponibile e, quindi, come una maggiore efficienza in forma debole¹⁹².

- Bitcoin (BTC) si conferma ancora sopra 0.5 sia nel pre sia nel post Merge di Ethereum. Pur registrando un piccolo decremento che riduce la sua persistenza, BTC si assesta comunque in un territorio che non corrisponde a un random walk. Ciò suggerisce che, nel periodo di osservazione, i rendimenti del principale asset crypto abbiano mantenuto una certa “memoria” dei trend, senza raggiungere la soglia di neutralità temporale. È un segnale di stabilità o continuità delle dinamiche di Bitcoin, non influenzate dalla modifica di protocollo avvenuta su Ethereum.
- Litecoin (LTC) e Dogecoin (DOGE) registrano invece variazioni piuttosto forti, portandosi da valori $H > 0.6$ a un'area sotto 0.5. Quest'ultima, anziché testimoniare maggiore efficienza, corrisponde alla cosiddetta anti-persistenza, in cui i movimenti di rialzo o ribasso vengono frequentemente invertiti in breve tempo. Se un trend positivo si manifesta oggi, è più probabile che domani subentri un movimento di correzione, e viceversa. Questo regime è lontano dal comportamento da random walk e non è necessariamente sinonimo di mercato “maturo”, bensì di una dinamica che predilige costanti oscillazioni, presumibilmente alimentate da fenomeni speculativi o da una volatilità particolarmente frenetica.

La vera novità è dunque Ethereum, l'unica tra le quattro criptovalute a scivolare in modo deciso verso $H \approx 0.5$, indicando un cambiamento sostanziale nella natura dei rendimenti. Se BTC, LTC e DOGE non mostrano tendenze univocamente collegate a un miglior assorbimento informativo, ETH, invece, sembra essersi spostata con chiarezza da un regime di moderata persistenza a uno scenario molto vicino alla “neutralità” temporale. Questo riscontro supporta l'interpretazione che la transizione a PoS abbia reso la rete di Ethereum più aperta e competitiva, facilitando l'ingresso di nuovi validatori e favorendo una disseminazione delle informazioni più capillare. Gli investitori, di fronte a un protocollo meno oneroso e a dinamiche di validazione più rapide, vedono ridotte le

¹⁹²Eom, C., Choi, S., Oh, G., & Jung, W. S. (2008). *Hurst exponent and prediction based on weak-form efficient market hypothesis of stock markets*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(18), 4630-4636.

occasioni di sfruttare pattern ereditati dal passato, poiché le notizie e gli shock di mercato vengono metabolizzati con maggiore celerità.

In termini di teoria dei mercati efficienti, un Hurst exponent prossimo a 0.5 indica che i rendimenti diventano meno prevedibili sulla base delle traiettorie storiche, elevando l'asticella competitiva: se in precedenza l'inerzia dei trend forniva un elemento di persistenza (cioè un vantaggio a chi individuava tempestivamente le tendenze), ora tale vantaggio si assottiglia. Il passaggio al Proof of Stake potrebbe dunque aver contribuito a mitigare l'attrito informativo e a modulare la speculazione, conducendo Ethereum a un regime più simile al random walk¹⁹³.

Resta comunque fondamentale sottolineare che un H prossimo a 0.5 non equivale a un mercato perfettamente efficiente in senso forte o semi-forte. L'ipotesi di forma debole rimane l'orizzonte di riferimento quando si osserva un processo dove le informazioni passate non appaiono più sfruttabili per ottenere rendimenti anomali. Tuttavia, i mercati crypto restano densi di rumor, eventi speculativi e oscillazioni repentine. In tale contesto, il valore rilevato per Ethereum suggerisce una riduzione delle autocorrelazioni di breve periodo, confermando che lo shock "tecnologico" del Merge non si è limitato al risparmio energetico, ma ha inciso anche sulla struttura di formazione dei prezzi.

3.5 Discussione e interpretazione dei risultati

Il fatto che Ethereum sia l'unico asset a mostrare questa transizione verso la neutralità temporale solleva la questione del ruolo del PoS nell'influenzare l'efficienza informativa. Un meccanismo di consenso che svincola la sicurezza della rete dal mining energivoro, consentendo a un più ampio numero di validatori di partecipare¹⁹⁴, può infatti rendere il mercato più ricettivo agli eventi rilevanti. Viene così favorito un assorbimento rapido delle novità e, di riflesso, un comportamento dei rendimenti meno dipendente dai trend

¹⁹³Morales, R., Di Matteo, T., Gramatica, R., & Aste, T. (2012). *Dynamical generalized Hurst exponent as a tool to monitor unstable periods in financial time series*. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 391(11), 3180-3189.

¹⁹⁴Cao, B., Zhang, Z., Feng, D., Zhang, S., Zhang, L., Peng, M., & Li, Y. (2020). *Performance analysis and comparison of PoW, PoS and DAG based blockchains*. *Digital Communications and Networks*, 6(4), pp. 480-485.

pregressi. Da qui la ragionevole ipotesi che il protocollo PoS, riducendo i costi di accesso alla validazione, stimoli la competizione informativa e permetta un adeguamento più tempestivo dei prezzi agli shock esterni.

Sul piano strategico, la trasformazione di Ethereum si collega al regolamento MiCA¹⁹⁵, che, senza imporre un passaggio obbligatorio a protocolli meno energivori, introduce stringenti requisiti di disclosure ambientale e un'attenzione particolare alla sostenibilità. In uno scenario in cui le reti ad alto consumo di risorse potrebbero risultare meno attraenti per investitori e operatori istituzionali sensibili ai criteri ESG, Ethereum, scegliendo PoS, si presenta come un progetto in linea con gli standard di responsabilità ambientale promossi da MiCA. La notevole riduzione dei consumi energetici¹⁹⁶, unita all'apertura della rete a un vasto numero di validatori, ne incrementa l'appeal agli occhi di chi desidera operare in un contesto conforme alle nuove esigenze di trasparenza e tutela.

L'esito di questa transizione risulta particolarmente interessante in termini di assorbimento delle notizie. La diminuzione di vincoli legati all'energia o all'hardware specializzato, così come l'incremento dei soggetti in grado di effettuare la validazione, favorisce la rapida reazione del mercato a qualunque novità, che si tratti di aggiornamenti del protocollo, annunci regolamentari o variazioni macroeconomiche. Di conseguenza, gli arbitraggi tendono a manifestarsi più velocemente, e i prezzi vengono corretti con minori ritardi. Questo aspetto, pur non configurando un mercato totalmente efficiente, appare coerente con un innalzamento del livello di concorrenza informativa e con la riduzione di eventuali vantaggi ottenibili tramite l'analisi di pattern passati.

Va ricordato che il settore cripto resta esposto a dinamiche speculative¹⁹⁷, volatilità elevata¹⁹⁸ e possibili eventi inattesi. Pertanto, un H prossimo allo 0.5 non implica

¹⁹⁵Regulation (EU) 2023/1114 of the European Parliament and of the Council on Markets in Crypto-Assets (MiCA). Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R1114>.

¹⁹⁶Gundaboina, L., Badotra, S., & Tanwar, S. (2022). *Reducing resource and energy consumption in cryptocurrency mining by using both proof-of-stake algorithm and renewable energy*. In 2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON), pp. 605-610.

¹⁹⁷Grobys, K., & Junntila, J. (2021). *Speculation and lottery-like demand in cryptocurrency markets*. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 71, 101289.

¹⁹⁸Catania, L., & Grassi, S. (2022). *Forecasting cryptocurrency volatility*. *International Journal of Forecasting*, 38(3), pp. 878-894.

l'assenza di fenomeni emotivi o rumor, né certifica il raggiungimento di una piena efficienza di mercato. Tuttavia, i dati mostrano come Ethereum abbia effettivamente compiuto un passo verso un regime in cui i rendimenti perdono parte della persistenza storica, a differenza di LTC e DOGE, scivolato in un'area dominata da inversioni continue, o di BTC, la cui dinamica rispecchia un cambiamento meno radicale. L'ingresso in un contesto normativo che sottolinea la sostenibilità, grazie a MiCA, rappresenta perciò una spinta ulteriore a ripensare i protocolli di consenso, dal momento che le reti in grado di dimostrare un ridotto impatto ambientale e una maggiore trasparenza potrebbero essere premiate da investitori e operatori istituzionali.

Naturalmente, un'eventuale migrazione generale verso protocolli PoS non si realizzerebbe all'istante né implicherebbe un miglioramento uniforme dell'efficienza: la molteplicità dei progetti, la distribuzione differente di token e la varietà di normative adottate da diverse giurisdizioni continuano a influenzare le scelte di mercato. Ciò non toglie che il percorso di Ethereum, supportato dall'evidenza empirica che registra la flessione dell'Hurst exponent, fornisca un esempio concreto di come il connubio tra un consenso meno dispendioso e uno scenario normativo orientato alla trasparenza possa spingere il mercato verso forme di integrazione dell'informazione più rapide. Questo risulta evidente osservando come la serie dei rendimenti di ETH si sia progressivamente svincolata dalle memorie passate, aprendo la strada a una formazione dei prezzi più ancorata agli stimoli del presente e, potenzialmente, più in linea con l'ipotesi di efficienza in forma debole.

Nel complesso, l'esperienza di Ethereum conferma che l'efficacia di una rete non dipende solo dai parametri tecnici (scalabilità, tempistiche di finalizzazione, costo energetico) ma anche dalla capacità di attirare un flusso costante di operatori informati, pronti a sfruttare e incorporare con immediatezza le novità disponibili. MiCA, aumentando la trasparenza sui consumi e sottolineando il tema ambientale, funge da catalizzatore per quelle blockchain che intendono assicurarsi una reputazione positiva e un pubblico più ampio. Se altri asset dovessero seguire l'esempio di Ethereum, le dinamiche di persistenza finora osservate in parte del mercato cripto potrebbero ridursi ulteriormente, con effetti di più ampia portata sulla prevedibilità e sulla stabilità dei rendimenti nel lungo periodo.

Conclusioni

Il mercato dei cripto-asset si trova oggi al centro di un'evoluzione cruciale, segnata da pressioni normative crescenti e da una presa di coscienza sempre più diffusa sui temi della sostenibilità e della trasparenza. In questo scenario, l'Unione Europea, con l'introduzione di MiCA (Markets in Crypto-Assets), ha aperto la strada a una regolamentazione che mira a garantire maggiore tutela per gli investitori, una migliore informazione sugli impatti ambientali e un allineamento del settore a standard condivisi in materia di responsabilità sociale. L'aspetto più rilevante non è solo la volontà di regolamentare un ambito dai contorni ancora fluidi, ma anche la scelta di favorire dinamiche che incentivino i progetti più "virtuosi" dal punto di vista della sostenibilità, innescando meccanismi di competizione positiva.

La spinta verso modelli di consenso meno energivori e più inclusivi, unita alle nuove prescrizioni normative orientate ai criteri ESG, può incidere sensibilmente sull'efficienza del mercato cripto. Non si tratta di un mero requisito etico o di conformità, bensì di un potenziale fattore abilitante, in grado di ridurre inefficienze informative e di accelerare l'incorporazione delle novità nelle quotazioni. La recente transizione di Ethereum al meccanismo di consenso Proof of Stake, fornisce un riscontro concreto sull'ipotesi che un impianto tecnologico più "green" e aperto possa anche favorire una migliore qualità dei segnali di mercato.

Questa visione nasce dalla constatazione che i modelli di consenso come il PoW, oltre a comportare consumi energetici ingenti, tendono a concentrare il potere di validazione in poche mani, poiché la competizione è basata sugli hardware e sulle risorse minerarie disponibili. In un simile contesto, gli operatori che dominano la potenza di calcolo possono influenzare il processo di validazione e, indirettamente, rendere più lenta o disomogenea la diffusione delle informazioni. Inoltre, la dipendenza da fattori esogeni, come il costo dell'energia, genera incertezze e volatilità aggiuntive, non direttamente collegate ai fondamentali dell'asset. Un protocollo PoS, al contrario, riduce gli ostacoli tecnici all'ingresso, consentendo a molti più soggetti di diventare validatori semplicemente depositando una quantità di token in stake. Ciò produce due effetti sinergici: da un lato, la rete si emancipa dalla "bolletta" energetica e diviene meno vulnerabile a restrizioni o shock di natura ecologica; dall'altro, si amplia la competizione

informativa, poiché un numero maggiore di attori controlla attivamente la blockchain ed è pronto a reagire prontamente a qualunque novità rilevante.

La sostenibilità, grazie ai requisiti di disclosure introdotti da MiCA, diventa un elemento di selezione all'interno del mercato crypto, spingendo i progetti a rivelare in modo chiaro il proprio consumo di risorse e a mostrarsi compatibili con gli standard ESG. Questa maggiore trasparenza finisce per premiare chi sceglie protocolli energeticamente più efficienti, e tale dinamica di mercato potrebbe accelerare la transizione verso meccanismi PoS o altre soluzioni a basso impatto ecologico. Il risvolto sul piano dell'efficienza è che, in un ambiente tecnologico e normativo più maturo, le asimmetrie informative e i ritardi nell'assorbimento delle notizie subiscono una contrazione. La competizione tra validatori e trader che cercano rendimenti in un contesto meno opaco favorisce l'anticipazione e l'arbitraggio rapido di ogni segnale, avvicinando il prezzo al proprio valore di equilibrio in maniera tempestiva.

Un punto nodale, che emerge con forza esaminando gli effetti del passaggio di Ethereum a PoS, è la possibilità di riconoscere segnali empirici di un mercato più reattivo alle novità. Se prima si riscontravano tendenze persistenti o pattern parzialmente prevedibili, oggi sembra che i rendimenti di Ethereum si muovano in modo più casuale (nel senso di un random walk), coerentemente con l'idea che l'informazione pubblica sia inglobata nei prezzi in tempi più rapidi. Per un mercato di stampo istituzionale, questo cambiamento non è banale, perché riduce la manipolabilità dell'asset, attenua fenomeni di speculazione basata su semplici dinamiche storiche e rende la criptovaluta più affidabile per chi valuta investimenti di medio-lungo periodo. Un miglioramento dell'efficienza di mercato in forma debole indica la tendenza dei prezzi a riflettere prontamente tutto ciò che è noto, e chiunque tenti di fare leva su informazioni già diffuse incontra rendimenti rapidamente erosi dagli aggiustamenti di mercato.

Gli attori istituzionali, per loro natura, guardano con particolare interesse a ecosistemi che offrano stabilità, trasparenza e conformità ai principi ambientali. L'ingresso di fondi d'investimento, hedge fund e aziende private di spessore comporta un aumento della liquidità, una maggiore diversificazione e metodologie di analisi sempre più avanzate, che a loro volta penalizzano ogni inefficienza informativa residua. Ne segue un circolo virtuoso: la conformità alle regole e la sostenibilità attirano operatori qualificati, i quali, con la loro attività, accelerano il processo di formazione del prezzo e spostano il mercato

verso forme di efficienza più pronunciate. Anche se l'adozione di PoS non garantisce, di per sé, l'eliminazione di fenomeni speculativi o eventi di volatilità estrema, contribuisce a orientare l'ecosistema verso dinamiche di aggiustamento più ordinate.

La combinazione tra sostenibilità, trasparenza spinta da MiCA e meccanismi di consenso "green" trova un riscontro positivo nell'evidenza empirica offerta dal caso Ethereum, suggerendo che una blockchain più "pulita" e aperta possa rendere i movimenti di prezzo meno correlati al passato e più rapidi nel rispecchiare le novità. Ciò non implica che l'intero mercato cripto sia già pienamente efficiente, né che il PoS rappresenti una formula risolutiva per ogni criticità. Piuttosto, indica che il cambio di protocollo agisce come fattore di trasformazione, anche sotto il profilo informativo, e che le prescrizioni normative in materia di sostenibilità possono generare dinamiche virtuose.

È plausibile ipotizzare che, nel prossimo futuro, più reti decidano di passare a sistemi di validazione a basso impatto energetico, facilitati nella raccolta di capitali e nel rapporto con le autorità regolamentari. Se questo trend s'intensificasse, e se la crescente attenzione ai parametri ESG continuasse a guidare le preferenze di investitori e stakeholder, la struttura competitiva dei mercati cripto potrebbe mutare in modo sostanziale, favorendo piattaforme e progetti in linea con le richieste di accountability e di responsabilità ambientale. Parallelamente, tale selezione "dal basso", potenziata dalle regole di MiCA, restringerebbe lo spazio per iniziative poco trasparenti, opache o eccessivamente energivore, generando un contesto più maturo, in cui i prezzi risentono meno dell'inerzia storica e di fattori speculativi non informativi. In ultima istanza, il perseguimento di un mercato cripto compatibile con le sfide climatiche e con le esigenze di sicurezza e integrità finanziaria potrebbe rivelarsi l'elemento di maggiore impatto sulla futura architettura dell'economia digitale.

Da questa prospettiva, si può affermare che la regolamentazione MiCA, in parallelo a una transizione massiccia verso modelli PoS o assimilabili, posi le basi per un mercato cripto più ordinato e competitivo dal punto di vista informativo. La drastica riduzione dell'impronta ecologica, abbinata a un impianto di governance e validazione aperto, consente a un ampio bacino di validatori, investitori e analisti di intervenire, contribuendo a eliminare progressivamente inefficienze e ritardi nell'aggiustamento dei prezzi.

Per sostenere e accelerare questo percorso, tuttavia, potrebbero essere introdotte ulteriori misure regolamentari in grado di rafforzare la stabilità e l'efficienza dei mercati cripto.

Un primo intervento potrebbe riguardare l'adozione di soglie di variazione giornaliera oltre le quali le contrattazioni verrebbero temporaneamente sospese, sul modello dei circuit breaker presenti nei mercati azionari tradizionali. Tale procedura servirebbe a contenere reazioni eccessivamente emotive nei momenti di alta volatilità e offrirebbe agli operatori la possibilità di analizzare con maggior lucidità gli eventi di mercato, limitando la tendenza a operare in preda al panico o all'euforia del momento. Una sospensione anche solo di qualche minuto o di poche ore potrebbe agevolare una circolazione più razionale delle informazioni, in particolare quando si verificano movimenti bruschi dovuti a notizie inattese o rumor non confermati.

Un secondo aspetto cruciale potrebbe rivolgersi alla definizione di limiti alla leva finanziaria e a dei requisiti di margine più rigorosi, misure che avrebbero l'obiettivo di scongiurare fenomeni di liquidazione a cascata. In molte piattaforme di trading cripto, la possibilità di utilizzare una leva molto elevata produce un ampio scostamento tra l'esposizione complessiva del mercato e i fondamentali reali degli asset: bastano allora fluttuazioni relativamente contenute per innescare una serie di vendite automatiche, con conseguenze particolarmente gravi sull'andamento dei prezzi. Imporre un tetto massimo alla leva disponibile (ad esempio 5x o 10x) e richiedere margini iniziali e di mantenimento più alti attenuerebbe questa dinamica, rendendo il mercato meno soggetto a picchi estremi e più ancorato alle informazioni concrete che ne guidano la valutazione.

Occorre poi considerare con attenzione l'educazione finanziaria e l'informazione obbligatoria per i nuovi investitori. L'introduzione di materiali didattici standardizzati, aggiornati e facilmente fruibili, soprattutto al momento dell'apertura di un conto, potrebbe contribuire a elevare il livello di consapevolezza complessivo, riducendo comportamenti impulsivi e speculazioni fondate su conoscenze approssimative. Dal punto di vista dell'efficienza di mercato, una migliore comprensione della natura degli asset digitali e delle dinamiche di negoziazione permetterebbe agli investitori di fondare le proprie decisioni su dati concreti, anziché lasciarsi influenzare da voci incontrollate o emozioni momentanee. Questo si tradurrebbe in una riduzione del "rumore" nel processo di formazione dei prezzi, consentendo alle informazioni effettivamente rilevanti di incidere sulle quotazioni in modo più rapido e meno distorto.

Da un punto di vista ambientale e sociale, un ulteriore fattore di spinta verso un ecosistema cripto più maturo potrebbe risiedere nell'introduzione di un rating ESG

condiviso e riconosciuto a livello internazionale. Invece di limitarsi a richiedere la semplice divulgazione dei consumi energetici, un sistema di classificazione appositamente studiato per le reti blockchain potrebbe fornire parametri oggettivi per definire diversi livelli di virtuosità. Tale punteggio, sviluppato sulla base di indicatori quali la tipologia di consenso utilizzata (e la relativa impronta ecologica), la capacità di distribuire equamente i diritti di validazione o la trasparenza delle governance, costituirebbe una guida per investitori istituzionali e al dettaglio, aiutandoli a individuare i progetti maggiormente allineati ai principi di sostenibilità e responsabilità. Un blockchain network classificato con un rating ESG alto, ad esempio, risulterebbe più appetibile sotto il profilo reputazionale, stimolando un circolo virtuoso in cui l'impegno per ridurre l'impatto ambientale verrebbe premiato dal mercato. Di converso, le piattaforme con valori di rating bassi rischierebbero di vedere ridotti i flussi d'investimento, venendo spinte ad adottare riforme tecniche e organizzative per migliorare il proprio posizionamento e non rimanere indietro. In tal senso, la concorrenza tra diversi progetti blockchain si giocherebbe non solo sul fronte delle prestazioni tecnologiche o delle funzionalità offerte, ma anche su quello della responsabilità sociale, trasformando i criteri ESG in una leva competitiva a tutti gli effetti. Ciò genererebbe segnali informativi più ricchi e ridurrebbe i costi di ricerca per gli investitori. La maggiore trasparenza sui consumi e sull'impronta ecologica, infatti, permetterebbe ai prezzi di riflettere in modo più preciso la qualità e l'affidabilità complessive di ciascuna blockchain, migliorando ulteriormente il processo di price discovery.

All'interno di un mercato che tende ad auto-organizzarsi su scala globale, queste soluzioni regolamentari richiedono un elevato livello di coordinamento tra le autorità di diversa estrazione geografica. L'efficacia di ogni iniziativa, infatti, diminuisce sensibilmente se esistono giurisdizioni in cui le regole sono poco stringenti o poco chiare. Per questo, sarebbe auspicabile lavorare a una progressiva armonizzazione internazionale, coinvolgendo sia l'Unione Europea sia le altre principali piazze finanziarie mondiali, in un dialogo continuo volto ad allineare i requisiti di trasparenza, di sicurezza e di sostenibilità. In questo modo, si eviterebbero fenomeni di migrazione dei progetti crypto verso territori a regolamentazione più permissiva, e si definirebbe un mercato globale effettivamente regolato in modo uniforme, con regole coerenti sugli obblighi di reporting, sui controlli operativi e sui limiti di leva.

Se queste misure fossero introdotte in modo organico e coordinate con l'evoluzione verso protocolli di consenso sempre meno energivori, si creerebbe un contesto in cui la stabilità e la trasparenza, insieme alla sostenibilità, costituirebbero gli elementi cardine. Una tale cornice, vigile sul piano ambientale e finanziario, contribuirebbe a ridurre i fenomeni speculativi e a calmierare le oscillazioni di prezzo, promuovendo un ecosistema crypto più affidabile e in grado di attirare investitori istituzionali e tradizionali. L'ambizione, e insieme la sfida, consiste nel coniugare la natura fortemente innovativa della finanza decentralizzata con principi di responsabilità sociale e regole comuni, valorizzando al contempo i benefici della tecnologia blockchain e minimizzandone i possibili rischi. Se questo processo evolutivo sarà portato avanti in modo coerente e coordinato, l'economia digitale potrà davvero contare su un'infrastruttura globale trasparente, equilibrata e sostenibile, rafforzando la fiducia di tutti gli attori e contribuendo a stabilire nuovi standard per l'intero sistema finanziario del futuro.

Bibliografia e sitografia

- Al Mamun, M., Syeed, M. A., & Yasmeen, F. (2015). *Are investors rational, irrational or normal?*. Journal of Economic & Financial Studies, 3(04), pp. 1-15.
- Allen, F., Gu, X., & Jagtiani, J. (2022). *Fintech, cryptocurrencies, and CBDC: Financial structural transformation in China*. Journal of International Money and Finance, 124, 102625.
- Ante, L. (2021). *Non-fungible Token (NFT) Markets on the Ethereum Blockchain: Temporal Development, Cointegration and Interrelations*. Journal of Industrial and Business Economics, 48(2), pp. 237-260.
- Asif, R., & Hassan, S. R. (2023). *Shaping the future of Ethereum: Exploring energy consumption in Proof-of-Work and Proof-of-Stake consensus*. Frontiers in Blockchain, 6, 1151724.
- Atzori, M. (2015). *Blockchain Technology and Decentralized Governance: Is the State Still Necessary?*.
- Australian Transaction Reports and Analysis Centre. (2020). *Digital Currency Exchange Providers*. Disponibile su: <https://www.austrac.gov.au/business/your-industry/digital-currency-cryptocurrency/digital-currency-exchange-providers>.
- Barbian, G., & Mellentin, F. (2021). *The cardano proof-of-stake protocol "ouroboros"*.
- Barnes, P. (2018). *Crypto currency and its susceptibility to speculative bubbles, manipulation, scams and fraud*. Journal of Advanced Studies in Finance (JASF), 9(2 (18)), pp. 60-77.
- Basel Committee on Banking Supervision (BCBS) (2022). *Prudential Treatment of Cryptoasset Exposures*. Disponibile su: <https://www.bis.org/bcbs/publ/d533.pdf>.
- Basingthwaighte, J. B., & Raymond, G. M. (1994). *Evaluating rescaled range analysis for time series*. Annals of biomedical engineering, 22, pp. 432-444.
- Beaulieu, M. C. (1998). *Time to maturity in the basis of stock market indices: Evidence from the S&P 500 and the MMI*. Journal of Empirical Finance, 5(3), pp. 177-195.

- Bhaskar, N. D., Wanfeng, C., Haili, L., & Chuen, D. L. K. (2024). *Bitcoin mining technology*. In Handbook of digital currency, pp. 41-64.
- Boehmer, N., Brill, M., Cevallos, A., Gehrlein, J., Sánchez-Fernández, L., & Schmidt-Kraepelin, U. (2024, March). *Approval-based committee voting in practice: a case study of (over-) representation in the Polkadot blockchain*. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 38(9), 9519-9527.
- Bollerslev, T., & Hodrick, R. J. (1999). *Financial market efficiency tests*. Handbook of Applied Econometrics Volume 1: Macroeconomics, pp. 361-399.
- Breitung, J., & Franses, P. H. (1998). *On Phillips–Perron-type tests for seasonal unit roots*. Econometric Theory, 14(2), pp. 200-221.
- Breugem, M., & Buss, A. (2019). *Institutional investors and information acquisition: Implications for asset prices and informational efficiency*. The Review of Financial Studies, 32(6), pp. 2260-2301.
- Brown-Cohen, J., Narayanan, A., Psomas, A., & Weinberg, S. M. (2019, June). *Formal barriers to longest-chain proof-of-stake protocols*. In Proceedings of the 2019 ACM Conference on Economics and Computation, pp. 459-473.
- Brunnermeier, M. K. (2005). *Information leakage and market efficiency*. The Review of Financial Studies, 18(2), pp. 417-457.
- Buterin, V. (2014). *Ethereum: A Next Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform*. Disponibile su: <https://ethereum.org/en/whitepaper/>.
- Cambridge Centre for Alternative Finance (CCAF). (2021). *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)*. Disponibile su: <https://www.cbeci.org/>.
- Cao, B., Zhang, Z., Feng, D., Zhang, S., Zhang, L., Peng, M., & Li, Y. (2020). *Performance analysis and comparison of PoW, PoS and DAG based blockchains*. Digital Communications and Networks, 6(4), pp. 480-485.
- Catania, L., & Grassi, S. (2022). *Forecasting cryptocurrency volatility*. International Journal of Forecasting, 38(3), pp. 878-894.
- CFA Institute. (2020). *ESG Integration in Europe, the Middle East, and Africa: Markets, Practices, and Data*. Disponibile su: <https://www.cfainstitute.org/en/research/esg-investing>.
- CFTC. (2020). *CFTC Releases New Guidance on Digital Assets*. Disponibile su: https://www.cftc.gov/About/HistoryoftheCFTC/history_2020s.html.

- Chamoli, A., Bansal, A. R., & Dimri, V. P. (2007). *Wavelet and rescaled range approach for the Hurst coefficient for short and long time series*. Computers & Geosciences, 33(1), pp. 83-93.
- Charlie Lee (2011). *Litecoin - a lite version of Bitcoin. Launched!*. Disponibile su: <https://bitcointalk.org/index.php?topic=47417.0>.
- Cheung, Y. W., & Lai, K. S. (1997). *Bandwidth selection, prewhitening, and the power of the Phillips-Perron test*. Econometric Theory, 13(5), pp. 679-691.
- Chohan, U. W. (2021). *A history of Dogecoin*. Discussion Series: Notes on the 21st Century.
- Chordia, T., & Miao, B. (2020). *Market efficiency in real time: Evidence from low latency activity around earnings announcements*. Journal of Accounting and Economics.
- CNBC. (2021). *China is kicking out more than half the world's bitcoin miners*. Disponibile su: <https://www.cnbc.com/2021/06/15/chinas-bitcoin-miner-exodus.html>.
- CoinMarketCap (2024). Dati sulla capitalizzazione totale di mercato dei cripto-asset. Disponibili su: <https://coinmarketcap.com/charts/>.
- CoinMarketCap (2024). Dati sulla capitalizzazione totale di mercato dei cripto-asset per categoria. Disponibili su: <https://coinmarketcap.com/charts/>.
- Congressional Research Service. (2022). *Recent Cryptocurrency Developments: Energy and Environmental Implications*. Disponibile su: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF12286/3>.
- De Filippi, P., & Wright, A. (2018). *Blockchain and the Law: The Rule of Code*. Harvard University Press, pp. 22-25, 68-72.
- De Vries, A. (2018). *Bitcoin's Growing Energy Problem*. Joule, 2(5), pp. 801–805.
- De Vries, A. (2023). *Cryptocurrencies on the road to sustainability: Ethereum paving the way for Bitcoin*. Patterns, 4(1).
- Digiconomist (2024). Dati sul consumo energetico annuale di Bitcoin (PoW) rispetto a quello di vari paesi. Disponibili su: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>.

- Digiconomist (2024). Dati sulla percentuale del fabbisogno energetico nazionale che potrebbe essere coperta utilizzando il consumo energetico di Bitcoin (PoW). Disponibili su: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>.
- Dimitri, N. (2022). *Proof-of-stake in algorand*. Distributed Ledger Technologies: Research and Practice, 1(2), pp. 1-17.
- Eccles, R. G., Newquist, S. C., & Schatz, R. (2007). *Reputation and Its Risks*. Harvard Business Review, 85(2).
- Eom, C., Choi, S., Oh, G., & Jung, W. S. (2008). *Hurst exponent and prediction based on weak-form efficient market hypothesis of stock markets*. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 387(18), 4630-4636.
- Ethereum Foundation. (2022). *The Merge: Proof-of-Stake FAQ*. Disponibile su: <https://ethereum.org/en/upgrades/merge/>.
- Ethernodes (2024). Dati sulla distribuzione globale dei nodi Ethereum. Disponibili su: <https://www.ethernodes.org/countries>.
- European Banking Authority (EBA). (2014). *Opinion on 'virtual currencies'*. Disponibile su: <https://www.bancaditalia.it/compiti/sispaga-mercati/strumenti-pagamento/normativa/EBA-Op-2014-08-Opinion-on-Virtual-Currencies.pdf>.
- European Banking Authority (EBA). (2021). *Report on management and supervision of ESG risks for credit institutions and investment firms*. Disponibile su: https://www.eba.europa.eu/sites/default/files/document_library/Publications/Reports/2021/1015656/EBA%20Report%20on%20ESG%20risks%20management%20and%20supervision.pdf.
- European Central Bank. (2020). *Stablecoins – no coins, but are they stable?*. ECB Economic Bulletin, Issue 7/2020.
- European Central Bank. (2020). *Stablecoins in the euro area*. Disponibile su: <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/scpops/ecb.op247~fe3df92991.en.pdf>.
- European Central Bank. (2021). *Eurosystem launches digital euro project*. Disponibile su: <https://www.ecb.europa.eu/press/pr/date/2021/html/ecb.pr210714~d99198ea23.en.html>.

- European Commission. (2019). *The European Green Deal*. COM (2019) 640 final. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>.
- European Commission. (2020). *Digital Finance Package: A European Strategy for Digital Finance*. Disponibile su: https://ec.europa.eu/info/publications/200924-digital-finance-proposals_en.
- European Commission. (2020). *Impact Assessment accompanying the Proposal for MiCA*. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020SC0380>.
- European Commission. (2021). *Digital Finance Strategy for the EU*. Disponibile su: https://finance.ec.europa.eu/publications/digital-finance-package_en.
- European Parliament. (2014). *Directive 2014/65/EU on markets in financial instruments (MiFID II)*. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0065>.
- European Parliament. (2015). *Directive (EU) 2015/849 of the European Parliament and of the Council*. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L0849>.
- European Parliament. (2018). *Directive (EU) 2018/843*. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0843>.
- European Securities and Markets Authority (ESMA). (2019). *Advice on Initial Coin Offerings and Crypto-Assets*. Disponibile su: https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma50-157-1391_crypto_advice.pdf.
- European Securities and Markets Authority (ESMA). (2022). *Trends, Risks and Vulnerabilities Report, No. 2*. Disponibile su: https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma50-165-2229_trv_2-22.pdf.
- Fama, E. F. (1991). *Efficient Capital Markets: II*. *The Journal of Finance*, 46(5), pp. 1575–1617.
- Fama, E. F. (1998). *Market Efficiency, Long-Term Returns, and Behavioral Finance*. *Journal of Financial Economics*, 49(3), pp. 283–306.

- Fama, E.F. (1970). Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work. *The Journal of Finance*, 25(2), pp. 383–417.
- Félez-Viñas, E., Johnson, L., & Putniņš, T. J. (2022). *Insider Trading in Cryptocurrency Markets*. Disponibile su: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4184367.
- Ferrari, V. (2020). *The Regulation of Crypto-Assets in the EU - Investment and Payment Tokens under the Radar*. *Maastricht Journal of European and Comparative Law*, 27(3), pp. 325-342.
- Figueiredo, F., Gomes, M. I., & Neves, M. (2011). *Adaptive reduced bias estimation of financial log-returns*. *Risk & Extreme Values in Insurance and Finance*.
- Financial Action Task Force (FATF). (2021). *Updated Guidance for a Risk-Based Approach to Virtual Assets and Virtual Asset Service Providers*. Disponibile su: <https://www.fatf-gafi.org/publications/fatfrecommendations/documents/guidance-rba-virtual-assets-2021.html>.
- Financial Conduct Authority. (2021). *PS20/10: Prohibiting the sale to retail clients of investment products that reference cryptoassets*. Disponibile su: <https://www.fca.org.uk/publications/policy-statements/ps20-10-prohibiting-sale-retail-clients-investment-products-reference-cryptoassets>.
- Financial Times. (2021). *US overtakes China as biggest bitcoin mining hub after Beijing ban*. Disponibile su: <https://www.ft.com/content/50acdea5-cad1-4f39-8e6a-9be7ab78485d>.
- FinCEN. (2019). *Application of FinCEN's Regulations to Certain Business Models Involving Convertible Virtual Currencies*. Disponibile su: <https://www.fincen.gov/sites/default/files/2019-05/FinCEN%20Guidance%20CVC%20FINAL%20508.pdf>.
- Fisch, C. (2019). *Initial Coin Offerings (ICOs) to Finance New Ventures*. *Journal of Business Venturing*, 34(1), pp. 1-22.
- Fleming, J., Kirby, C., & Ost diek, B. (1998). *Information and volatility linkages in the stock, bond, and money markets*. *Journal of financial economics*, 49(1), pp. 111-137.

- Friede, G., Busch, T., & Bassen, A. (2015). ESG and financial performance: aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 5(4), pp. 210–233.
- Gao, Y., Kawai, S., & Nobuhara, H. (2019). *Scalable blockchain protocol based on proof of stake and sharding*. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 23(5), pp. 856-863.
- Gaži, P., Kiayias, A., & Zindros, D. (2019). *Proof-of-stake sidechains*. In 2019 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), pp. 139-156.
- Gencer, A.E., Basu, S., Eyal, I., Van Renesse, R., & Sirer, E.G. (2018). *Decentralization in Bitcoin and Ethereum Networks*. International Conference on Financial Cryptography and Data Security, pp. 439–457.
- Geweke, J., & Porter-Hudak, S. (1983). *The estimation and application of long memory time series models*. *Journal of time series analysis*, 4(4), pp. 221-238.
- Gilson, R. J., & Kraakman, R. H. (1984). *The mechanisms of market efficiency*. *Va. L. Rev.*, 70, 549.
- Giungato, P., Rana, R., Tarabella, A., & Tricase, C. (2017). *Current Trends in Sustainability of Bitcoins and Related Blockchain Technology*. *Sustainability*, 9(12), 2214.
- Givoly, D., & Lakonishok, J. (1979). *The information content of financial analysts' forecasts of earnings: Some evidence on semi-strong inefficiency*. *Journal of Accounting and Economics*, 1(3), pp. 165-185.
- Glaser, F. (2017). *Pervasive Decentralisation of Digital Infrastructures: A Framework for Blockchain Enabled System and Use Case Analysis*. Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1543-1552.
- Gómez-Águila, A., Trinidad-Segovia, J. E., & Sánchez-Granero, M. A. (2022). *Improvement in Hurst exponent estimation and its application to financial markets*. *Financial Innovation*, 8(1), 86.
- GreenCryptoResearch (2023). Dati sul consumo energetico annuo di Ethereum prima del Merge (in TWh). Disponibili su: <https://www.greencryptoresearch.com>.
- GreenCryptoResearch (2023). Dati sul consumo energetico annuo di Ethereum dopo il Merge (in TWh). Disponibili su: <https://www.greencryptoresearch.com>.

- Grobys, K., & Junttila, J. (2021). *Speculation and lottery-like demand in cryptocurrency markets*. Journal of International Financial Markets, Institutions and Money, 71, 101289.
- Gundaboina, L., Badotra, S., & Tanwar, S. (2022). *Reducing resource and energy consumption in cryptocurrency mining by using both proof-of-stake algorithm and renewable energy*. In 2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON), pp. 605-610.
- Guo, Y., & Liang, C. (2016). *Blockchain Application and Outlook in the Banking Industry*. Financial Innovation, 2(1), Articolo 24.
- Güth, W., Krahnert, J. P., & Rieck, C. (1997). *Financial markets with asymmetric information: A pilot study focusing on insider advantages*. Journal of Economic Psychology, 18(2-3), pp. 235-257.
- Healy, P. M., & Palepu, K. G. (2001). *Information Asymmetry, Corporate Disclosure, and the Capital Markets: A Review of the Empirical Disclosure Literature*. Journal of Accounting and Economics, 31(1-3), pp. 405-440.
- Hill, M. D. (1990). *What is scalability?*. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 18(4), pp. 18-21.
- Hjalmarsson, F., Hreidarsson, G. K., Hamdaqa, M., & Hjalmtýsson, G. (2018). *Blockchain-Based E-Voting System*. 2018 IEEE International Conference on Cloud Computing, pp. 983-986.
- HM Treasury. (2021). *Greening Finance: A Roadmap to Sustainable Investing*. Disponibile su: <https://www.gov.uk/government/publications/greening-finance-a-roadmap-to-sustainable-investing>.
- Ho, T. S., & Michaely, R. (1988). *Information quality and market efficiency*. Journal of Financial and Quantitative Analysis, 23(1), pp. 53-70.
- Hobijn, B., Franses, P. H., & Ooms, M. (2004). *Generalizations of the KPSS-test for stationarity*. Statistica Neerlandica, 58(4), pp. 483-502.
- IRS. (2014). *Notice 2014-21*. Disponibile su: <https://www.irs.gov/pub/irs-drop/n-14-21.pdf>.
- Jacobsen, R. (1988). *The persistence of abnormal returns*. Strategic management journal, 9(5), pp. 415-430.

- Jiménez-Serranía, V., Parra-Domínguez, J., De La Prieta, F., & Corchado, J. M. (2021). *Cryptocurrencies impact on financial markets: Some insights on its regulation and economic and accounting implications*. International Congress on Blockchain and Applications, pp. 292-299.
- Judmayer, A., Stifter, N., Krombholz, K., & Weippl, E. (2017). *History of cryptographic currencies*. In *Blocks and Chains*, pp. 15-18.
- Jumaili, M. L. F., & Karim, S. M. (2021). *Comparison of tow two cryptocurrencies: Bitcoin and Litecoin*. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1963, No. 1, p. 012143). IOP Publishing.
- Kang, H. J., Lee, S. G., & Park, S. Y. (2022). *Information efficiency in the cryptocurrency market: The efficient-market hypothesis*. *Journal of Computer Information Systems*, 62(3), pp. 622-631.
- Khan, F., & Mer, A. (2024). *Regulations and directives that are on the European Union's table and how this will affect the financial services industry and related industries*. In *Greening Our Economy for a Sustainable Future*, pp. 127-136.
- Kiayias, A., Russell, A., David, B., & Oliynykov, R. (2017). *Ouroboros: A Provably Secure Proof-of-Stake Blockchain Protocol*. In *Advances in Cryptology – CRYPTO 2017*, pp. 357–388.
- King, S., & Nadal, S. (2012). *PPCoin: Peer-to-Peer Crypto-Currency with Proof-of-Stake*. Disponibile su: <https://peercoin.net/assets/paper/peercoin-paper.pdf>.
- Kouhizadeh, M., & Sarkis, J. (2018). *Blockchain Practices, Potentials, and Perspectives in Greening Supply Chains*. *Sustainability*, 10(10), Articolo 3652.
- Kshetri, N. (2018). *Blockchain's Roles in Meeting Key Supply Chain Management Objectives*. *International Journal of Information Management*, 39, pp. 80–89.
- Kukacka, J., & Kristoufek, L. (2023). *Fundamental and speculative components of the cryptocurrency pricing dynamics*. *Financial Innovation*, 9(1), 61.
- Kushwaha, S. S., Joshi, S., Singh, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). *Ethereum smart contract analysis tools: A systematic review*. *Ieee Access*, 10, 57037-57062.
- Lal, A., & You, F. (2023). *Climate concerns and the future of nonfungible tokens: Leveraging environmental benefits of the Ethereum Merge*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(29).
- Larimer, D. (2013). *Transactions as proof-of-stake*.

- Lee, D., & Schmidt, P. (1996). *On the power of the KPSS test of stationarity against fractionally-integrated alternatives*. *Journal of econometrics*, 73(1), pp. 285-302.
- Lemma, V. (2022). *Quali Controlli Per Le Valute Virtuali?*. *Rivista Trimestrale di Diritto dell'Economia*.
- Lemma, V. (2022). *The Public Intervention on Cryptocurrencies between Innovation and Regulation*. *Open Review of Management, Banking and Finance*.
- Li, W., & Wang, S. S. (2010). *Daily institutional trades and stock price volatility in a retail investor dominated emerging market*. *Journal of Financial Markets*, 13(4), pp. 448-474.
- Li, Y., & Wang, Y. (2019). *Economic Impact of Cryptocurrency Mining on Local Energy Consumption and Prices*. *Energy Policy*, 129, pp. 435–444.
- Lopez-de-Silanes, F., McCahery, J. A., & Pudschedl, P. C. (2024). *Institutional investors and ESG preferences*. *Corporate Governance: An International Review*.
- Lopez, J. H. (1997). *The power of the ADF test*. *Economics Letters*, 57(1), pp. 5-10.
- Lundin, F., & Rahm, F. (2018). *Evaluating risk and reward for validators in a cryptocurrency Proof-of-Stake network*.
- Markus, B. e Palmer, J. (2013). *Dogecoin Core*. Disponibile su: <https://github.com/dogecoin/dogecoin>.
- Mellerud J. (2023). *Bitcoin Mining Around the World: Islanda*. Disponibile su: <https://hashrateindex.com/blog/bitcoin-mining-around-the-world-iceland/>.
- Moin, S., Dev, J., & Fazal-e-Hasan, S. M. (2020). *Stablecoins: Bridging the Network Gap between Fiat Currency and Cryptocurrency*. *International Journal of Electronic Business*, 15(4), pp. 371-386.
- Monetary Authority of Singapore. (2019). *Green Finance Action Plan*. Disponibile su: <https://www.mas.gov.sg/development/sustainable-finance>.
- Morales, R., Di Matteo, T., Gramatica, R., & Aste, T. (2012). *Dynamical generalized Hurst exponent as a tool to monitor unstable periods in financial time series*. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 391(11), 3180-3189.
- Mougayar, W. (2016). *The Business Blockchain: Promise, Practice, and Application of the Next Internet Technology*. Wiley, pp. 65-70, 145-150.
- Mushtaq, R. (2011). *Augmented dickey fuller test*.

- Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. Disponibile su: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. (2016). *Bitcoin and Cryptocurrency Technologies*. Princeton University.
- Neuder, M., Moroz, D. J., Rao, R., & Parkes, D. C. (2021). *Selfish behavior in the tezos proof-of-stake protocol*.
- Nguyen, C. T., Hoang, D. T., Nguyen, D. N., Niyato, D., Nguyen, H. T., & Dutkiewicz, E. (2019). *Proof-of-stake consensus mechanisms for future blockchain networks: fundamentals, applications and opportunities*. IEEE access, 7, 85727-85745.
- Nikkei Asia. (2021). *Japan warns over environmental impact of cryptocurrency mining*. Disponibile su: <https://asia.nikkei.com>.
- Noda, A. (2021). *On the evolution of cryptocurrency market efficiency*. Applied Economics Letters, 28(6), pp. 433-439.
- O'Dair, M., & Beaven, Z. (2019). *The Networked Musician: Blockchain and Decentralization as Opportunity for Independence*. The Creative Industries Journal, 12(1), pp. 12–24.
- O'Dair, M., & O'Dair, M. (2019). *Barriers to Adoption*. Distributed Creativity: How Blockchain Technology will Transform the Creative Economy, pp. 59-79.
- O'Dwyer, K.J., & Malone, D. (2014). *Bitcoin Mining and its Energy Footprint*. 25th IET Irish Signals and Systems Conference (ISSC 2014), pp. 280–285.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2020). *Developing Sustainable Finance Definitions and Taxonomies*. Disponibile su: https://www.oecd.org/en/publications/developing-sustainable-finance-definitions-and-taxonomies_134a2dbe-en.html.
- Ovezik, C., & Kiayias, A. (2022). *Decentralization Analysis of Pooling Behavior in Cardano Proof of Stake*. In Proceedings of the Third ACM International Conference on AI in Finance, pp. 18-26.
- Panna, M. (2017). *Note on simple and logarithmic return*. APSTRACT: applied studies in agribusiness and commerce, 11, pp. 127-136.
- Pellegrini, M. (2021). *Transparency and Circulation of Cryptocurrencies*. Open Review of Management, Banking and Finance.

- People's Bank of China. (2017). *Announcement on Preventing Financial Risks from Initial Coin Offerings*. Disponibile su: <http://www.pbc.gov.cn/goutongjiaoliu/113456/113469/3374222/index.html>.
- Peters, G. W., & Panayi, E. (2016). *Understanding Modern Banking Ledgers through Blockchain Technologies: Future of Transaction Processing and Smart Contracts on the Internet of Money*. *Banking Beyond Banks and Money*, pp. 239-278.
- Phelan, G., Ruchti, T., & Hempel, S. (2024). *Does Lock-up Lead to Stability? Implications for Runs in the Proof-of-Stake Protocol*.
- Qian, B., & Rasheed, K. (2004). *Hurst exponent and financial market predictability*. In IASTED conference on Financial Engineering and Applications. Cambridge, MA: Proceedings of the IASTED International Conference, pp. 203-209.
- Quigley, L., & Ramsey, D. (2008). *Statistical analysis of the log returns of financial assets*. *Financial mathematic*, University of Limerick, 32.
- Raschner, P., & Kosenkov, O. (2023). *Exporting Environmental-Friendly Digitalisation? Implications of EU's MiCA Regulation on the Global Governance of Crypto Systems*. Implications of EU's MiCA Regulation on the Global Governance of Crypto Systems (April 4, 2023).
- Regulation (EU) 2023/1114 of the European Parliament and of the Council on Markets in Crypto-Assets (MiCA). Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1114>.
- Ren, L. (2014). *Proof of stake velocity: Building the social currency of the digital age*. Self-published white paper.
- Reuters. (2021). *China's top regulators ban crypto trading and mining, sending bitcoin tumbling*. Disponibile su: <https://www.reuters.com/world/china/china-central-bank-vows-crackdown-cryptocurrency-trading-2021-09-24/>.
- Rizal Batubara, F., Ubacht, J., & Janssen, M. (2019). *Unraveling transparency and accountability in blockchain*. In Proceedings of the 20th annual international conference on digital government research, pp. 204-213.
- Saleh, F. (2021). *Blockchain without Waste: Proof-of-Stake*. *The Review of Financial Studies*, 34(3), pp. 1156-1190.
- Schär, F. (2021). *Decentralized Finance: On Blockchain- and Smart Contract-Based Financial Markets*. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 103(2), pp. 153-174.

- Seamans, R. C. (2013). *Threat of entry, asymmetric information, and pricing*. Strategic Management Journal, 34(4), pp. 426-444.
- SEC. (2017). *Report of Investigation Pursuant to Section 21(a) of the Securities Exchange Act of 1934: The DAO*. Disponible su: <https://www.sec.gov/litigation/investreport/34-81207.pdf>.
- SEC. (2019). *Framework for "Investment Contract" Analysis of Digital Assets*. Disponible su: <https://www.sec.gov/corpfin/framework-investment-contract-analysis-digital-assets>.
- SEC. (2021). *SEC Charges Decentralized Finance Lender and Top Executives for Unregistered Sales of Securities*. Disponible su: <https://www.sec.gov/news/press-release/2021-145>.
- SEC. (2022). *SEC Proposes Rules to Enhance and Standardize Climate-Related Disclosures for Investors*. Disponible su: <https://www.sec.gov/news/press-release/2022-46>.
- Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). *The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth*. Business & Information Systems Engineering, 62(6), pp. 599–608.
- Shah, A. (2022). *Proposal to Ban Proof-of-Work Mining*.
- Sklavos, N. (2010). *On the hardware implementation cost of crypto-processors architectures*. Information Security Journal: A Global Perspective, 19(2), pp. 53-60.
- State Council of the People's Republic of China. (2013). *Notice on Precautions Against the Risks of Bitcoin*. Disponible su: http://www.gov.cn/zwggk/2013-12/05/content_2549096.htm.
- State Council of the People's Republic of China. (2020). *China's Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contributions*. Disponible su: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/China's%20Achievements%2C%20New%20Goals%20and%20New%20Measures%20for%20Nationally%20Determined%20Contributions.pdf>.
- Stoll, C., Klaaßen, L., & Gällersdörfer, U. (2019). *The Carbon Footprint of Bitcoin*. Joule, 3(7), pp. 1647-1661.
- Swiss Financial Market Supervisory Authority FINMA. (2018). *Guidelines for enquiries regarding the regulatory framework for initial coin offerings (ICOs)*.

Disponibile su: <https://www.finma.ch/en/news/2018/02/20180216-mm-ico-wegleitung/>.

- Teng, H., Tian, W., Wang, H., & Yang, Z. (2022). *Applications of the Decentralized Finance (DeFi) on the Ethereum*. In 2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers, pp. 573-578.
- The Guardian. (2021). *Non-fungible tokens are revolutionising the art world – and art theft*. Disponibile su: <https://www.theguardian.com/technology/2021/mar/12/non-fungible-tokens-revolutionising-art-world-theft>.
- The White House. (2021). *Executive Order on Ensuring Responsible Development of Digital Assets*. Disponibile su: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/03/09/executive-order-on-ensuring-responsible-development-of-digital-assets/>.
- Titan, A. G. (2015). *The efficient market hypothesis: Review of specialized literature and empirical research*. *Procedia Economics and Finance*, 32, pp. 442-449.
- Tong, H. (2007). *Disclosure standards and market efficiency: Evidence from analysts' forecasts*. *Journal of International Economics*, 72(1), pp. 222-241.
- Truby, J. (2018). *Decarbonizing Bitcoin: Law and Policy Choices for Reducing the Energy Consumption of Blockchain Technologies and Digital Currencies*. *Energy Research & Social Science*, 44, pp. 399–410.
- U.S. Congress. (2021). *Crypto-Asset Environmental Transparency Act*. Disponibile su: <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/5210>.
- Underwood, S. (2016). *Blockchain Beyond Bitcoin*. *Communications of the ACM*, 59(11), pp. 15-17.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *Emissions Gap Report 2021*. Disponibile su: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>.
- Vashchuk, O., & Shuwar, R. (2018). *Pros and cons of consensus algorithm proof of stake*. Difference in the network safety in proof of work and proof of stake. *Electronics and Information Technologies*, 9(9), pp. 106-112.
- Voshmgir, S. (2020). *Token Economy: How Blockchains and Smart Contracts Revolutionize the Economy*. *BlockchainHub Berlin*, pp. 55-60.
- Witt, A., Kurths, J., & Pikovsky, A. (1998). *Testing stationarity in time series*. *Physical Review E*, 58(2), 1800.

- Woitschig, P., Uddin, G. S., Xie, T., & Härdle, W. K. (2023). *The energy consumption of the ethereum-ecosystem*.
- Yaga, D., Mell, P., Roby, N., & Scarfone, K. (2019). *Blockchain Technology Overview*. National Institute of Standards and Technology (NIST), pp. 1-10.
- Ye, C., Li, G., Cai, H., Gu, Y., & Fukuda, A. (2018). *Analysis of security in blockchain: Case study in 51%-attack detecting*. In 2018 5th International conference on dependable systems and their applications (DSA), pp. 15-24.
- Yen, G., & Lee, C. F. (2008). *Efficient market hypothesis (EMH): past, present and future*. Review of Pacific Basin Financial Markets and Policies, 11(02), pp. 305-329.
- Yu, H., Sun, Y., Liu, Y., & Zhang, L. (2024). *Bitcoin Gold, Litecoin Silver: An Introduction to Cryptocurrency Valuation and Trading Strategy*. In Future of Information and Communication Conference pp. 573-586.
- Zetsche, D. A., Buckley, R. P., Arner, D. W., & Föhr, L. (2020). *The Markets in Crypto-Assets Regulation (MiCA) and the EU Digital Finance Strategy*. Capital Markets Law Journal, 16(2), pp. 203-225.
- Zhang, R., & Chan, W. K. V. (2020). *Evaluation of energy consumption in blockchains with proof of work and proof of stake*. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1584, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017). *An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends*. 2017 IEEE International Congress on Big Data, pp. 557-564.
- Zhou, W., Zhong, G. Y., & Li, J. C. (2022). *Stability of financial market driven by information delay and liquidity in delay agent-based model*. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications.
- Zuo, X. (2019). *Several important unit root tests*. In 2019 IEEE 2nd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP), pp. 10-14.