

Trazabilidad de Hidrógeno Verde utilizando Blockchain

Traceability of Green Hydrogen using Blockchain

Carlos Ramiro Rodríguez¹, Jorge Díaz², Manuel Humberto Tiglio³, Franco Cerino⁴, Luciano Mori⁵,
Ernesto Esteban Coutsiers⁶, Edison Montoya⁷.

Recibido: 03/09/2023 y Aceptado: /08/09/2023

ENERLAC. Volumen VII. Número 2. Diciembre, 2023

ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522(digital)



7

1.- Universidad Nacional de Córdoba. Argentina Profesor Adjunto Dedicación Exclusiva
ramiro.rodriguez@unc.edu.ar

<https://orcid.org/0000-0003-4512-6398>

2.- ISISTAN Research Institute (CONICET & UNICEN) Profesor Titular, Investigador Principal CONICET
andres.diazpace@isistan.unicen.edu.ar

0000-0002-1765-7872

3.- Universidad Nacional de Córdoba. Argentina Investigador Principal, CONICET
mtiglio@unc.edu.ar

0000-0003-0451-9611

4.- Universidad Nacional de Córdoba. Argentina Becario Doctoral, CONICET

francocerino@gmail.com

0000-0003-2022-0839

5.- lucianomori.cloud DevOps

0009-0001-8965-4224

6.- Calden Consultoría SRL. Universidad Nacional de Salta (UNSa). Argentina Socio Fundador. Doctorando en la UNSa

ecoutsiers@caldenconsultoria.com

0009-0008-6276-6120

7.- BCFort CEO

edison@bcfort.com

0000-0002-9982-8777



Resumen

Este trabajo presenta una discusión de la importancia de trazabilidad de hidrógeno verde utilizando blockchain, y propone un modelo prototípico de un contrato inteligente que se desplegó en las redes Polygon y Algorand. En este desarrollo, se exploran aspectos de certificación y tokenización, que abren interesantes líneas de trabajo y potenciales aplicaciones tecnológicas en base a hidrógeno verde

PALABRAS CLAVE: Hidrógeno verde, trazabilidad, blockchain, tokenización, Ethereum, certificación.

Abstract

This work presents a discussion of the importance of traceability of green hydrogen using blockchain, along with a prototypical model of a smart contract deployed in the Polygon and Algorand networks. In this development, certification and tokenization aspects are explored, which open up interesting lines of future work and potential technology applications around green hydrogen.

KEYWORDS: Green hydrogen, traceability, blockchain, tokenization, Ethereum, certification.

1. INTRODUCCIÓN

El hidrógeno (H₂) tiene una larga y productiva historia en el ámbito de la industria en general y la química en particular. Uno de los primeros usos industriales del H₂ fue en el proceso Haber-Bosch, que se desarrolló a principios del siglo XX y todavía se usa para producir amoníaco para fertilizantes y otras aplicaciones químicas (Kandemir et al., 2013). Sin embargo, el planteo de su posible utilización como vector energético⁷, con aplicaciones en distintos sectores de demanda como transporte, minería, industria manufacturera (producción de aceros, cementos, vidrios, etc.), residencial y pesca, sólo data de dos décadas (Berry & Aceves, 2006; Rifkin, 2002). La penetración en la oferta energética comenzó a tomar tracción, motivada por la inestabilidad del precio internacional de los hidrocarburos, en particular de los derivados del petróleo (NU. CEPAL. Subsede de México, 2009), y por la necesidad desde un punto de vista medioambiental de hallar alternativas sostenibles, entre otras. Recientemente, el acelerado despliegue de las energías renovables ha puesto en marcha una transformación energética global con implicaciones geopolíticas de gran alcance, pronosticando el advenimiento de una nueva era energética que podría remodelar las relaciones entre los estados y las comunidades y generar un nuevo orden de poder, seguridad e independencia energética. Con la urgencia de avanzar hacia sistemas energéticos resilientes, alineados con los imperativos climáticos y de desarrollo establecidos en el Acuerdo de París y la Agenda 2030, el H₂ se identificó mediante un enfoque sin precedentes, dado su rol central en la descarbonización de sectores difíciles de abatir, incluyendo la necesidad de alcanzar la carbono-neutralidad hacia el año 2050 (IRENA, 2022). Sumado a estas fuerzas impulsoras, el conflicto bélico entre los países balcánicos intensifica la búsqueda de alternativas energéticas debido a la presión económica que ejerce el alza en el

costo de los combustibles fósiles y otras materias primas principales (Padinger, 2022).

Como el H₂ se puede producir mediante una variedad de procesos y fuentes de energía, incluida la producción a partir del carbón, gas natural, electrólisis del agua, etc.; no todo camino de obtención del H₂ cumple la exigencia de reducir las emisiones de carbono, (White et al., 2021), (Newborough & Cooley, 2021), situación que condujo al adagio «el H₂ es tan limpio como la fuente que lo produce».

Se espera que la creciente demanda de H₂ limpio y bajo en carbono promueva el comercio internacional entre importadores y exportadores de H₂ (Maggio et al., 2019). Para esto, es crucial aclarar los indicadores de calidad relacionados al origen del H₂, proveyendo una definición precisa del “tipo de H₂” que se comercializa, mediante la implementación de estándares internacionales. La contribución positiva del H₂ al clima y al desarrollo económico se garantizará únicamente con reglas y normas transparentes y creíbles y un sistema coherente que trascienda las fronteras nacionales, regionales y sectoriales. Mediante la cooperación internacional, el mercado emergente del H₂ tiene el potencial de ser tanto descentralizado como inclusivo, con oportunidades para países desarrollados y en desarrollo por igual. En el trabajo de (Liu et al., 2022) se analiza la principal iniciativa de estándares de H₂ en el mundo, junto a los factores claves del estándar global, y se discute cómo establecer estándares cuantitativos y un sistema de evaluación de bajas emisiones de carbono, H₂ limpio e H₂ renovable utilizando el método en China.

El objetivo de este artículo es presentar una discusión de la importancia de la trazabilidad de hidrógeno verde (H₂V), aprovechando para ello la

7.- Un modelo económico energético alternativo al uso de combustibles fósiles en el cual el hidrógeno es considerado como un vector energético más (capaz de almacenar energía de tal manera que esta pueda ser liberada en otro lugar o momento posterior de forma controlada), alternativo a los combustibles fósiles y acoplador de sectores (eléctrico, gas), usado en los cuatro ámbitos fundamentales: energía, transporte, residencial e industria.

tecnología de blockchain, y generar un modelo de contrato inteligente para este propósito. Con esta finalidad se desarrolló una implementación prototipo de un contrato inteligente con tres roles de una cadena simplificada de H2V. Para esto, se modelaron ciertos activos digitales

y sus operaciones bajo la forma de TRUs. Adicionalmente, se exploró un esquema de tokenización. El contrato se desplegó en Polygon y Algorand, y se realizaron estimaciones y pagos de costos de «gas» para dichos sistemas.

2. DESARROLLO

2.1 Hidrógeno

En esta sección se describe la clasificación ambiental del H2, que da lugar al espectro de colores que distingue su procedencia, así como

la cadena de valor del H2 limpio y la necesidad de obtener certificados y garantías de origen.

2.1.1 Clasificación ambiental del hidrógeno:

Para facilitar la descripción, la industria de la energía limpia a menudo clasifica el H2 por colores, como se muestra en la Figura 1. Si bien hay una gran variedad de colores, en este trabajo se describen solamente los términos H2 gris (H2G), H2 azul (H2A), H2 amarillo (H2Am), H2 rosa (H2R) e H2 verde (H2V) (Noussan et al., 2020), en función de su impacto ambiental y procedencia⁸ (Koroneos et al., 2004). Esta clasificación es simple y permite la fácil identificación del tipo de H2. Sin embargo, con este método no se distinguen clara y cuantitativamente los tipos de procesos de producción de H2. Hay que señalar que todos los procesos tienen emisiones asociadas, ya sea en la fase de construcción, transporte, operación o desmantelamiento de las instalaciones donde se obtiene. De aquí la importancia de cuantificar el impacto asociado mediante la metodología de análisis de Ciclo de Vida (ACV) (CertifHy, 2017).

Cuando se compara la procedencia del H2 (gris, azul o verde), se utiliza la aproximación cradle-to-gate (de la cuna a la puerta), que tiene en cuenta todos los impactos del proceso de generación hasta que se entrega al cliente, pero no la aplicación final, ya que se trata exactamente del

mismo producto con las mismas propiedades (Ramón et al., n.d.).

De este modo, el H2G es el generado con recursos fósiles (típicamente reformado de gas natural) con emisiones superiores a 10-11 kgCO₂eq/kgH₂ generado⁹.

El H2A es generado de fuentes no renovables con emisiones menores a 4,37 kgCO₂eq/kgH₂ (36,4 CO₂eq/MJH₂), ya que gran parte de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) se secuestran en el proceso. En el trabajo de (Howarth & Jacobson, 2021) se discute que lejos de ser bajas en carbono, las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) de la producción de H2A son bastante altas, particularmente debido a la liberación de metano fugitivo. Sin embargo, otros autores (Pettersen et al., 2022) analizan la intensidad de GEI del H2A, utilizando datos recientes y aportes de proveedores de tecnología de reforma de gas de última generación. Los datos muestran que las cadenas de valor adecuadamente diseñadas y operadas para el suministro de H2A, con emisiones mínimas del suministro de gas natural y alta captura de carbono en la producción de H2,

11

8.- Geólogos, químicos y expertos en minería están comenzando a entender y descubrir enormes bolsas de hidrógeno confinadas bajo tierra, que buena parte de la comunidad científica desconocía. Se trata del hidrógeno natural o dorado. Sin embargo, dado que su explotación aún no está reglamentada, no se considerará en este trabajo.

9.- El dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) es una medida universal utilizada para indicar en términos de CO₂, el equivalente de cada uno de los GEI con respecto a su potencial de calentamiento global.

darán una reducción importante en las emisiones de GEI en el uso final de la energía. La huella de GEI para los usuarios finales basada en el H2A será normalmente entre un 80% y un 90% menor que para el suministro y uso directos de gas natural.

El H2V es generado a partir de fuentes renovables con emisiones menores a 4,37 kgCO₂eq/kgH₂ (36,4 CO₂eq/MJH₂). El concepto de H2V fue creado específicamente para la producción H₂ a partir de electrólisis del agua y mediante electricidad renovable, en clara contraposición al proceso actual de producción a partir de recursos fósiles y con alto impacto ambiental. Se destaca

que durante el proceso de electrólisis del agua no se emite directamente CO₂, ni fósil ni neutro. Como en todas las tecnologías, hay que evaluar las emisiones indirectas en fases de construcción, operación y desmantelamiento de los distintos equipos.

El H₂ electrolítico también puede ser: H₂Am cuando la electricidad utilizada para la electrólisis procede de fuentes mixtas, desde energías renovables hasta combustibles fósiles, o también H₂R cuando la electricidad proviene de energía nuclear. Éste es un tipo de hidrógeno bastante sostenible (Good New Energy, n.d.).

Figura 1. Colores del hidrógeno



Fuente: Sitio web del hidrógeno. <https://energia.gob.es/hidrogeno/Paginas/Index.aspx>

En resumen, una vez definido mediante un ACV, si el H₂ es azul o verde, se procede a clasificarlo en función de la fuente de origen. Si ésta es renovable (por ejemplo, electricidad eólica, biocombustibles, biomasa o solar), se clasifica como verde. Si, por el contrario, la fuente es fósil (por ejemplo, gas natural, carbón, naftas, o electricidad no renovable), éste se clasifica como azul. Ambos son considerados como H₂'s bajos en emisiones, siempre que se demuestre que cumplen los objetivos de emisión. Para conseguir tales objetivos, en el caso del H₂ azul, es necesario el secuestro del CO₂ emitido como subproducto durante un periodo de tiempo significativo. Estas emisiones se clasifican en estándares oficiales en el documento «Estándar y evaluación de H₂ bajo en carbono, H₂ limpio e H₂ renovable» (Liu et al., 2022). No obstante, dado que se utilizan diferentes definiciones de energía renovable (ER) en todo el mundo, esto conduce a

diferentes definiciones de H₂V¹⁰(Sailer et al., 2022), (Velazquez Abad & Dodds, 2020).

De este modo, el H₂V tiene una definición amplia y se han hecho llamados para su estandarización a nivel internacional. En un trabajo reciente (Lubbe et al., 2023) se discute el desarrollo de criterios de sostenibilidad para el H₂V. Estos criterios se basan en la adicionalidad, el uso sostenible del espacio, el desarrollo económico sostenible en los países productores, la sostenibilidad del suministro de agua y las emisiones de GEI. La adicionalidad en el desarrollo sostenible del H₂ se refiere al concepto de que los proyectos o iniciativas relacionados con su producción, uso o implementación deben generar beneficios ambientales o sociales adicionales a los que ocurrirían en ausencia de dichos proyectos. Esta adicionalidad de la

10.- Se hace referencia a esta variabilidad de definiciones porque, por ejemplo, en Brasil el hidrógeno producido a partir de la conversión de Biometano (gas que se obtiene sintéticamente a partir del gas de síntesis o syngas) también se considera de origen renovable y por lo tanto verde.

electricidad podría asegurarse durante un año, mediante la implantación de un sistema basado en «garantías de origen renovables», lo que a su vez también facilitaría la operación de electrolizadores a su tasa de utilización óptima (Pototschnig, 2021). Este requisito es importante para garantizar que la producción de H2V sirva directamente al

objetivo de descarbonización, en lugar de solo agregar ineficiencias al sistema de ER, lo que indirectamente conduce a un aumento de los combustibles fósiles en la combinación energética. Sin embargo, en la práctica es difícil definir y medir la adicionalidad dentro de un sistema energético integrado (Jensterle et al., 2019).

2.1.2 Cadena de valor del H2V:

La cadena de valor se refiere al conjunto de etapas que comprenden la producción, distribución y uso del H2 obtenido a partir de fuentes renovables de energía, como se muestra en la Figura 2. Las principales etapas de la cadena de valor del H2V (Masip Macía et al., 2021) incluyen:

- **Generación de ER:** comprende las fuentes de energía limpia que se utilizan para producir electricidad.
- **Electrólisis:** utiliza la electricidad producida para realizar la electrólisis del agua, obteniéndose H2 puro y oxígeno puro, que se capturan y almacenan.
- **Compresión y almacenamiento:** el H2 se comprime y almacena en tanques especiales, que permiten su transporte y distribución.
- **Transporte:** el H2 se puede transportar

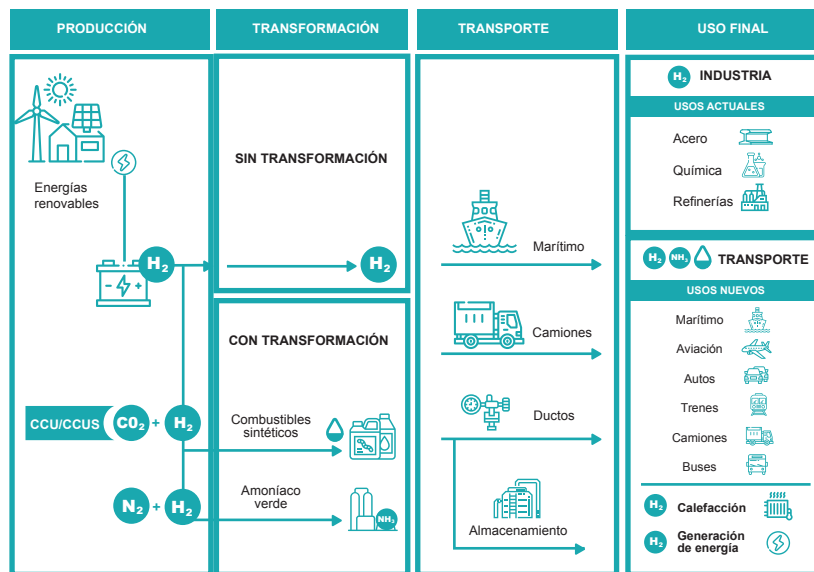
a través de tuberías, camiones cisterna, o barcos, entre otros medios.

- **Uso:** se puede utilizar como combustible para alimentar celdas de combustible (FC), que generan electricidad para alimentar motores eléctricos. También puede utilizarse como materia prima en la producción de diversos productos químicos y materiales (amoníaco, metanol, metano, etc.).
- **Reciclado:** el agua obtenida como subproducto se puede reciclar para volver a la primera etapa del proceso, generando así un ciclo cerrado y sostenible.

En resumen, la cadena de valor del H2V incluye la generación de energía renovable, la electrólisis del agua para producir H2, el almacenamiento y transporte, su uso como combustible o materia prima, y el reciclaje del agua como subproducto.

13

Figura 2. Cadena de Valor del Hidrógeno verde



Basado en el documento IRENA (2020), Green Hydrogen: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Los combustibles sintéticos se refieren a una gama de combustibles a base de H2V producidos mediante procesos químicos con una fuente de carbono (CO y CO2 capturados de flujos de

emisiones, fuentes biogénicas o directamente del aire). Incluyen metanol, combustibles para aviones, metano y otros hidrocarburos.

2.1.3 Certificados verdes y Garantías de origen.

Con el objetivo de reducir la huella de carbono, una organización puede recurrir a tres métodos para operar con un porcentaje de ER (Carbon Neutral +, 2022):

- a) Instalar sistemas de ER en su infraestructura.
- b) Adquirir PPAs (Purchase Power Agreements): son contratos entre dos partes, una que genera la electricidad (el vendedor) y otra interesada en comprar la electricidad (el comprador).
- c) Adquirir Certificados de ER (REC: Renewable Energy Certificates): son instrumentos de mercado que determinan los derechos de propiedad de atributos ambientales y sociales de la generación de 1 [MWh] de energía eléctrica renovable.

14

Los RECs no representan la venta de energía eléctrica física, sino los beneficios sociales y ambientales de la ER para que una organización pueda reducir sus emisiones provenientes de energía eléctrica, y promover el crecimiento de la industria de generación de ER.

Así, la organización puede probar que:

- La electricidad consumida proviene de fuentes renovables.
- Está reduciendo sus emisiones de GEI relacionadas con su consumo eléctrico.
- Está contribuyendo a potenciar la industria de ER.

Los electrones inyectados en la red eléctrica son indistinguibles de la fuente; no obstante, aquellos producidos en una central termoeléctrica emiten GEI, al contrario de los producidos en una planta de ER. Esa «no emisión» de GEI es lo que otorga a este tipo de energía atributos ambientales y sociales. Esos atributos de 1 [MWh] se engloban dentro del término Certificado de Energía Renovable.

La International REC Standard (I-RECS) es la entidad que facilita la implementación de un sistema de seguimiento reconocido internacionalmente para la asignación de los atributos ambientales de la

energía. La emisión local de REC que cumple con el estándar I-REC es administrada por una entidad local avalada por las autoridades gubernamentales y grupos de interés. En Argentina, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) es la asociación que controla y verifica a las plantas de ER que deciden vender la energía física, por un lado, y la renovabilidad de la energía –el REC– por otro. Actualmente tiene registradas plantas de generación renovable que comercializan certificados de atributos de renovabilidad.

Existe un mercado internacional de REC con designaciones particulares:

- **Europa:** se comercializan los Garantías of Origin (GOs). La norma europea EN16235:2013+A1:2015 define las GOs como certificados emitidos bajo un esquema nacional con el propósito de divulgar y respaldar el etiquetado (BSI, 2015). Los GOs son mecanismos de trazabilidad, mientras que los certificados verdes son documentos que se utilizan como prueba de elegibilidad para los esquemas de apoyo (Sailer et al., 2022; Velazquez Abad & Dodds, 2020).

- **América del Norte:** los certificados son llamados RECs o Green-e.

- **Países asiáticos, africanos, del Medio Oriente y de América Latina** (Argentina, Chile, Colombia, México, Brasil): se comercializan principalmente I-RECs (I-REC Standard - The International REC Standard Foundation, n.d.)

- **Otros países** como Japón, Taiwán y Australia tienen sus propios programas.

Los REC pueden usarse para varios fines. Algunos de ellos incluyen: buscar que el distribuidor de energía indique el porcentaje de su energía que proviene de fuentes renovables, lograr beneficios impositivos o adecuarse a programas voluntarios de reducción de emisiones de GEI. A la hora de analizar cómo pueden establecerse los contratos entre partes de H2V, conviene observar el análogo convencional del gas natural (GN).

2.1.4 Características de los contratos de gas natural.

Los contratos de GN se han convertido en una herramienta clave en la industria energética para asegurar el suministro a largo plazo de esta fuente de energía. Poseen características similares a contratos de otra naturaleza, como por ejemplo cláusulas de fuerza mayor. Sin embargo, existen cláusulas propias que definen claramente la transacción del activo energético. Algunas de las cláusulas típicas (Laub Benavides, 2011), (de Almeida Matos Moraes, 2007) de los contratos de GN son:

2.1.4.1 Cláusula «Take or Pay».

Es una disposición común en los contratos de GN que establece que el comprador debe tomar una cantidad mínima de GN o pagar una multa por no hacerlo. Esto significa que el comprador se compromete a comprar una cantidad mínima de GN, independientemente de si la necesita o no. Si no lo hace, debe pagar una multa por no tomar la cantidad mínima acordada, que suele equivaler a completar el pago por la cantidad acordada. Esta cláusula protege al vendedor, ya que garantiza que el GN producido será comprado, y al comprador, ya que asegura el suministro continuo de gas natural.

2.1.4.2 Cláusula «Carry Forward».

Es otra disposición común en los contratos de GN que permite a las partes reprogramar el suministro de GN en caso de que se produzca un exceso o una deficiencia en el suministro. Si se produce un exceso, el comprador puede solicitar que el exceso se “lleve adelante” y se entregue en un período posterior. Si hay una deficiencia en el suministro, el comprador puede solicitar que se lleve adelante una cantidad igual de GN en un período posterior. Esta cláusula ayuda a garantizar un suministro continuo de GN y a mitigar los riesgos para ambas partes en caso de fluctuaciones en la producción o la demanda. Esta cláusula relaja la cláusula «Take or Pay» y permite en algunos casos viabilizar contrataciones de mayores cantidades; en general favorece al comprador.

2.1.4.3 Cláusula «Price Reopener».

Es una disposición que permite a las partes renegociar el precio del GN en ciertas circunstancias, como cambios significativos en el mercado o en el costo de producción. Esta cláusula se incluye a menudo en contratos de GN de larga duración para permitir a las partes ajustar el precio del GN para que siga siendo competitivo y justo a lo largo del tiempo.

2.1.4.4 Cláusula de «Entrega en Punto de Entrada».

Se refiere al lugar donde se entrega el GN, lo que incluye la especificación del punto de entrega, las especificaciones de calidad del gas y las condiciones de presión y temperatura en el punto de entrega. Esta cláusula es importante para garantizar que el GN entregado cumpla con los estándares requeridos.

2.1.4.5 Cláusula de «Garantía de Capacidad».

Establece que el vendedor garantiza la capacidad del gasoducto para transportar el GN y entregarlo al comprador. Esta cláusula es importante para asegurar que el GN se entregue de manera efectiva y que no se produzcan demoras en la entrega debido a problemas de capacidad en el gasoducto.

En resumen, la elaboración de contratos de GN tiene sus especificidades. A medida que la industria energética evolucione hacia el H2V, es importante considerar cómo estas cláusulas se pueden aplicar y ajustar para los contratos de este nuevo activo energético.

2.2 Blockchain

En esta sección se introduce la tecnología blockchain y diferentes protocolos que se utilizan en este trabajo, como Ethereum, Polygon y

Algorand, así como nociones de trazabilidad y tokenización que son relevantes para la aplicación realizada.

2.2.1 Fundamentos de blockchain.

La tecnología blockchain puede verse como una base de datos que se actualiza a través de un protocolo de consenso entre pares o nodos de una red, donde cada uno posee una copia de la base de datos. Esta base está caracterizada por propiedades de inmutabilidad, transparencia, neutralidad, descentralización y disponibilidad, que marcan una diferencia respecto a las bases de datos tradicionales y con un control centralizado. Por otro lado, existen dos tipos de redes de blockchain para su clasificación: i) blockchain pública, donde cualquier entidad puede participar del consenso, lectura y escritura de la base de datos, y ii) blockchain privada, donde existen restricciones en estas acciones. Una de las implicancias principales de los protocolos blockchain es que no es necesario un tercero o intermediario de «confianza» para que funcionen, como lo puede ser un banco al momento de realizar transacciones de dinero entre dos clientes. En este trabajo nos enfocamos en redes públicas.

La base de datos de una blockchain está dada por una lista ordenada de bloques que contienen transacciones. Cada bloque está identificado con un «hash», que puede considerarse como un identificador o «huella digital» del bloque. El hash permite mapear un conjunto de datos de entrada de tamaño arbitrario a un dato único de tamaño fijo. Además, cada bloque contiene el hash del bloque predecesor o padre, el cual es utilizado para obtener el hash del nuevo bloque. La secuencia de hashes vinculando a cada bloque con su predecesor crea una cadena de bloques, llegando hasta el denominado «bloque génesis», el primero de la cadena. Esto implica que si algún bloque se modifica, cambia su hash y luego el de todos los bloques subsiguientes, lo cual es fácilmente verificable por la red de pares. También se utilizan reglas de consenso que especifican qué es una transacción válida dentro de la cadena de bloques y un algoritmo de consenso que descentraliza el control de la blockchain. Cada bloque aceptado

por la red se agrega a la base de datos de cada nodo.

En blockchain, una transacción se caracteriza por realizar cambios a un estado global que contiene todos los estados de las cuentas. Existe el concepto de cuentas, que están identificadas públicamente por una dirección. Cada transacción puede tener un costo asociado («fee») para ser asentada en la blockchain, con la finalidad de incentivar a nodos para que validen bloques de transacciones y también para evitar una utilización indiscriminada de la red. En ese caso, para poder proponer una transacción desde una cuenta, ésta debe tener un balance mayor o igual al costo de la misma, y en caso de ser aceptada por la red, se reduce su balance.

Cuando la blockchain está desplegada en una red pública, se utiliza un sistema de incentivos para mantenerla segura. Una idea muy utilizada es que, por cada bloque con transacciones válidas, se incentive al nodo que lo propuso, aumentando su balance. La finalidad de un mecanismo de incentivos es que a un actor le convenga aportar a la red de forma honesta para obtener una ganancia, en lugar de querer perjudicar a otros usuarios por beneficio propio. Además, al sumarse nuevos nodos que aportan a la red, ésta se vuelve más descentralizada y segura.

A continuación, se describen brevemente tres blockchain representativas de la actualidad, que permiten desplegar contratos inteligentes para trazabilidad.

2.2.2 Ethereum.

Ethereum es un protocolo específico de blockchain que tiene la finalidad de crear aplicaciones descentralizadas, transparentes y altamente disponibles. Este protocolo se puede considerar como una máquina de estados determinista, que consiste en un estado del que solamente puede existir una instancia única globalmente accesible (denominada «world state») y una máquina virtual que aplica cambios al mismo a través de transacciones, bajo la tecnología blockchain. Esta máquina virtual toma el nombre de Ethereum Virtual Machine (EVM). Las aplicaciones descentralizadas se especifican a través de un lenguaje de programación, por ejemplo, Solidity que permite escribir contratos inteligentes (Wood, 2014). Un contrato inteligente puede verse como un objeto autónomo que define una «caja» criptográfica, y solo se puede interactuar con estas cajas si ciertas condiciones se cumplen y al definir las se pueden especificar reglas propias para realizar operaciones.

Otro elemento es la noción de cuenta. Una cuenta tiene un balance intrínseco, y está identificada por una dirección única. En Ethereum se pueden distinguir dos tipos de cuentas:

- Controladas por una entidad externa: no tienen asociado un código para la EVM. A

través de este tipo de cuenta, una persona o entidad puede interactuar con la blockchain a través de transacciones. Tiene asociada una llave privada (similar a una contraseña) que sirve para probar la propiedad de la cuenta.

- Objetos autónomos: tienen asociado un código para la EVM que constituye el contrato inteligente. Pueden interactuar con otros objetos autónomos a través de mensajes (Ethereum Whitepaper | Ethereum. Org, n.d.). Además, una cuenta controlada por una entidad externa puede interactuar con el código a través de transacciones.

- Cada transacción, para ser ejecutada en la blockchain, tiene un costo computacional asociado. En Ethereum este costo se mide en una unidad denominada Gas y cada operación tiene un costo fijo asociado. Por ejemplo, enviar una transacción tiene un costo de 21,000 Gas, y la suma de dos números tiene un costo de 3 Gas. Esta unidad es un concepto esencial ya que el fee de una transacción depende de la cantidad de Gas necesaria para ejecutarla. El fee se paga en la divisa nativa de la red, denominada Ether (ETH) y está dado por:

17

$$\text{fee por unidad de Gas} \cdot \text{Gas total de transacción} = \text{fee}, \quad (1)$$

donde

$$\text{fee por unidad de Gas} = \text{Base Fee} + \text{Priority Fee}. \quad (2)$$

Base Fee se ajusta automáticamente dependiendo de la congestión de la red y Priority Fee es establecida por el usuario; es decir, es una comisión entregada al validador (EIP-1559: Fee Market Change for ETH 1.0 Chain, n.d.). Ethereum utiliza un mecanismo de consenso entre nodos denominado Proof of Stake (PoS). Un nodo, para participar como validador, necesita depositar al menos 32 ETH, donde puede proponer y chequear la validez de nuevos bloques y en caso de actuar de forma eficiente y honesta recibirá ETH como recompensa. La propuesta de un bloque se origina en un nodo validador elegido aleatoriamente; y se elige otro grupo de validadores, también aleatoriamente, para avalar que el bloque

en cuestión es válido. Si un validador no participa como designado no obtendrá ganancias, y si actúa de forma deshonesto el colateral depositado puede ser destruido. PoS es una metodología energéticamente más eficiente que el método Proof of Work (PoW), que es el algoritmo de consenso utilizado por Bitcoin y anteriormente por el mismo Ethereum, en el que se necesita un elevado costo computacional (y por ende energético) para validar los bloques mediante minado. Por esta razón, Ethereum suele caracterizarse hoy como una blockchain verde (Ethereum Energy Consumption | ethereum.org. (n.d.)).

2.2.3 Polygon.

Polygon (Polygon Wiki, n.d.) (Polygon MATIC Whitepapers - Whitepaper.io, n.d.) es una blockchain que funciona a partir de un consenso del tipo PoS, tiene su propia criptomoneda denominada MATIC, es compatible con la EVM, y también permite desplegar contratos escritos en Solidity. Se origina como una solución a problemas de escalabilidad que tiene la red de Ethereum, logrando transacciones de forma más rápida (pudiendo llegar a 10,000 transacciones por segundo, comparado a 30 por segundo que soporta Ethereum) y económica. Es una solución de tipo sidechain (Back et al., 2014), ya que es una

blockchain alternativa a una blockchain padre (en este caso, ésta es Ethereum), que funciona a la par de ella. Además, estas dos blockchains pueden interactuar entre sí a través de contratos inteligentes, permitiendo la transferencia de activos entre ellas a través de una solución denominada bridge (Introduction to Blockchain Bridges | Ethereum.Org, n.d.). Un punto desafiante para Polygon, al mejorar la escalabilidad de las transacciones, son aquellos relacionados con seguridad, en comparación con dichos aspectos en Ethereum. Esta situación se conoce en la comunidad como el trilema de blockchain (Hafid et al., 2020).

2.2.4 Algorand.

Algorand (Chen & Micali, 2017) es una blockchain que funciona a través de su propia máquina virtual, denominada Algorand Virtual Machine (AVM), tiene su propio lenguaje de código denominado TEAL y su propia criptomoneda denominada ALGO. Se caracteriza por su bajo costo en las transacciones, por poder proveer un alto valor de 6,000 transacciones por segundo, y por abordar el trilema de blockchain mediante una blockchain altamente segura, escalable y descentralizada, a través del algoritmo de consenso Pure Proof of Stake (PPoS). Algorand también cumple con ser

una blockchain carbono-negativa (Sustainable Blockchain: Estimating the Carbon Footprint of Algorand's Pure Proof-of-Stake | Algorand, n.d.). Su propia máquina virtual (AVM) no es compatible con la EVM. Sin embargo, existe un nuevo protocolo para Algorand que permite desplegar contratos especificados en Solidity, dado por la Fundación Milkomeda (Milkomeda | Algorand Bridge, n.d.), permitiendo al ecosistema de desarrolladores de Solidity poder realizar despliegues en Algorand con mayor facilidad (y manteniendo un único lenguaje).

2.2.5 Trazabilidad de cadenas de suministro con blockchain.

La representación de activos mediante documentos equivalentes que puedan dar fe de un activo y de las operaciones (o cambios de estado) realizadas sobre el mismo, se puede implementar mediante la emisión de certificados o títulos que contengan características de seguridad para su portador (por ejemplo, el tipo de papel, la tinta, sellos especiales, marca de agua y una entidad emisora con buena reputación que los emita, entre otros). Con el advenimiento de las tecnologías informáticas, es posible contar con una representación digital del activo del que se desea dar fe, y registrar su historial en una base de datos. No obstante, uno de los desafíos de este enfoque digital es que se sigue dependiendo de una entidad central que actúe como intermediario entre las partes. Este escenario es entonces atractivo para una implementación basada en blockchain, a fin de conferir al proceso

de trazabilidad las propiedades mencionadas en las secciones anteriores, y particularmente descentralización e inmutabilidad.

Para tratar los activos sobre los cuales se desea realizar trazabilidad, es necesario contar con una representación conceptual de los mismos, y de sus atributos y relaciones. Un modelo de representación para esto es la noción de Traceable Resource Unit (TRU) (Product identification and traceability, 2018). Por ejemplo, un lote de H2V en estado gaseoso puede verse como un TRU particular generado por un productor determinado, y cuando este lote se mueve en la cadena de valor, y se transforma a un estado líquido, puede modelarse un nuevo TRU y vincularlo con el anterior mediante operaciones de cambio de estado. La estrategia básica para implementar trazabilidad sobre blockchain

consiste en definir los TRUs adecuados para el problema, y resguardar sus estados y transiciones mediante una blockchain. Las transacciones válidas a implementar sobre los TRUs (por ejemplo, su creación y evolución en el tiempo) se deben codificar mediante contratos inteligentes. De esta manera, se elimina la necesidad de contar con un ente centralizado, y se incrementa la transparencia

y auditoria de las etapas de generación, almacenamiento y transporte del H2V, entre otras.

Un aspecto novedoso de utilizar una blockchain basada en TRUs de H2V es la posibilidad convertirlos en tokens, y ampliar así las operatorias y aplicaciones.

2.2.6 Tokenización.

La tokenización es el proceso de reemplazar datos confidenciales con símbolos de identificación únicos, llamados tokens, que retienen toda la información esencial sobre los datos sin comprometer su seguridad. Esto permite aprovechar la transparencia y seguridad de una blockchain para dar valor agregado a un activo físico, a partir de la obtención de representación digital de éste. En esta metodología se crean tokens a partir de contratos inteligentes y el activo físico existe como colateral de ellos.

Se puede tomar como ejemplo la tokenización de bonos de carbono (Tokenization of Carbon Credits | A Deep Dive, n.d.). Varios estudios han examinado su potencial impacto en el mercado. Un ejemplo

de aplicación es Agrotoken, (Agrotoken | La Cripto Revolución Del Campo, n.d.), que se encarga de la tokenización de granos para agregar confiabilidad y transparencia a commodities agrarios.

En el caso de blockchains compatibles con la EVM, se utiliza el standard ERC-20, que sirve para definir un standard común para definir tokens indistinguibles entre sí (también denominados tokens fungibles). La implementación debe contener un conjunto de funciones que realicen determinadas acciones como de lectura de información, el número total de tokens creados, el balance de una cuenta, y operaciones relacionadas a transacciones de tokens entre cuentas.

19

3. APLICACIÓN

En esta sección introducimos una implementación prototipo de un contrato inteligente, que abarca los conceptos de trazabilidad y tokenización de H2V, y que pretende mostrar las potencialidades del enfoque, enfatizando las propiedades de inmutabilidad, descentralización y transparencia

que provee la tecnología. Concretamente, se realizó una implementación en Solidity, que fue desplegada en las redes Polygon y Algorand. También se hizo un análisis de los costos de las diversas transacciones involucradas en estas blockchains y en Ethereum mainnet.

3.1 Especificación del contrato inteligente para trazabilidad de H2V

El desarrollo está especificado en un contrato inteligente en Solidity, donde el código es de acceso abierto y está disponible en Github (*HidrogenoVerde · GitHub, n.d.*).

Este enfoque sobre blockchain es utilizado en la actualidad, y provee soluciones a escenarios en cadenas de suministro. Un ejemplo para aplicación en cadenas de suministro está dado por Amazon Web Services (*Blockchain for Supply Chain: Track and Trace, n.d.*).

Para detallar los atributos y respectivos cambios de un lote de hidrógeno se definió una estructura de TRUs para tres posibles roles de una cadena de valor de H2V. Cada vez que el productor elabora un lote del activo, debe crear una instancia de esta estructura utilizando el contrato inteligente provisto. Cada TRU se almacena en una lista denominada «allTRU» que es de carácter público y funciona en una modalidad denominada append-only (sólo pueden agregarse datos, pero no pueden modificarse ni borrarse).

Los datos básicos que contiene un TRU son los siguientes:

- **id:** identificador de un lote de hidrógeno; es único.
- **owner:** lista append-only que contiene los sucesivos propietarios del activo.
- **holder:** lista append-only que guarda los sucesivos portadores del activo.
- **hydrogenType:** color del H2 producido, que puede ser de los tipos verde, amarillo o rosa.
- **assetState:** especifica si el lote contiene Hidrógeno (H2) o Amoníaco (NH3).
- **quantity:** masa total de H2 que contiene el lote.

Para un primer diseño, se identificaron los siguientes actores de la cadena:

- **Productor:** encargado de generar los lotes de H2.
- **Transportista:** encargado de transportar el activo hacia donde se ubica el consumidor.
- **Consumidor:** último eslabón de la cadena, que recibe el producto de parte del transportista, luego de haber comprado el activo, y puede utilizarlo.

Cada uno de estos actores puede interactuar con el contrato inteligente a través de una address que le es asignada al momento del despliegue del contrato en una blockchain. Para realizar una interacción, un actor debe invocar una función del contrato inteligente con la finalidad de leer o escribir datos en la blockchain. Las funciones que posee el contrato inteligente son las siguientes:

- **createTRU:** utilizable por el productor. Se crea un nuevo TRU y se añade a la lista «allTRU». El H2 debe ser de un tipo válido. Puede estar en estado puro (H2) o como Amoníaco (NH3).
- **soldTRU:** utilizable por el productor. Se ejecuta al realizar una venta del lote con índice «lid» en la lista «allTRU» al consumidor. Se asienta que el propietario del lote es el consumidor.
- **sendTRUtransporter:** utilizable por el productor. Se asienta que el lote de H2 que

tiene el índice «id» en la lista «allTRU» se entrega al transportista. Para que la función se ejecute, se debe haber realizado la venta del lote de H2 «id» a un consumidor y éste debe estar en manos del productor.

- **sendTRUconsumer:** utilizable por el transportista. Se ejecuta al entregar el lote al consumidor final, y asienta que el lote 'id' está en manos de éste. En caso de ser H2V, se crea una cantidad de tokens proporcional a la masa total de H2 en el lote y se transfieren al consumidor.

- **utilizeHydrogen:** utilizable por el consumidor. Se asienta que el lote de H2 «id» ha sido consumido.

Todos los tokens asociados al lote de H2 «id» se eliminan, ya que el respaldo asociado deja de existir.

- **getTRUowner:** indica quién es el propietario del lote de H2 con índice «id».

- **getTRUholder:** indica quién posee físicamente el lote de H2 «id».

- **getTRUquantity:** indica la cantidad de TRU creados.

Para la implementación de tokens fungibles se utilizaron las especificaciones del standard ERC-20 dadas por OpenZeppelin (*GitHub - OpenZeppelin/Openzeppelin-Contracts: OpenZeppelin Contracts Is a Library for Secure Smart Contract Development., n.d.*).

3.2 Despliegue en blockchain

Para realizar el despliegue del contrato inteligente es necesario definir una blockchain. Para este trabajo, se realizó una comparación de tres blockchains que funcionan con EVM y soportan el despliegue de contratos en Solidity. En particular, se eligieron las redes Ethereum, Polygon y Algorand.

Como se mencionó anteriormente, al momento de realizar las transacciones en una blockchain, se debe tener en cuenta el costo computacional (gas) necesario para cada operación, ya que éste es proporcional a lo que se pagará por asentar la transacción en la cadena de bloques. Por lo tanto,

es una buena práctica estimar gastos de manera anticipada, y desplegar en redes de prueba para simular las diferentes transacciones sin costos asociados. En este trabajo, se desplegaron y calcularon los gastos de despliegue del contrato inteligente y demás transacciones relacionadas con la escritura en la base de datos, que corresponden al mes de marzo del año 2023 y se obtuvieron utilizando la expresión (1). Se tuvo en cuenta que el costo de despliegue es de 3,553,000 gas y el de las demás transacciones es de entre 20,000 gas y 200,000 gas. Los resultados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Costo de transacciones en diferentes blockchain en marzo de 2023.

Blockchain	Costo por unidad de gas	Precio de la criptomoneda	Costo del despliegue	Costo de demás transacciones
Ethereum	55x10 ⁻⁹ Ether	1,561.98 USD	0.195415 Ether (305.23 USD)	0.00275 - 0.011 Ether (17.18 - 4.29 USD)
Polygon	116.71x10 ⁻⁹ MATIC	1.14 USD	0.41467 MATIC (\$0.47 USD)	0.00275 - 0.011 Ether (17.18 - 4.29 USD)
Algorand	60x10 ⁻⁹ ALGO	0.21 USD	0.21318 ALGO (0.045 USD)	0.0012 - 0.012 ALGO (0.00025 - 0.0025 USD)

Fuente: Elaboración propia.

En este caso de estudio, se realizaron despliegues en una red de prueba de Ethereum, Goerli (Goerli Testnet, n.d.) Polygon (Contract Address 0x19f-5b63aadf503d7d0641d9c1b3fbb5fdca19567 | PolygonScan, n.d.) Haga clic o pulse aquí para escribir texto. y Algorand (Contract 0x1a005Ff-18D210E788d1C960142d2f2f8B435e80a - A1 Explorer, n.d.). No se realizó un despliegue en la red de producción de Ethereum (mainnet) debido al alto costo de despliegue del contrato, comparado con Polygon y Algorand.

Para el despliegue del contrato inteligente utilizamos las herramientas Remix (Remix - Ethereum IDE, n.d.) y Metamask (The Crypto Wallet for Defi, Web3 Dapps and NFTs | MetaMask, n.d.). Para el despliegue del contrato inteligente utilizamos las herramientas Remix (Remix - Ethereum IDE, n.d.) y Metamask (The Crypto Wallet for Defi, Web3 Dapps and NFTs | MetaMask, n.d.). Para el caso

de Algorand, también utilizamos la plataforma Chainlist (Chainlist, n.d.) para agregar la red de Milkomeda a Metamask.

Dado que el precio de las criptomonedas puede ser de alta volatilidad, el costo de realizar transacciones puede ser variable a lo largo del tiempo. Este es un aspecto importante para considerar a la hora de implementar un sistema de trazabilidad para H2V que involucre más roles, y mayor cantidad de TRUs y transacciones.

3.3 Sustentabilidad de las blockchains utilizadas

Con respecto a las tecnologías analizadas en este trabajo, Ethereum es una blockchain que ha logrado reducir sustancialmente la energía utilizada para su funcionamiento. En el año 2022 migró del sistema de consenso PoW a PoS (en un evento llamado “The Merge”), lo cual ha sido fundamental para lograr que la huella de carbono de la red se reduzca aproximadamente un 99,992% . Esto se debe a que se utiliza ETH en lugar de energía para proteger la red. Por ejemplo, si se compara el consumo en TWh/año con Bitcoin, este último es 50,000 veces mayor.

Por el lado de Polygon, la red fue beneficiada por el “Merge” de Ethereum, ya que debido a esto ha dejado de emitir 60,000 toneladas de carbono anualmente (*The Merge to Erase 60,000 Tonnes of Polygon’s Carbon Footprint, n.d.*), es decir, un 99.91% del total.

En cuanto a Algorand, se considera una blockchain

eficiente energéticamente debido a su sistema de consenso PPoS y carbono negativo (*Algorand Pledges to Be the Greenest Blockchain With a Carbon-Negative Network Now and in the Future, n.d.*). En cuanto a resultados cuantitativos, un estudio reciente ha estimado emisiones de $8 \cdot 10^{-6}$ kWh por cada transacción (*Sustainable Blockchain: Estimating the Carbon Footprint of Algorand’s Pure Proof-of-Stake, n.d.*).

Existe un estudio comparativo del consumo de las blockchain mencionadas, dado por CCRI (Crypto Carbon Ratings Institute) (*CCRI Indices, n.d.*), y realizado por un grupo de investigación independiente centrado en la auditoría de carbono de proyectos blockchain. Los datos del estudio se resumen en la Tabla 2, donde se puede apreciar que Polygon y Algorand se ubican dentro de las blockchains más ecológicas de la actualidad, por lo cual son elecciones acertadas al utilizar la tecnología blockchain.

Tabla 2. Costo energético y emisiones de las blockchain utilizadas

Blockchain	Consumo eléctrico anualizado	Emisiones de CO2 anualizadas
Ethereum	7,237,177 kWh	2,508 t
Polygon	N/A	45 t
Algorand	441,371 kWh	202 t

Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se abordaron escenarios relacionados a la cadena de valor del H2V, y en particular, cómo dar soporte a su trazabilidad a lo largo de la cadena mediante tecnologías blockchain. Por un lado, dado que blockchain se ha aplicado para la trazabilidad de cadenas de suministro, es factible de aplicar en el dominio de H2V. Más allá de las propiedades asociadas a los diseños basados en blockchain, su uso para H2V abre nuevas posibilidades de aplicaciones, típicamente en relación a tokenización.

A fin de materializar nuestra visión, desarrollamos una implementación prototipo de un contrato inteligente con tres roles de una cadena simplificada de H2V. Para esto, modelamos ciertos activos digitales y sus operaciones bajo la forma de TRUs. Adicionalmente, exploramos un esquema de tokenización. Desplegamos este contrato en Polygon y Algorand, y se realizaron estimaciones de costos y posteriores pagos de gas para dichos sistemas.

Asimismo, durante el trabajo identificamos ciertas particularidades de la cadena de H2V, como son cuestiones relacionadas con garantía de origen, certificados verdes, y contratos financieros, que plantean desafíos a la hora de modelarlos e incorporarlos en un sistema de blockchain.

A futuro, se espera escalar el modelo y prototipo actuales con sus análisis correspondientes, contemplando mayor información y realizando extensiones al contrato inteligente. Se planifica

también evaluar un despliegue a mayor escala, y una comparativa contra Ethereum, para contar con datos más realistas de los escenarios, que puedan apoyar la toma de decisiones sobre blockchain e H2V en el contexto de Argentina.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Daniel Barraco, Hugo Durantini Luca, y Carlos Alberto Peña Montenegro, por discusiones durante este trabajo. Este proyecto ha sido parcialmente financiado por CONICET (Argentina) y Amazon Web Services a través del programa Innova CONICET–AWS: Investigación impulsada por la nube y el programa “AWS Cloud Credit for Research”.

6. REFERENCIAS

Algorand Pledges to be the Greenest Blockchain with a Carbon-Negative Network Now and in the Future. (n.d.). Algorand.

https://algorand.com/resources/algorand-announcements/carbon_negative_announcement

Blockchain for Supply Chain: Track and Trace. (n.d.). Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/blockchain/blockchain-for-supply-chain-track-and-trace/>

Berry, G. D., & Aceves, S. M. (2006). La Economía del Hidrógeno como Solución al Problema de la Estabilización del Clima Mundial. *Acta Universitaria*, 16(1), 5–14. <https://doi.org/10.15174/AU.2006.192>

Carbon Neutral +. (2022). Certificados de Energía Renovable: qué son y para qué sirven. <https://www.carbonneutralplus.com/que-son-y-para-que-sirven-los-certificados-de-energia-renovable/>. CCRI Indices. (n.d.).

<https://indices.carbon-ratings.com>

CertifHy (2017). CertifHy Definition of Green Hydrogen outcome and scope LCA analysis | FCHObservatory.

<https://www.fchobservatory.eu/observatory/education-and-training/education-materials/certifhy-definition-green-hydrogen-outcome>

Chainlist. (n.d.). <https://chainlist.org/>

Contract Address 0x19f5b63aadf503d7d0641d9c1b3fbb5fdca19567 | PolygonScan, n.d. <https://polygonscan.com/address/0x19f5b63aadf503d7d0641d9c1b3fbb5fdca19567>

Contract 0x1a005Ff18D210E788d1C960142d2f2f8B435e80a - A1 Explorer. (n.d.). <https://explorer-mainnet-algorand-rollup.a1.milkomeda.com/address/0x1a005Ff18D210E788d1C960142d2f2f8B435e80a>

de Almeida Matos Moraes, L. (2007). Consideração de Contratos de Fornecimento de Gás Natural com Cláusulas Take-or-Pay no Planejamento Energético de Médio Prazo. *Métodos Matemáticos Em Energia Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada- IMPA*.

Del gris al verde, los colores del hidrógeno - Good New Energy. (n.d.). Retrieved March 24, 2023, from <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/del-gris-al-verde-los-colores-del-hidrogeno/>

Ethereum Whitepaper | ethereum.org. (n.d.). Retrieved March 24, 2023, from <https://ethereum.org/en/whitepaper/>
GitHub - OpenZeppelin/Openzeppelin-Contracts: OpenZeppelin Contracts Is a Library for Secure Smart Contract Development., n.d.) <https://github.com/OpenZeppelin/openzeppelin-contracts/blob/master/contracts/token/ERC20/ERC20.sol>

Goerli Testnet. (n.d.). <https://goerli.net/>

HidrogenoVerde · GitHub, <https://github.com/HidrogenoVerde/App>

I-REC Standard - The International REC Standard Foundation. (n.d.). Retrieved March 23, 2023, from <https://www.irecstandard.org/>

IRENA. (2022). Hoja de ruta de energías renovables para Centroamérica: hacia una transición energética regional. Jensterle, M., Narita, J., Piria, R., Samadi, S., Prantner, M., Crone, K., Siegemund, S., Kan, S., Matsumoto, T., Shibata, Y., & Thesen, J. (2019). The role of clean hydrogen in the future energy systems of Japan and Germany : an analysis of existing mid-century scenarios and an investigation of hydrogen supply chains. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/7405>

Kandemir, T., Schuster, M. E., Senyshyn, A., Behrens, M., & Schlögl, R. (2013). The Haber–Bosch Process Revisited: On the Real Structure and Stability of “Ammonia Iron” under Working Conditions. *Angewandte Chemie*

International Edition, 52(48), 12723–12726. <https://doi.org/10.1002/ANIE.201305812>

Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., & Moussiopoulos, N. (2004). Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(14), 1443–1450. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2004.01.016>

Laub Benavides, A. (2011). Estructura del Negocio del Gas Natural en el Perú. *Derecho & Sociedad*; Núm. 36 (2011). <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/118564>

Liu, W., Wan, Y., Xiong, Y., & Gao, P. (2022). Green hydrogen standard in China: Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(58), 24584–24591. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.193>

Lubbe, F., Rongé, J., Bosserez, T., & Martens, J. A. (2023). Golden hydrogen. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 39, 100732. <https://doi.org/10.1016/J.COAGSC.2022.100732>

Maggio, G., Nicita, A., & Squadrito, G. (2019). How the hydrogen production from RES could change energy and fuel markets: A review of recent literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11371–11384. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.03.121>

Masip Macía, Y., Rodríguez Machuca, P., Alexander, A., Soto, R., Campos, R. C., Macía, M., Rodríguez, Y. ;, Campos, C., & Green, R. (2021). Green Hydrogen Value Chain in the Sustainability for Port Operations: Case Study in the Region of Valparaiso, Chile. *Sustainability 2021*, Vol. 13, Page 13681, 13(24), 13681. <https://doi.org/10.3390/SU132413681>

Newborough, M., & Cooley, G. (2021). Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0), 2020(11), 16–22. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0)

Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R., & Hafner, M. (2020). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability 2021*, Vol. 13, Page 298, 13(1), 298. <https://doi.org/10.3390/SU13010298>

NU. CEPAL. Subsede de México. (2009, June 18). La crisis de los precios del petróleo y su impacto en los países centroamericanos. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25972>

Padinger, G. (2022). Cuánto han subido los precios de las materias primas por la guerra. <https://cnnespanol.cnn.com/2022/07/02/precios-materias-primas-guerra-ucrania-orix/>

Cnn.Com/2022/07/02/Precios-Materias-Primas-Guerra-Ucrania-Orix/. <https://cnnespanol.cnn.com/2022/07/02/precios-materias-primas-guerra-ucrania-orix/>

Pototschnig, A. (2021). Renewable hydrogen and the “additionality” requirement: why making it more complex than is needed? European University Institute.

Ramón, J., Teresa, M., Gotzon, A., Guilera, G. J., Tarancón, A., & Torrell, M. (n.d.). 35 Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada. Remix - Ethereum IDE. (n.d.). <https://remix.ethereum.org/#lang=en&optimize=false&runs=200&evmVersion=null&version=soljson-v0.8.18+commit.87f61d96.js>

Rifkin, J. (2002). La economía del Hidrógeno. Paidós.

Sailer, K., Reinholz, T., Lakeit, K. M., & Crone, K. (2022). Global Harmonisation of Hydrogen Certification. Overview of global regulations and standards for renewable hydrogen.

Sustainable Blockchain: Estimating the Carbon Footprint of Algorand's Pure Proof-of-Stake. (n.d.). Algorand. <https://algorand.com/resources/blog/sustainable-blockchain-calculating-the-carbon-footprint>

The crypto wallet for Defi, Web3 Dapps and NFTs | MetaMask. (n.d.). <https://metamask.io/>

The Merge to Erase 60,000 Tonnes of Polygon's Carbon Footprint. (n.d.). Retrieved September 1, 2023. <https://polygon.technology/blog/the-merge-to-erase-60000-tonnes-of-polygons-carbon-footprint>

Velazquez Abad, A., & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, 138, 111300. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2020.111300>

White, L. V., Fazeli, R., Cheng, W., Aisbett, E., Beck, F. J., Baldwin, K. G. H., Howarth, P., & O'Neill, L. (2021).

Towards emissions certification systems for international trade in hydrogen: The policy challenge of defining boundaries for emissions accounting. *Energy*, 215, 119139. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.119139>

Wood, G. (2014). Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. *Ethereum Project Yellow Paper*, 151(2014), 1-32.