

# APLICAÇÃO DA RASTREABILIDADE DO HIDROGÊNIO VERDE NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Tatyne Mityko Dias Fussuma <sup>1</sup>

Eric Scromovas Salge <sup>2</sup>

André Luiz Veiga Gimenes <sup>3</sup>

Miguel Edgar Morales Udaeta <sup>4</sup>

## Resumo

O hidrogênio (H<sub>2</sub>) é visto mundialmente como o elemento fundamental para a transição energética, isso porque possui uma alta densidade energética, pode ser utilizado como vetor de armazenamento de energia, possui versatilidade de uso e, sua fonte de energia, dependendo do seu processo de produção, pode ser de baixo ou nulo carbono. Desta forma, a diferenciação de acordo com o teor de carbono envolvido na sua produção, trata-se de um fator chave para sua precificação. Nesse sentido, um dos maiores desafios atuais na economia do Hidrogênio Verde (H<sub>2</sub>V), consiste na confiabilidade e rastreabilidade de sua origem. H<sub>2</sub> de diferentes origens possuem valores distintos no mercado, existindo assim motivação para fraudar a origem do ativo. Portanto, este artigo visa descrever as rotas tecnológicas para produção do Hidrogênio, além de elencar as tecnologias mais utilizadas para sua rastreabilidade no setor elétrico, e por fim, determinar como poderá ser realizada a rastreabilidade do Hidrogênio Verde no Brasil utilizando a tecnologia Blockchain, em concordância com o Manual de Certificação do Hidrogênio realizado pela CCEE. Desse modo, além da comparação direta do montante de H<sub>2</sub>V produzido inicialmente nas plantas, com o volume de energia contratada ou gerada pelo agente, a solução proposta visaria também combinar a tecnologia Blockchain com o modelo de Book and Claim utilizado hoje no processo de certificação da CCEE. Após os dados serem obtidos pelo cruzamento do volume de H<sub>2</sub> gerado com os dados coletados da CCEE, essas informações seriam transmitidas pela rede através de criptografia AES e seriam por fim armazenadas em Blockchain para garantir sua transparência e imutabilidade a fim de se evitar alterações

1 Estudante de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: [tatyanemityko@usp.br](mailto:tatyanemityko@usp.br)

2 Graduado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: [ericssalge@usp.br](mailto:ericssalge@usp.br)

3 Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: [gimenes@gmail.com](mailto:gimenes@gmail.com)

4 Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: [udaeta@pea.usp.br](mailto:udaeta@pea.usp.br)

indevidas. Desse modo, a tecnologia Blockchain poderia ser utilizada para registrar RECs como tokens e controlar as operações sobre esses ativos. Além disso, essa descentralização do Blockchain reduziria a atuação de autoridades centrais, promovendo a desintermediação de processos e, conseqüentemente, reduziria o custo das operações, ao reduzir o espaço para manipulações, erros e omissões das grandes empresas geradoras e distribuidoras.

Palavras-chave: Certificação do hidrogênio, Blockchain, Tokenização, CCEE.

## 1) INTRODUÇÃO

O hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V), produzido através de energia renovável, desempenhará um papel estratégico para diversos países. Considerando que o H<sub>2</sub> tem a possibilidade de funcionar como vetor de armazenamento de energia, este torna-se um recurso com capacidade de promover o acoplamento dos mercados de combustíveis (transportes pesados, aviação, aquaviário e rodoviário), das indústrias (siderurgia e fertilizantes), além do sistema elétrico e outros. Desse modo, a partir da substituição do uso de combustíveis fósseis em diferentes atividades econômicas, o H<sub>2</sub>V pode potencializar a descarbonização de setores altamente poluidores, reduzir a exposição à volatilidade de preços e a necessidade de importação de recursos fósseis.

Ademais, outro aspecto importante a ser mencionado, é que a transformação do hidrogênio como principal vetor energético, tem levado à busca por diferenciação da sua origem de produção, bem como ao eventual acoplamento ou não de tecnologias de captura, utilização e sequestro de carbono (CCS, CCU ou CCUS).

Cabe ressaltar também que a simplicidade da molécula de hidrogênio (apenas dois átomos de hidrogênio) a caracteriza como um produto quimicamente homogêneo, sem variações de qualidade. Distinções estas que podem ser observadas quanto à forma de fornecimento (puro/em mistura, gasoso/líquido, adsorvido/combinado etc.) (EPE, 2021), porém tais possibilidades não alteram este caráter quimicamente homogêneo mencionado.

Desta forma, a diferenciação de acordo com o teor de carbono envolvido na produção de hidrogênio busca acoplar o diferencial por qualidade ambiental, possibilitando a existência de preço “prêmio” a depender da origem da produção sem, contudo, alterar a natureza intrínseca de homogeneidade química da molécula de H<sub>2</sub> (EPE, 2021), na qual é indistinta da fonte que a produziu.

Portanto, este artigo tem como objetivo determinar como poderá ser realizada a rastreabilidade do Hidrogênio Verde no Brasil utilizando a tecnologia Blockchain, em concordância com o Manual de Certificação do Hidrogênio realizado pela CCEE. Para tanto, também irá descrever as rotas tecnológicas para produção de Hidrogênio, além de elencar as tecnologias mais utilizadas para sua rastreabilidade no setor elétrico.

## **2) REFERENCIAL TEÓRICO**

Este capítulo consta das principais fundamentações teóricas para compreensão do objetivo final desse artigo. Assim, será relatado primeiro os conceitos que envolvem as rotas tecnológicas de produção do hidrogênio, sua classificação por cores e seus custos. Posteriormente, será abordado sobre os certificados internacionais de energia renovável, o manual para certificação do hidrogênio produzido pela CCEE e, por fim, a aplicação da tecnologia Blockchain no sistema elétrico e na certificação do hidrogênio.

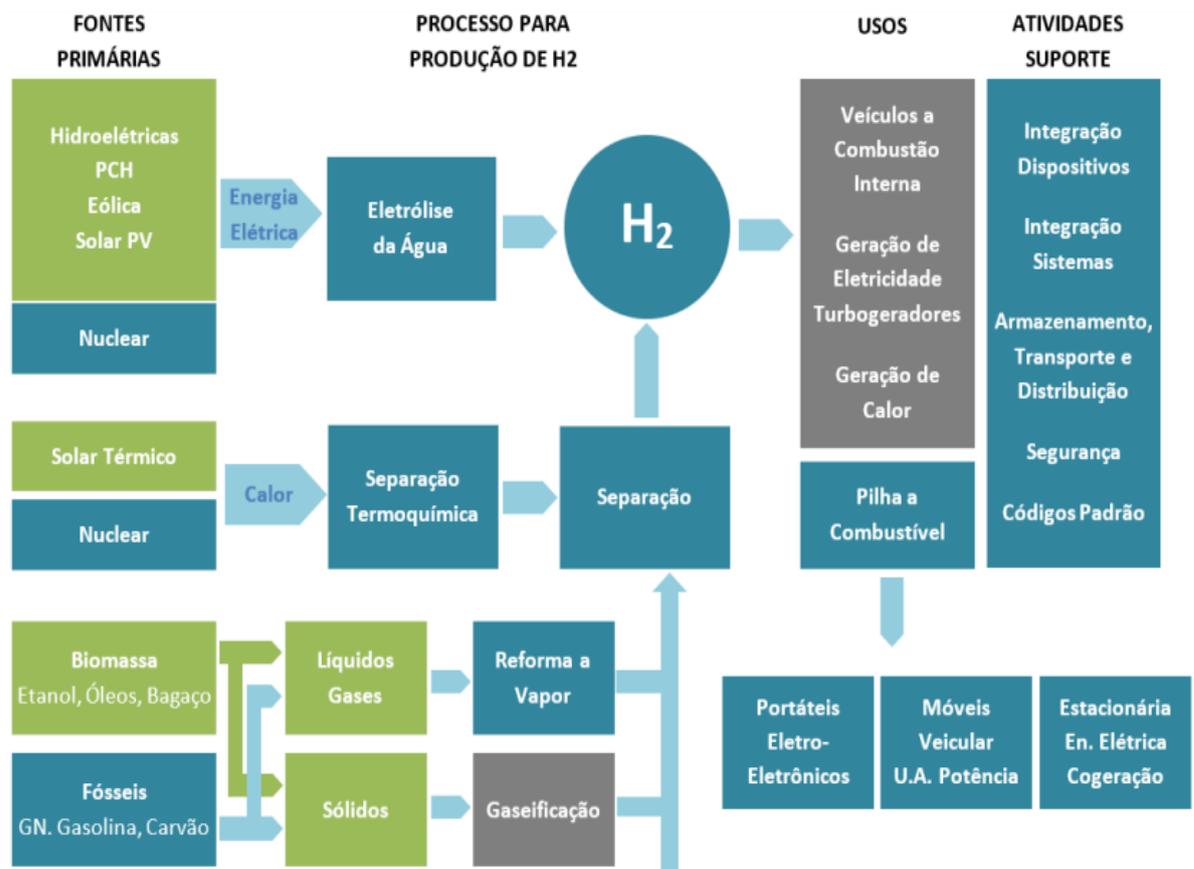
### **2.1) Rotas Tecnológicas e Processos de Geração do Hidrogênio**

A obtenção de hidrogênio pode se dar a partir de diversas matérias-primas, de ocorrências naturais ( $H_2$  geológico) a processos físico-químicos ou bioquímicos (MME, 2021). A Figura 1 apresenta esses processos, de forma simplificada, desde sua produção até aplicações.

Entre as matérias-primas renováveis fornecedoras de átomos de hidrogênio, podem ser utilizadas a água, a biomassa e os biocombustíveis líquidos e gasosos, tais como o etanol e o biogás/biometano, por exemplo. A conversão da água em hidrogênio é feita, principalmente a partir da eletrólise. Para isso, a eletricidade utilizada no processo pode ser de origem renovável (por exemplo, eólica, solar ou hidráulica), obtendo hidrogênio com baixo ou nulo teor de carbono (EPE, 2021). Das quais duas tecnologias de eletrólise se destacam: a Alcalina Clássica e a de Membrana Polimérica Eletrolítica (PEM).

Porém, de acordo com o relatório “*Global Hydrogen Review 2023*” da Agência Internacional de Energia (IEA), 95 milhões de toneladas (Mt) de hidrogênio de todos os tipos foram gerados em 2022, desse total, cerca de 94 Mt foram oriundos de fontes não renováveis, como a reforma térmica do metano, processo com elevadas emissões de gases de efeito estufa (GEE). E menos de 1 Mt foi de hidrogênio de baixo carbono, em sua maioria obtido da reforma do metano com sequestro e captura de carbono.

Figura 1 - Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção do hidrogênio



Fonte: (EPE, 2021).

## 2.2) Classificação do Hidrogênio

Pelo fato de a utilização do hidrogênio estar sendo impulsionada pelas metas de descarbonização, ele é constantemente referido na literatura por cores (GESEL, 2023), de acordo com o grau de neutralidade da tecnologia de produção em questão (porém não existe um padrão internacional de cores, ocasionando em algumas variações na literatura). A Figura 2 apresenta as classificações das rotas de produção de hidrogênio mais atuais.

Como observado na figura, o Hidrogênio Verde é produzido via eletrólise da água a partir de fontes renováveis, sendo assim uma produção livre de emissões de  $CO_2$  e, em decorrência disso, mais cara em relação as cores mais desenvolvidas no mercado (cinza, azul e turquesa).

Alternativamente, existe também a produção de hidrogênio utilizando como matéria prima a biomassa, cujo termo técnico correto seria hidrogênio musgo, como descrito na Figura 2. Porém por se tratar de uma energia renovável e de grande potencial, observa-se o crescimento do termo hidrogênio renovável no lugar de hidrogênio musgo, principalmente por ser um termo mais compreensível e midiático. Fato semelhante ocorre com o termo hidrogênio de baixo

carbono, sugerido pela IEA por entender que a classificação de cores é imprecisa e desprovida de aplicação prática em processos decisórios de contratação de projetos na área, podendo gerar dificuldades regulatórias.

Figura 2 - Classificação do hidrogênio a partir da tecnologia de produção

<b>Cor</b>	<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
■	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
■	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
□	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO <sub>2</sub>
■	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

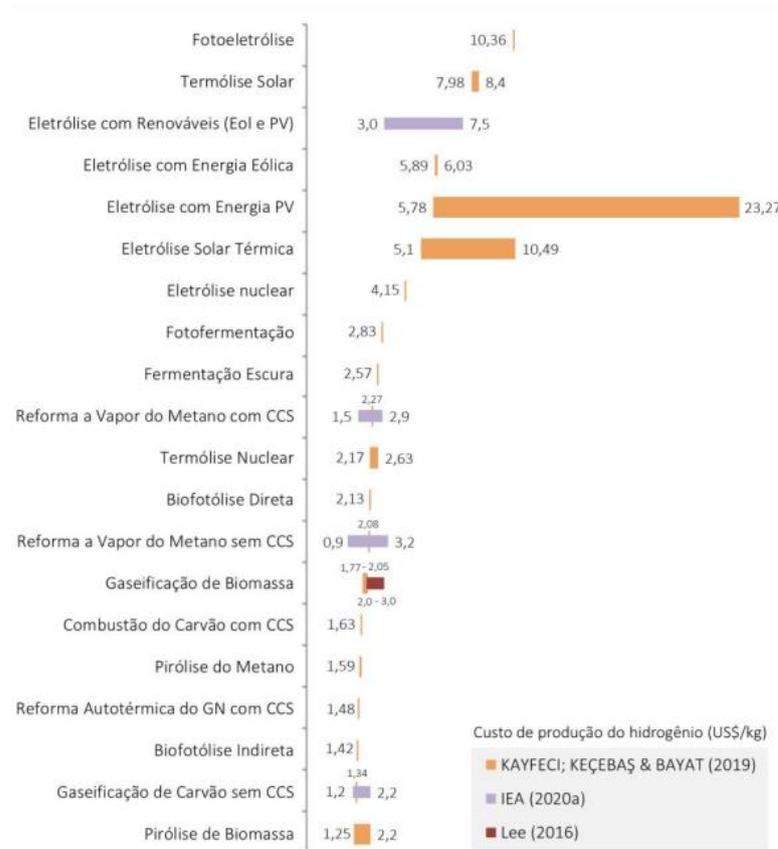
Fonte: (Adaptado de EPE, 2021).

### 2.3) Custos e Aspectos Competitivos do Hidrogênio

Os menores custos de produção do hidrogênio atualmente, de acordo com a IEA, são observados na reforma a vapor do metano (gás natural) e na gaseificação do carvão (IEA, 2020), que consistem em rotas tecnológicas baseadas em fontes energéticas fósseis. Já a eletrólise da água usando fontes renováveis é, em geral, a rota tecnológica mais cara (KAYFECI, KEÇEBAS, BAYAT, 2019) dentre as já disponíveis no mercado, como observado na Figura 3.

Porém, um estudo da IRENA (2019) aponta que, nos melhores casos, o hidrogênio verde produzido a partir de fontes eólica e solar possa se tornar competitivo antes de 2025 em relação ao hidrogênio de origem fóssil (IRENA, 2019). Em relação aos valores médios mundiais, a competitividade seria alcançada entre 2030 e 2040, com a aceleração de redução de custos de investimento da eletrólise e de geração elétrica com renováveis variáveis.

Figura 3 - Faixas de custos da produção de hidrogênio



Fonte: (EPE, 2021).

## 2.4) Certificados Internacionais de Energia Renovável

Assim, em concordância com o apoio em desenvolver o mercado de energias renováveis, surge o certificado REC (*Renewable Energy Certificate*), no qual equivale a 1 MWh de energia renovável gerada (VENTURUS, 2020) e é um instrumento de mercado utilizado para representar o direito de propriedade sobre os atributos ambientais relacionados à geração de energia renovável.

Isso é, são certificados que atestam que a energia foi gerada a partir de fontes renováveis (como a hídrica, solar, eólica, biomassa ou geotérmica) e podem ser comercializadas, além de possuírem algumas informações como: data em que o certificado foi emitido, a localização da infraestrutura de geração, o perfil do gerador e até requisitos de sustentabilidade e redução de CO<sub>2</sub> (VENTURUS, 2020).

Para tanto, existem vários sistemas de registros de certificados ao redor do mundo, como o RPS (*Renewable Portfolio Standard*) dos Estados Unidos, ou o GO (*Guarantee of Origin*)

comercializado na Europa. Enquanto no Brasil, o sistema de emissão e transferência de RECs é garantido por medições de fato, embasadas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (Canal Energia, 2018), e pelo sistema de rastreamento que segue o padrão IREC, um padrão da *International REC Standard* adotado também por outros países.

## **2.5) Certificação do Hidrogênio da CCEE**

Nesse sentido, com o objetivo de apoiar o mercado de hidrogênio global, surge a certificação de hidrogênio da CCEE, na qual consiste em um processo que busca atender os requisitos nacionais e internacionais de certificação (CCEE, 2023). Caracterizada por ser uma ferramenta de caráter comprobatório, em que os consumidores possam comprovar a origem e rastrear os atributos ambientais do produto.

Esta certificação, também visa a facilitar a habilitação do produtor de hidrogênio para o mercado, fortalecendo a segurança e credibilidade do seu produto. E com base nisso foi criado o Manual para Certificação do Hidrogênio, produzido pela CCEE, na qual busca:

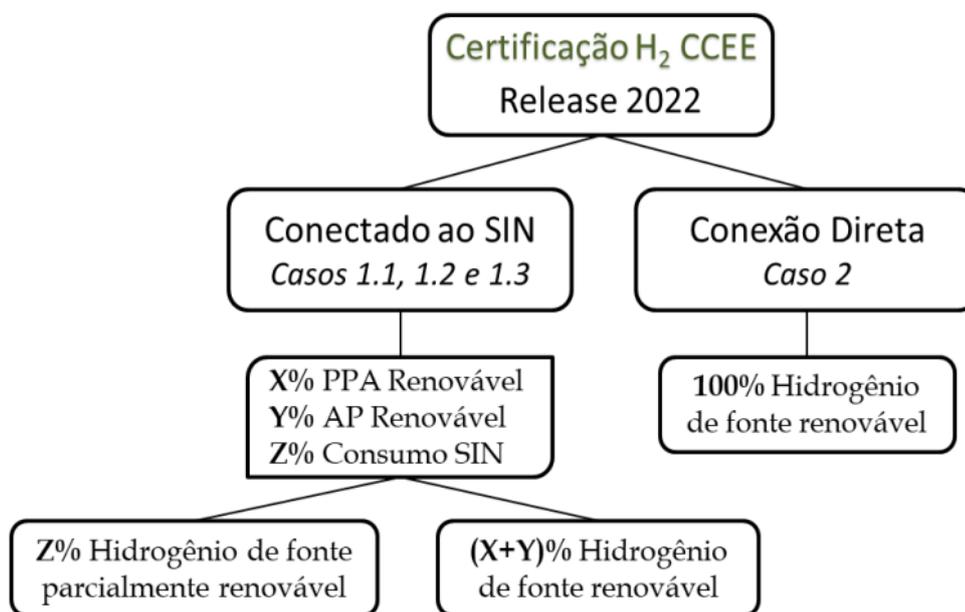
- Evidenciar os atributos de sustentabilidade do hidrogênio (especificamente a pegada de carbono) com credibilidade e consistência global;
- Agregar valor ao produto pois possibilita a distinção do teor de carbono do hidrogênio comercializado;
- Oferecer transparência para os clientes e permitir que o consumidor tenha o poder de escolha;
- Possibilitar novos modelos de negócio em outros setores da indústria, como fertilizantes, aço, cimentícia, alimentícia, transporte, aquecimento, entre outros;
- Permitir que os consumidores sinalizem a demanda por hidrogênio em suas credenciais de sustentabilidade;
- Gerar credibilidade entre potenciais importadores e exportadores, promovendo o comércio global e transfronteiriço de hidrogênio com base em suas credenciais de sustentabilidade;
- Fomentar o mercado nacional de hidrogênio cumprindo os requisitos e as diretrizes regulatórias do Brasil em discussão.

Tendo em vista que o escopo inicial da certificação é estritamente técnico, o manual garante que será realizado a validação apenas da produção de hidrogênio por meio de eletrólise, sem a

realização de qualquer avaliação de Integridade, de Conflitos de Interesses ou Socioambiental da cadeia produtiva das empresas certificadas.

Além disso, o produtor de hidrogênio poderá ter sua produção certificada em duas classificações distintas: hidrogênio de fonte renovável e hidrogênio de fonte parcialmente renovável. O tipo de classificação dependerá da parcela de energia com comprovação renovável. A Figura 4 representa as duas modalidades que poderão ser certificadas e as possíveis classificações concedidas.

Figura 4 - Modalidades e classificações da certificação de hidrogênio.



Fonte: (CCEE, 2023).

Ademais, importante salientar que a CCEE (2023) utiliza o sistema Book and Claim, no qual permite uma maior abrangência nos modelos de negócio do produtor, já que através dele é possível que o certificado seja negociado, ou seja, transferido os atributos ambientais da produção de hidrogênio para outro produtor, desde que ambos estejam registrados no sistema da CCEE e a operação seja também registrada.

Assim, com relação a rastreabilidade da certificação do hidrogênio, esta precisa ser controlada e por isso qualquer processo de transferência, cancelamento ou expiração dos certificados emitidos precisam ser registrados. Além disso, este mecanismo é essencial para o sistema Book and Claim do certificado e evita dupla contagem.

Porém, as plataformas atuais de registro de certificados são normalmente comercializados em mercados locais, próprios de cada país, com entidades intermediárias e processos

burocráticos, que aumentam os custos das transações e inviabilizam uma maior participação de empresas e indivíduos interessados em participar desse mercado.

Desse modo, a tokenização desses ativos em sistemas de Blockchain é vista como uma possível alternativa para a criação de um mercado que possa viabilizar a comercialização desses créditos em escala global (VENTURUS, 2020). Visto que, as plataformas de registro como RECs são sistemas centralizados, ao passo que Blockchain é um sistema distribuído.

## 2.6) Tecnologia Blockchain

Juntamente com ferramentas como Big Data e Inteligência Artificial, a aplicação do Blockchain no setor elétrico traz inúmeras possibilidades para descentralizar o comércio de energia e potencializar o desenvolvimento de novas soluções. Uma vez que tem se mostrado uma ferramenta com grande eficiência operacional, capaz de gerenciar dados em tempo real, reduzir custos, tornar o sistema mais sustentável e garantir mais acessibilidade e transparência às informações (SANTOS, 2022).

Nesse contexto, uma das soluções vinculadas ao modelo Blockchain é a certificação de energia renovável, sendo possível acelerar e automatizar os processos de rastreabilidade da energia gerada, consumida e as emissões evitadas no processo. Essa é uma grande vantagem para contratos de compra e venda de energia a longo prazo, com base em geração renovável, que exigem a comprovação da origem de geração e a quantidade produzida. É segurança, transparência e acessibilidade digital durante as transações (ENGIE, 2020).

De forma mais técnica, um Blockchain é um registro distribuído que utiliza criptografia para garantir a segurança e a integridade dos dados. Ele opera como um livro-razão descentralizado e sua arquitetura complexa contribui para a eficiência em termos de segurança, motivo pelo qual redes de criptomoedas e outros ativos digitais utilizam o Blockchain como sua espinha dorsal. Abaixo é possível encontrar um resumo dos principais componentes da arquitetura do Blockchain (IBM, 2023):

- **Blocos:** A Blockchain é composta por uma cadeia de blocos (*blocks*), onde cada bloco contém um conjunto de transações. Cada bloco está ligado ao anterior por meio de um *hash*, criando assim uma cadeia imutável.
- **Transações:** São as operações que ocorrem na rede e são agrupadas em blocos. As transações podem incluir a transferência de ativos, contratos inteligentes ou qualquer outra ação que seja suportada pela Blockchain específica.

- Hash: Um *hash* é uma função criptográfica que converte dados em uma sequência alfanumérica fixa. Cada bloco contém o *hash* do bloco anterior, criando uma ligação permanente entre os blocos. Isso torna a Blockchain resistente a alterações, pois qualquer modificação em um bloco afetaria todos os blocos subsequentes.

- Consenso: Para garantir a validade das transações e manter a integridade da rede, é necessário um mecanismo de consenso. O consenso é o processo pelo qual os participantes da rede concordam sobre o estado atual da Blockchain. Métodos comuns incluem Prova de Trabalho (*Proof of Work*), Prova de Participação (*Proof of Stake*) e *Delegated Proof of Stake*.

- Nós: Os nós são os participantes da rede que mantêm cópias da Blockchain e validam as transações. Existem nós completos que mantêm uma cópia completa da Blockchain e validam todas as transações, e existem nós leves que confiam nos nós completos para validar as transações.

- Contratos Inteligentes: São programas autoexecutáveis que rodam na Blockchain e são usados para automatizar acordos e contratos. Eles são escritos em linguagens de programação específicas da Blockchain e executados automaticamente quando as condições predefinidas são atendidas.

- Consistência e Imutabilidade: A consistência é mantida pela cópia distribuída da Blockchain em todos os nós. A imutabilidade é garantida pelo uso de *hashs* e criptografia, o que torna extremamente difícil alterar um bloco após ser adicionado à cadeia. Além disso, o Blockchain não aceita intermediários, o que garante a confidencialidade das operações.

## 2.7) Certificação do Hidrogênio através de Blockchain

Foram utilizadas três principais referências como bases primordiais para a aplicação do proposto neste trabalho. Sendo a primeira uma dissertação, defendida por Laura Sánchez (2021) em Madrid, com o tema "*Certifying green hydrogen's origin through Blockchain*". No qual foca na certificação da origem do hidrogênio verde e se baseia no *Hyperledger Fabric* para gerar certificados de garantia de origem do hidrogênio verde dentro da própria empresa Blockchain, o que aumenta a segurança do processo.

A segunda referência trata-se da empresa Acciona, considerada a pioneira, ao desenvolver em 2021 uma plataforma funcional baseada em Blockchain para acompanhar a origem do hidrogênio verde. Permitindo visualizar toda a cadeia de valor do H<sub>2</sub>V com o GreenH<sub>2</sub>chain®, no qual permite aos consumidores de hidrogênio renovável quantificar, registrar e monitorizar a

descarbonização do seu consumo de energia. Além de fornecer toda a informação correspondente ao consumo efetuado, bem como todos os dados necessários para quantificar as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) evitadas pela utilização deste tipo de energia limpa, tudo isso podendo ser realizado de qualquer parte do mundo, e com verificação em tempo real. (ACCIONA, 2023).

E a terceira referência trata-se da parceria firmada pela SAP com o programa do Ministério de Assuntos Econômicos e Ação Climática da Alemanha, implementado no Brasil pela Agência de Desenvolvimento Alemã (GIZ). Assim, a SAP será facilitadora da certificação de sustentabilidade do hidrogênio verde brasileiro por meio da solução GreenToken, que utiliza uma abordagem Blockchain para coletar as informações de qualquer matéria-prima com transparência, auxiliando assim, empresas brasileiras a exportarem hidrogênio verde para a Alemanha por meio do H<sub>2</sub>Uppp (Canal Energia, 2023).

### **3) METODOLOGIA**

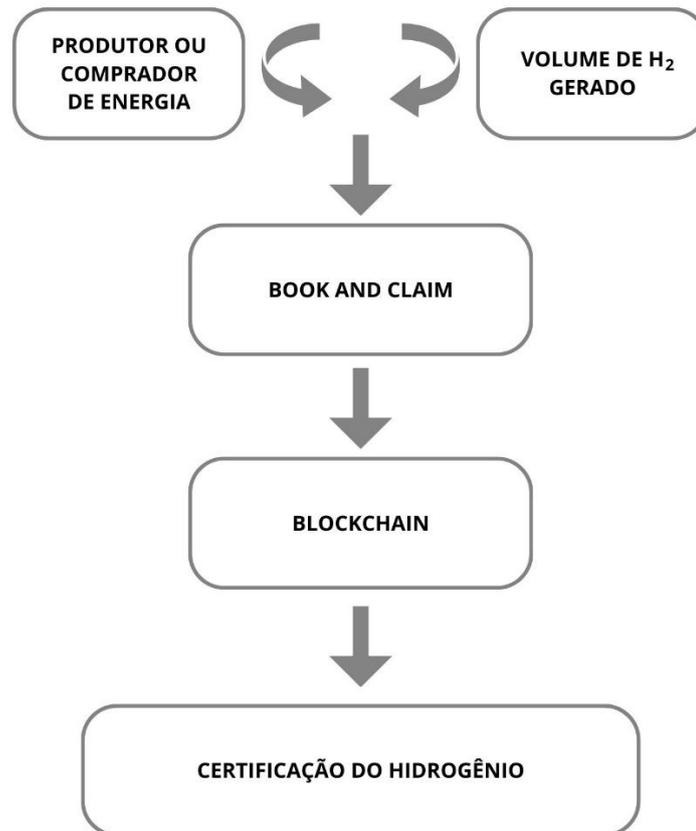
#### **3.1) Proposta de Combinação de Book and Claim com Blockchain**

Após a análise das diferentes técnicas e tecnologias de rastreabilidade presentes no mercado de energia, foi elaborada uma proposta de mecanismo de classificação e monitoramento da origem do hidrogênio verde que combinasse o uso da tecnologia Blockchain, com o padrão de Certificação do Hidrogênio realizado pela CCEE, ilustrado na Figura 5.

Desse modo, com o cruzamento dos dados referentes a compra ou produção de energia e o volume de H<sub>2</sub> gerado, o processo seguiria para o sistema de Book and Claim. Após essa etapa, essas informações seriam transmitidas pela rede através de criptografia AES e seriam por fim armazenadas em Blockchain para garantir sua transparência e imutabilidade a fim de se evitar alterações indevidas.

Assim, após um ativo ser registrado em um Blockchain, todas as transações com ele poderão ser rastreadas. Portanto, não fica difícil imaginar que Blockchain poderia ser utilizado para registrar RECs como tokens e controlar as operações sobre esses ativos. E no contexto do H<sub>2</sub>V, essa combinação se mostra bastante promissora, pois possibilita obter maior segurança e transparência nas operações de Book and Claim.

Figura 5 - Implementação do Blockchain na Certificação do Hidrogênio



Fonte: (Autoria Própria, 2024).

### 3.2) Desenvolvimento de um código simplificado com Blockchain

Para a melhor compreensão do funcionamento desta rede, foi construída uma simulação em ambiente *Python*, onde contratos inteligentes regulam um ambiente de contratação de energia renovável, bem como regulam a venda de H<sub>2</sub>V proveniente dessa energia. Para isso, foi assumida a relação aproximada de 55 MWh de energia consumida, para 1 tonelada de H<sub>2</sub> produzido utilizando o processo de eletrólise. Importante salientar também que essa relação pode sofrer mudanças ao considerar diferentes rotas e catalisadores para o processo de eletrólise do hidrogênio.

A fim de se realizar uma simulação simplificada, assumiu-se que todos os players poderiam produzir energia renovável ou comprá-la, e posteriormente vender o hidrogênio verde. Não sendo assim possível comprar H<sub>2</sub> ou vender energia no escopo definido da simulação. A partir disso as operações validariam a quantidade de energia disponível para cada player antes de registrar uma venda certificada de H<sub>2</sub>V no Blockchain. O código da simulação pode ser encontrado no link: <https://github.com/Eric-Salge/Simulacao--blockchain>.

## 4) RESULTADO E DISCUSSÃO

### 4.1) Simulação do código simplificado com Blockchain

O código pode ser demonstrado nas figuras a seguir, onde é possível verificar o funcionamento da estrutura simulada. No exemplo da Figura 6, o player H primeiramente insere uma tentativa de compra de 100 MWh no sistema, a compra é permitida e o registro é adicionado à Blockchain, gerando o log abaixo:

Figura 6 – Simulação de compra de 100 MWh do sistema pelo player H

```
Escolha o jogador (A-T): H
Escolha o tipo de contrato (buy/sell): buy
Digite a quantidade (em toneladas ou MWh): 100
Digite a senha: H1234
Transação assinada por H.
Contrato adicionado à blockchain.

Cadeia de Blocos:
[
  {
    "index": 1,
    "timestamp": 1705447603.1075904,
    "transactions": [],
    "previous_hash": "1"
  },
  {
    "index": 2,
    "timestamp": 1705447621.7759955,
    "transactions": [
      {
        "player": "H",
        "contract_type": "buy",
        "amount_h2": null,
        "amount_energy": 100.0,
        "password": "H1234"
      }
    ],
    "previous_hash": "5467af6ca580bc0a37812d4f93cb251cdc5cc664d8f7675124e0bcc80f5d290e"
  }
]
```

Fonte: (Autoria Própria, 2024).

Após a compra de 100 MWh de energia renovável, o player insere a venda de 1 tonelada de H<sub>2</sub>V no sistema, que faz a equivalência energética de 55 MWh para 1 tonelada de H<sub>2</sub>V e libera essa venda para registro no sistema, como observado na Figura 7.

Figura 7 – Simulação da venda bem sucedida de 1 tonelada de H<sub>2</sub>V pelo player H

```
Deseja fazer outra transação? (Sim/Não): Sim
Escolha o jogador (A-T): H
Escolha o tipo de contrato (buy/sell): sell
Digite a quantidade (em toneladas ou MWh): 1
Digite a senha: H1234
Transação assinada por H.
Contrato adicionado à blockchain.
```

Cadeia de Blocos:

```
[
  {
    "index": 1,
    "timestamp": 1705447603.1075904,
    "transactions": [],
    "previous_hash": "1"
  },
  {
    "index": 2,
    "timestamp": 1705447621.7759955,
    "transactions": [
      {
        "player": "H",
        "contract_type": "buy",
        "amount_h2": null,
        "amount_energy": 100.0,
        "password": "H1234"
      }
    ],
    "previous_hash": "5467af6ca580bc0a37812d4f93cb251cdc5cc664d8f7675124e0bcc80f5d290e"
  },
  {
    "index": 3,
    "timestamp": 1705447657.9086983,
    "transactions": [
      {
        "player": "H",
        "contract_type": "sell",
        "amount_h2": 1.0,
        "amount_energy": null,
        "password": "H1234"
      }
    ],
    "previous_hash": "5185dd351e10fd45caeale7db130185a9f60de5f26a8a16004cd1c06256bda3f"
  }
]
```

Fonte: (Autoria Própria, 2024).

Além do sistema de validação para registro, esses logs evidenciam a estrutura de blocos que dá nome a esse tipo de cadeia de dados, sendo que cada transação gera novos blocos que não podem ser editados ou apagados do conjunto.

No caso de uma tentativa de ataque, a tecnologia de Blockchain se utiliza da técnica do consenso entre seus nós para validar a informação e impedir a interferência de um nó comprometido no sistema, podendo inclusive romper a conexão desse nó vulnerável com o resto da estrutura. Desse modo, como ilustrado na Figura 8, verifica-se um ataque simulado e a resposta da rede à essas condições:

Figura 8 – Simulação de ataque à estrutura do Blockchain

```
Escolha o nó alvo (n1-n9): n1
Simulando ataque ao nó n1.
Conteúdo do nó antes do ataque: {
  "player_H_energy": 100
}
Conteúdo do nó após o ataque: {
  "player_H_energy": 10000
}
Inconsistência detectada no nó n1. Removendo da blockchain.
Nó n1 removido da blockchain.

Cadeia de Blocos:
[
  {
    "index": 1,
    "timestamp": 1707602468.7281833,
    "transactions": [],
    "previous_hash": "1"
  }
]

Deseja fazer outro ataque? (Sim/Não): Não
```

Fonte: (Autoria Própria, 2024).

## 4.2) Comparação da tecnologia Blockchain versus Book and Claim

A metodologia Book and Claim, amplamente adotada no contexto dos certificados de energia renovável e atualmente utilizada na certificação do H2V pela CCEE, possibilita a separação entre a produção de energia limpa e sua entrega física aos consumidores. Os certificados são registrados de forma sistemática em um livro-razão, proporcionando aos consumidores a oportunidade de reivindicar ou adquirir esses certificados para compensar suas emissões de carbono. Essa abordagem busca promover transparência na gestão dos certificados e incentivar a conscientização e participação ativa em práticas sustentáveis.

A distinção significativa entre essa abordagem e o uso de Blockchain reside na segurança e autenticidade da informação registrada. A natureza distribuída e hierárquica das redes Blockchain assegura a virtual imutabilidade dos contratos registrados. Mesmo em caso de um ataque bem-sucedido contra as defesas de um nó, existem cópias idênticas da informação distribuídas pela rede, tornando inviável a exclusão ou edição de blocos. Portanto, essa tecnologia é amplamente empregada em aplicações que requerem simultaneamente segurança robusta e uma estrutura distribuída, como no domínio das criptomoedas.

Além disso, essa descentralização do Blockchain reduziria a atuação de autoridades centrais, promovendo a desintermediação de processos e, conseqüentemente, reduziria o custo das operações, ao reduzir o espaço para manipulações, erros e omissões das grandes empresas geradoras e distribuidoras.

Entretanto, a implementação de uma rede Blockchain acarreta também desvantagens, sendo a principal delas a necessidade de utilizar algoritmos de prova de trabalho (PoW) para a adição de novos blocos à rede, um processo conhecido como "mineração" no contexto de criptomoedas. Esses algoritmos impõem desafios computacionais complexos a máquinas poderosas, demandando considerável esforço computacional, o que resulta no aumento do consumo energético, na redução da vida útil do equipamento e, globalmente, no acréscimo dos custos operacionais e de manutenção de uma rede Blockchain. Além disso, devido a sua estrutura de imutabilidade, operações problemáticas teriam que ser refeitas e não seria possível apagar a operação defeituosa, apenas marcá-la, ficando ambos presentes na estrutura do Blockchain.

## 5) CONCLUSÃO

A certificação da energia renovável tem sido um dos pilares da transição para uma economia de baixo carbono, evitando fraudes e incongruências, permitindo assim que agentes invistam capital de forma segura e confiável nos chamados empreendimentos verdes, acelerando desse modo, o processo de transição energética.

Nesse contexto, estamos diante do desafio de regular o processo de certificação da origem do H<sub>2</sub>, uma das maiores apostas energéticas do Sec XXI. Essa regulação não ocorrerá de forma instantânea, havendo ainda diversas dificuldades técnicas e comerciais no caminho para a consolidação de uma maneira única de classificação.

Todavia apesar das dificuldades, o cenário brasileiro apresenta enorme potencial, pois o país não só é cotado como um candidato ao futuro ranking dos maiores produtores de H<sub>2</sub>V do mundo, mas também possui uma regulação e controle primoroso do mercado energético. Visto que, a CCEE possui a centralização de todos os contratos de energia, tanto nos ambientes de contratação livre quanto regulada, além da entidade já possuir um manual de certificação da origem do H<sub>2</sub> baseada na política de Book and Claim.

Assim, ao associarmos o sistema atual à tecnologia de Blockchain, considerada ferramenta chave para acelerar o processo de descarbonização da economia, por proporcionar rastreabilidade, segurança e rapidez nas transações de energia verde de forma mais eficiente, flexível e transparente, esta tecnologia também possui o diferencial de garantir a imutabilidade de registros através do sistema de livro razão distribuído. Dado este contexto, é possível verificar que ao combinar essas tecnologias ao modelo atual, garantimos um bom grau de confiabilidade, contribuindo para a revolução energética urgente que precisamos.

## REFERÊNCIAS

ACCIONA. **Hidrogênio Verde: Rastreabilidade com blockchain.** 2023. Disponível em: <https://solucoes.acciona-energia.com/hidrogenio-verde/rastreabilidade-com-blockchain/>.

Canal Energia. **Blockchain pode influenciar o mercado de energia renovável?**. 2018. Disponível em <https://www.canalenergia.com.br/artigos/53064423/blockchain-pode-influenciar-o-mercado-de-energia-renovavel>.

Canal Energia. **SAP e GIZ auxiliam empresas brasileiras a exportarem H2 Verde.** 2023. Disponível em <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53240867/sap-e-giz-auxiliam-empresas-brasileiras-a-exportarem-h2-verde>.

CCEE. **Manual para certificação do hidrogênio.** Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. 2023a. Disponível em <https://www.ccee.org.br/documents/80415/919444/Manual%20para%20a%20Certificação%20de%20Hidrogênio%20REV1.1.docx/3b73a55e-3ed3-aeb1-8c92-e6d9c6b8a8d2>.

ENGIE. **Blockchain entra em ação para revolucionar o mercado de energia renovável.** 2020. Disponível em <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/blockchain-energia-renovavel/>.

EPE. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio.** 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/>.

GESEL. **A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil.** 2023. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/livros/>.

GUBAN, Dorottya; MURITALA, Ibrahim Kolawole; ROEB, Martin; SATTLER Christian. **Assessment of sustainable high temperature hydrogen production technologies.** 2020. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 49: pp. 26156-26165.

HUERTA, Laura Sánchez de Rojas. **Certifying green hydrogen's origin through blockchain.** 2021. Thesis (Master thesis), E.T.S. de Ingenieros Informáticos (UPM). Disponível em [https://oa.upm.es/68722/1/TFM\\_LAURA\\_SANCHEZ\\_DE\\_ROJAS\\_HUERTA.pdf](https://oa.upm.es/68722/1/TFM_LAURA_SANCHEZ_DE_ROJAS_HUERTA.pdf)

IBM. **O que é a tecnologia blockchain?**. 2023. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/what-is-blockchain>.

IEA, 2023. **Global Hydrogen Review 2023.** International Energy Agency. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8d434960-a85c-4c02-ad96-77794aaa175d/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

IEA. **Hydrogen production costs by production source.** International Energy Agency. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydrogen-production-costs-by-production-source-2018>. Última atualização em 6 de março de 2020.

IEA. **The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities.** International Energy Agency. 2019. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2803>.

IRENA. **Hydrogen: A renewable energy perspective.** International Renewable Energy Agency. 2019. (Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan). Abu Dhabi.

KAYFECI, Muhammet; KEÇEBAŞ, Ali; BAYAT, Mutlucan. **Chapter 3 - Hydrogen production**. 2019. Pages 45-83. In: Solar Hydrogen Production. Editor(s): Francesco Calise, Massimo Dentice D'Accadia, Massimo Santarelli, Andrea Lanzini, Domenico Ferrero. Academic Press, ISBN 9780128148532, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148532000035>.

MARIN NETO, Antonio José; DA SILVA, Ennio Peres; CAMARGO, João Carlos; NEVES JR., Newton Pimenta; PINTO, Cristiano Da Silva. **Produção de hidrogênio através da reforma-vapor do etanol para aplicações em células a combustível**: Protótipo de primeira geração. 2004. Disponível em: <http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/AGRENER2004/Fscommand/PDF/Wicac/13-\%20AntonioJMarinNeto.pdf>. AGRENER GD 2004 - 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída.

MME. **Programa Nacional do Hidrogênio**. Ministério de Minas e Energia. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogênioRelatriodiretrizes.pdf>

SANTOS, Carlos. **Blockchain no setor elétrico**: aplicações e impactos da tecnologia. 2022. Disponível em: <https://certi.org.br/blog/author/carlos-jose/>

VENTURUS. **Blockchain e a tokenização de certificados de energia renovável**. 2020. Disponível em <https://www.venturus.org.br/blockchain-e-a-tokenizacao-de-certificados-de-energia-renovavel/>.