

# Blockchain na rastreabilidade de I-RECs: segurança em marketplaces digitais

José Roberto Vieira Junior  
j140712@dac.unicamp.br

Marco Amaral Henriques  
maah@unicamp.br

Departamento de Engenharia de Computação e Automação (DCA)  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

## Resumo

*A crescente demanda global por responsabilidade ambiental e iniciativas como a RE100 consolidaram o mercado de Certificados de Energia Renovável (RECs), sendo o I-REC o padrão principal para atestar a origem renovável. O modelo tradicional de validação é realizado por terceiros (off-chain). Em paralelo, a tecnologia Blockchain, com sua descentralização e imutabilidade, emerge como uma infraestrutura promissora para transformar a comercialização desses certificados, resolvendo o problema da dupla contagem. Este estudo compara o modelo tradicional com marketplaces digitais baseados em Blockchain (on-chain). Analisamos como protocolos de tokenização, como o ERC-1155, podem mitigar o risco de dupla contagem ao unificar a unicidade do certificado com a fungibilidade das unidades de energia (MWh). A pesquisa aborda os impactos da descentralização na segurança, liquidez e transparência do mercado. Os resultados preliminares indicam que a integração da Blockchain não só aprimora a segurança contra fraudes, mas também otimiza a emissão, rastreabilidade e transação dos I-RECs.*

**Palavras-Chave** — I-REC, Blockchain, ERC-1155, Certificados de Energia Renovável, Tokenização, Segurança, Marketplaces Digitais.

## 1. Introdução

O setor de energia é intrinsecamente marcado por um monopólio natural na distribuição. Devido à complexa interligação da rede elétrica e à inviabilidade econômica de construir infraestruturas de distribuição dedicadas para cada consumidor individual, a energia que chega ao ponto de consumo é uma mistura indiferenciada da matriz energética total do sistema. Essa característica fundamental impossibilita o consumidor final de rastrear diretamente a origem da eletricidade consumida.

A pressão por sustentabilidade e responsabilidade corporativa tem aumentado significativamente. Empresas globais, alinhadas a compromissos como o RE100 [1] (que visa 100% de energia renovável em suas operações), precisam comprovar que o equivalente à energia foi inserido na rede a partir de fontes limpas.

Para solucionar a impossibilidade de rastreamento físico de energia, pois uma vez que ela entra no sistema ela se mistura, surgiram os Certificados de Energia Renovável (RECs) [2]. Esses certificados atuam como instrumentos contábeis que comprovam a atribuição das características renováveis de uma unidade de energia (1 MWh) à entidade que o adquire.

Historicamente, diferentes padrões regionais foram estabelecidos: Guarantee of Origin (GOs) na Europa, National Systems na Ásia/Reino Unido e RECs nos EUA/Canadá [7], muitas vezes resultando em problemas de não uniformidade. Para resolver essa fragmentação, o padrão I-REC, estabelecido pela International Standard Foundation, foi criado com o objetivo de ser o mais padronizado possível, abrangendo regiões como América Latina e África. No contexto brasileiro, onde aproximadamente 88,2% [8] da matriz é renovável segundo o relatório de 2024, o I-REC representa um pilar crucial para o posicionamento do país como benchmark global em energia limpa.

### 1.1. Objetivos do Estudo

O presente estudo visa analisar a transição e os impactos da aplicação da tecnologia Blockchain no processo de comercialização e validação dos I-RECs. Os objetivos específicos incluem:

- detalhar o processo tradicional (off-chain) de validação do I-REC e identificar seus pontos de ineficiência e riscos;
- apresentar os fundamentos da tecnologia Block-

chain (com foco no modelo da blockchain Ethereum [9]) como infraestrutura para Marketplaces Digitais de I-RECs;

- comparar o modelo tradicional com o modelo on-chain em termos de segurança, transparência e liquidez;
- analisar a aplicabilidade e os benefícios do padrão de tokenização ERC-1155 [6] na representação digital dos I-RECs, focando na prevenção da dupla contagem.

## 2. Certificados de energia renovável (RECs) e o padrão I-REC

### 2.1. Modelos de Certificação Regionais e a Padronização I-REC

A variedade de mercados de energia limpa levou à criação de sistemas de rastreamento distintos. Enquanto os modelos regionais atendem a necessidades locais, o I-REC Standard foi concebido para ser um sistema globalmente aceito, facilitando o comércio internacional de atributos de energia renovável. Sua estrutura visa a máxima padronização para garantir a credibilidade e a comparabilidade dos certificados em diferentes jurisdições.

### 2.2. O Processo de Validação Off-Chain

No modelo de mercado tradicional, a validade e a exclusividade do I-REC dependem de um sistema centralizado de registro. A emissão é feita mediante a validação dos dados de produção (metadados) por entidades terceirizadas e credenciadas, como o Instituto TOTUM [3] (no âmbito nacional) e a EVIDENT [4] (em escala internacional).

Este processo é inerentemente off-chain, ou seja, os dados primários de produção são enviados a essas entidades, que os verificam e, em seguida, registram o certificado em um sistema de registro centralizado. Embora funcional, este modelo pode ser suscetível a:

- lentidão no processo: a dependência de intermediários centralizados introduz fricção e tempo no processo de emissão e transação;
- risco de ponto único de falha: a integridade do sistema depende inteiramente da segurança e da governança da entidade registradora;
- opacidade: a transparência é limitada ao acesso permitido pelos sistemas da entidade.

## 3. Fundamentos da tecnologia blockchain e modelos de implementação

### 3.1. Conceito central: descentralização, hash e estrutura de lista ligada

A Blockchain, originalmente popularizada pelo Bitcoin [5], é uma tecnologia de registro distribuído que se baseia em uma estrutura de lista ligada de blocos de dados. Sua principal inovação reside na descentralização, eliminando a necessidade de uma autoridade central confiável.

Cada bloco de transações é ligado ao anterior através de um hash criptográfico único. A imutabilidade é garantida: qualquer alteração em um bloco requer a alteração subsequente de todos os hashes dos blocos seguintes, o que é computacionalmente inviável em uma rede distribuída e protegida por consenso. Esta infraestrutura oferece uma segurança inerente superior ao registro centralizado.

### 3.2. Blockchain Pública vs. Permissionada

A escolha da plataforma Blockchain é fundamental para a criação de um Marketplace Digital de I-RECs:

- Pública (Ex: Ethereum)
  - acesso: aberto a qualquer indivíduo (transparência total);
  - transparência: máxima, com transações visíveis publicamente;
  - descentralização: máxima, com governança distribuída;
  - aplicação: ideal para marketplaces, liquidez e transparência.
- Permissionada (Ex: Hyperledger)
  - acesso: restrito a participantes convidados e verificados (KYC);
  - transparência: bisível apenas para os participantes da rede;
  - descentralização: moderada com governança controlada pelos membros;
  - aplicação: ideal para rastreamento interno de grandes corporações.

No contexto de Marketplaces Digitais de I-RECs, o uso de uma blockchain pública (como Ethereum ou suas soluções de escalabilidade como a Polygon [10]) é preferível, dada a necessidade de ampla liquidez e máxima transparência para o mercado global.

### 3.3. Soluções de Escalabilidade: Layer 2 (L2) e a redução de custos

A Ethereum, a segunda maior blockchain pública, oferece robustez e uma poderosa máquina virtual (Ethereum Virtual Machine - EVM) que é capaz de executar contratos inteligentes. Contudo, historicamente, enfrentou altos custos e baixa velocidade de confirmação de transações.

A solução veio com as soluções de camada 2 (Layer 2 - L2), como a Polygon (antiga Matic). As L2s processam milhões de transações fora da rede principal, mas garantem a segurança ao periodicamente agrupar e enviar apenas o hash dessas transações para a rede Ethereum principal. Este método permite que Marketplaces de I-RECs executem até 26 milhões de transações antes de subir na rede principal, em contrapartida no mesmo tempo a Ethereum teria produzido 150 blocos, com custos reduzidos, mantendo o elevado grau de segurança da Ethereum.

## 4. Blockchain na tokenização de I-RECs: Protocolos e segurança

### 4.1. Proposta de normas ERC e máquinas virtuais Etheruem (EVM)

Os ERCs (Ethereum Request for Comments) são padrões técnicos que definem as regras, melhoria, usabilidade, segurança e interoperabilidade para a criação de tokens em blockchains compatíveis com a EVM. Eles garantem que os tokens sejam interoperáveis e seguros dentro do ecossistema.

### 4.2. Padrões de tokenização ERC-20, ERC-721 e a escolha do ERC-1155

A representação digital de um I-REC exige um padrão que equilibre a unicidade do certificado com a fungibilidade das unidades de energia:

- ERC-20, fungível (tokens idênticos e divisíveis). Não mantém a unicidade do certificado.
- ERC-721 não-Fungível (NFT). Cada token é único. Ideal para representar o certificado como um item único, torna-se inflexível, pois o token não pode ser dividido.
- ERC-1155 multi-Token (Híbrido). Permite gerenciar tokens fungíveis e não-fungíveis no mesmo contrato.

A escolha do ERC-1155 permite que a identidade do I-REC seja única e imutável (característica não-fungível), enquanto o volume de MWh atrelado pode ser negociado em frações (característica fungível), cumprindo a necessidade do mercado.

### 4.3. Estrutura de dados do I-REC tokenizado

Ao utilizar o ERC-1155, o token I-REC carrega um conjunto de metadados cruciais dentro do contrato inteligente (smart contract), garantindo a rastreabilidade e prevenindo a fraude mais crítica do setor: a dupla contagem. Os elementos incorporados para o marketplace incluem:

- ID único do certificado;
- fonte de produção (local e gerador);
- energética (eólica, solar, etc.);
- quantidade produzida (MWh);
- data da criação;
- data de expiração ou Aposentadoria (garantindo o uso dentro do prazo).

A imutabilidade desses dados na blockchain assegura que o certificado, uma vez emitido, não possa ser alterado ou vendido a múltiplos compradores simultaneamente.

## 5. Análise comparativa e implicações na segurança

A Tabela 1 estabelece um contraste fundamental entre o modelo tradicional (off-chain) e os marketplaces digitais (on-chain), revelando não apenas uma mudança de plataforma, mas uma revolução na infraestrutura de confiança do mercado de I-RECs. As implicações dessa transição são profundas, afetando a segurança, a eficiência e o acesso.

O risco de dupla contagem, do modelo tradicional e reduzido por auditorias centralizadas que tem custos, é essencialmente eliminado no modelo on-chain. A utilização de tokenização (ERC-1155) transforma cada I-REC em um ativo digital único e não fungível ou semifungível. A imutabilidade da blockchain garante que, uma vez que um I-REC é emitido e registrado, seu histórico de propriedade (e sua subsequente "aposentadoria") é permanente e à prova de adulteração. Essa segurança é criptográfica, distribuída e auditável por toda a rede, superando a dependência da governança ou da integridade de qualquer intermediário central.

Tabela 1: Comparativo: mercado tradicional vs. marketplaces digitais

Característica	Modelo tradicional (off-chain)	Marketplaces digitais (on-chain)
Risco de dupla contagem	Presente, mitigado por auditorias centralizadas.	Mínimo, mitigado pela criptografia e imutabilidade da Blockchain (tokenização ERC-1155).
Transparência	Limitada. Dependente dos sistemas do Registrador Central.	Máxima. Todas as transações registradas publicamente na blockchain.
Liquidez e Acesso	Baixa. Alto atrito e tempo para emissão/transferência.	Alta. Negociação 24/7, baixo atrito, transferências quase instantâneas.
Custo de Transação	Alto (taxas de intermediários e registrados).	Baixo (otimização por L2, eliminando múltiplos intermediários).
Segurança contra Fraude	Depende da governança do intermediário.	Criptográfica, distribuída e auditável por toda a rede.

A transição para marketplaces on-chain injeta transparência no mercado ao permitir que qualquer participante verifique publicamente o histórico de emissão e de propriedade de cada I-REC. O aumento da liquidez é um impacto direto da desintermediação e da automação via smart contracts, o que, por sua vez, pode tornar o mercado de I-RECs mais acessível a pequenos produtores e compradores, democratizando a participação na economia de energia limpa.

## 6. Conclusão

A análise demonstra que a tecnologia Blockchain, particularmente através de soluções L2 na Ethereum e do protocolo ERC-1155, possui o potencial de superar as limitações de eficiência, transparência e segurança do modelo tradicional de comercialização de I-RECs. A tokenização transforma o I-REC em um ativo digital rastreável e não-fraudável, combatendo o problema da dupla contagem de forma criptográfica e descentralizada. Os futuros estudos devem focar na análise de custo-benefício da migração, na regulamentação dos tokens de sustentabilidade e na consolidação das melhores práticas de segurança de informação para Marketplaces de energia renovável.

## Agradecimentos

Os autores reconhecem o apoio prestado a este trabalho pelo Grupo Neoenergia e TERMOPERNAMBUCO S.A., no âmbito do Projeto de Pesquisa Aneel PD-00290-0055/2024, financiado do Fundo de P&D da ANEEL. A execução contou com a participação do CPQD.

## Referências

- [1] “Climate group re100,” <https://www.there100.org/>, (acessado em 17/08/2025).
- [2] International Attribute Tracking Standard, “International rec standard foundation,” <https://www.trackingstandard.org/i-rec-standard-foundation-finalizes-mou-with-rcreee/>, (acessado em 21/08/2025).
- [3] Instituto Totum, “Instituto totum,” <https://institutototum.com.br/>, (acessado em 21/08/2025).
- [4] Evident Global, “Certifying the world’s clean economy.” <https://evident.global/>, (acessado em 21/08/2025).
- [5] S. Nakamoto, “Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system,” <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>, (acessado em 21/08/2025).
- [6] Ethereum Foundation, “Erc-1155 multi-token standard,” <https://ethereum.org/pt-br/developers/docs/standards/tokens/erc-1155/>, (acessado em 21/08/2025).
- [7] bramoenergy, “Energy attribute certificates: Supporting the shift to sustainable energy,” <https://www.bramoenergy.com/energy-attribute-certificates-supporting-the-shift-allowbreak-to-sustainable-energy>, (acessado em 21/08/2025).
- [8] E. de Pesquisa Energética, “Epe publica o relatório síntese do balanço energético nacional 2025,” <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/>

- epe-publica-o-relatorio-sintese-do-balanco-energetico\ allowbreak-nacional-2025?, (acessado em 21/08/2025).
- [9] V. Buterin, “A next generation smart contract & decentralized application platform,” <https://whitepaper.io/document/5/ethereum-whitepaper>, (acessado em 21/08/2025).
- [10] Foundation, <https://polygon.technology/>, (acessado em 21/08/2025).