

Balanco social digital e a era do ESG: transparência algorítmica como mecanismo de governança no setor sucroenergético.

Digital social balance sheet and the ESG era: algorithmic transparency as a governance mechanism in the sugar and ethanol sector.

El balance social digital y la era ESG: la transparencia algorítmica como mecanismo de gobernanza en el sector del azúcar y el etanol.

Como citar:

Penedo, Antonio S. T. & Pereira, Vinicius S. (2026). Balanço Social Digital e a Era do ESG: transparência algorítmica como mecanismo de governança no setor sucroenergético. Revista Gestão & Tecnologia, vol. 26, nº 2, p: 322-346

Antonio Sergio Torres Penedo, Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de São Carlos. Professor Adjunto III da Universidade Federal de Uberlândia - UFU
<http://orcid.org/0000-0001-7763-8457>

Vinicius Silva Pereira, Doutor em Administração pela Fundação Getúlio Vargas – FGV. Professor da Faculdade de Gestão e Negócios (FAGEN) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
<https://orcid.org/0000-0002-4521-9343>

"Os autores declaram não haver qualquer conflito de interesse de natureza pessoal ou corporativa, em relação ao tema, processo e resultado da pesquisa".

Editor Científico: José Edson Lara
Organização Comitê Científico
Double Blind Review pelo SEER/OJ
Recebido em 09/02/2026
Aprovado em 20/06/2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution – Non-Commercial 3.0 Brazi

Resumo

Objetivo: O artigo tem como objetivo propor a integração dos conceitos de Balanço Social Digital e ESG Digital como um marco inovador de governança socioambiental para o setor sucroenergético brasileiro. Especificamente, o trabalho busca propor e avaliar ex-ante um modelo teórico-conceitual que seja capaz de demonstrar a viabilidade de transformar relatórios de sustentabilidade em sistemas dinâmicos e auditáveis.

Metodologia/procedimentos metodológicos: O estudo aborda o *Design Science Research* (DSR) para criar e propor um artefato conceitual tecnológico. A pesquisa foi dividida em quatro etapas interdependentes: revisão sistemática da literatura para diagnosticar limitações dos relatórios vigentes; construção da arquitetura e modelagem estrutural do Balanço Social Digital integrando IoT, IA e Blockchain; avaliação de viabilidade utilizando dados reais do mercado brasileiro no biênio 2022-2023 e estruturação da governança participativa através de plataformas públicas.

Originalidade/Relevância: O trabalho insere-se no gap teórico resultante das limitações e do esgotamento de modelos tradicionais e estáticos de relato socioambiental, como IBASE, ETHOS e GRI. A relevância e originalidade da pesquisa residem na proposição do conceito de "transparência algorítmica", que une a infraestrutura tecnológica para transferir a métrica ESG da autodeclaração humana para a observação autônoma.

Principais resultados: A proposta comprovou que o modelo do Balanço Social Digital supera problemas técnicos, como o "Problema do Oráculo", ao aplicar a Triangulação de Consistência Multimodal, exigindo Assinatura do Sensor, Consistência Geoespacial e Consistência Regulatória antes de registrar as informações na Blockchain.

Contribuições teóricas/metodológicas: A principal contribuição teórica consiste na transposição do paradigma da Teoria da Legitimidade em direção à economia política da governança corporativa, utilizando infraestrutura tecnológica para solucionar a alta assimetria informacional inerente à Teoria da Agência. A integração de camadas de *Zero-Knowledge Proofs* (ZKP) associadas a uma Consortium Blockchain inova ao permitir a comprovação fidedigna de conformidade socioambiental em tempo real.

Contribuições sociais / para a gestão: Para a gestão, o estudo oferece ferramentas ativas de monitoramento em tempo real que preveem riscos socioambientais e impedem, mediante contratos inteligentes, que falhas de fornecedores e externalidades ocultas se convertam em sanções ou em quebra de credibilidade da usina controladora. Socialmente, o modelo favorece a democratização do acesso a essas informações.

Palavras-chaves: ESG Digital; Balanço Social Digital; Transparência Algorítmica; Inteligência Artificial; Blockchain.

Abstract

Objective: This article aims to propose the integration of the concepts of Digital Social Balance Sheet and Digital ESG as an innovative framework for socio-environmental governance in the Brazilian sugarcane and energy sector. Specifically, the work seeks to propose and evaluate ex-ante a theoretical-conceptual model capable of demonstrating the feasibility of transforming sustainability reports into dynamic and auditable systems.

Methodology/methodological procedures: The study employs Design Science Research (DSR) to create and propose a technological conceptual artifact. The research was divided into four interdependent stages: a systematic literature review to diagnose limitations of current reports; construction of the architecture and structural modeling of the Digital Social Balance Sheet integrating IoT, AI, and Blockchain; feasibility assessment using real data from the Brazilian market in the 2022-2023 biennium; and structuring of participatory governance through public platforms.

Originality/Relevance: This work addresses the theoretical gap resulting from the limitations and exhaustion of traditional and static socio-environmental reporting models, such as IBASE, ETHOS, and GRI. The relevance and originality of the research lie in the proposition of the concept of "algorithmic transparency," which unites technological infrastructure to transfer the ESG metric from human self-reporting to autonomous observation.

Main results: The proposal demonstrated that the Digital Social Balance Sheet model overcomes technical problems, such as the "Oracle Problem," by applying Multimodal Consistency Triangulation, requiring Sensor Signature, Geospatial Consistency, and Regulatory Consistency before registering the information on the Blockchain.

Theoretical/methodological contributions: The main theoretical contribution consists of transposing the paradigm of Legitimacy Theory towards the political economy of corporate governance, using technological infrastructure to solve the high informational asymmetry inherent in Agency Theory. The integration of Zero-Knowledge Proofs (ZKP) layers associated with a Consortium Blockchain innovates by enabling reliable proof of socio-environmental compliance in real time.

Social contributions/for management: For management, the study offers active real-time monitoring tools that predict socio-environmental risks and prevent, through smart contracts, supplier failures and hidden externalities from resulting in sanctions or a loss of credibility for the controlling plant. Socially, the model promotes the democratization of access to this information.

Keywords: Digital ESG; Digital Social Balance; Algorithmic Transparency; Artificial Intelligence; Blockchain.

Resumen

Objetivo: Este artículo propone la integración de los conceptos de Balance Social Digital y ESG Digital como un marco innovador para la gobernanza socioambiental en el sector azucarero y energético brasileño. Específicamente, el trabajo busca proponer y evaluar ex ante un modelo teórico-conceptual capaz de demostrar la viabilidad de transformar los informes de sostenibilidad en sistemas dinámicos y auditables.

Metodología/Procedimientos metodológicos: El estudio emplea la Investigación de Diseño Científico (IDC) para crear y proponer un artefacto conceptual tecnológico. La investigación se dividió en cuatro etapas interdependientes: una revisión sistemática de la literatura para diagnosticar las limitaciones de los informes actuales; la construcción de la arquitectura y el modelado estructural del Balance Social Digital, integrando IoT, IA y Blockchain; una evaluación de viabilidad utilizando datos reales del mercado brasileño en el bienio 2022-2023; y la estructuración de la gobernanza participativa a través de plataformas públicas.

Originalidad/Relevancia: Este trabajo aborda la brecha teórica resultante de las limitaciones y el agotamiento de los modelos tradicionales y estáticos de informes socioambientales, como IBASE, ETHOS y GRI. La relevancia y originalidad de la investigación radican en la propuesta del concepto de "transparencia algorítmica", que integra la infraestructura tecnológica para transferir la métrica ESG del autoinforme humano a la observación autónoma.

Resultados principales: La propuesta demostró que el modelo de Balance Social Digital supera problemas técnicos, como el "Problema del Oráculo", mediante la aplicación de la Triangulación de Consistencia Multimodal, que requiere Firma Sensorial, Consistencia Geoespacial y Consistencia Regulatoria antes de registrar la información en la Blockchain.

Contribuciones teóricas/metodológicas: La principal contribución teórica consiste en transponer el paradigma de la Teoría de la Legitimidad a la economía política del gobierno corporativo, utilizando la infraestructura tecnológica para resolver la alta asimetría de información inherente a la Teoría de la Agencia. La integración de capas de Pruebas de Conocimiento Cero (ZKP) asociadas a una Blockchain de Consorcio innova al permitir una prueba fiable del cumplimiento socioambiental en tiempo real.

Contribuciones sociales / para la gestión: Para la gestión, el estudio ofrece herramientas de monitorización activa en tiempo real que predicen los riesgos socioambientales y previenen, mediante contratos inteligentes, que los fallos de los proveedores y las externalidades ocultas deriven en sanciones o una pérdida de credibilidad para la planta controladora. Socialmente, el modelo promueve la democratización del acceso a esta información.

Palabras clave: ESG digital; Balance social digital; Transparência algorítmica; Inteligencia artificial; Blockchain.

1. Introdução

A sustentabilidade estabeleceu-se como um princípio estruturante do desenvolvimento contemporâneo, apoiada nos pilares econômico, social e ambiental. Nesse contexto, a prestação de contas das organizações à sociedade evoluiu progressivamente de demonstrações financeiras para complexos ecossistemas de reporte socioambiental. No Brasil, essa trajetória foi marcada pela adoção de modelos como o Balanço Social (IBASE), os Indicadores ETHOS e as diretrizes da Global Reporting Initiative (GRI), que buscaram dar visibilidade às ações empresariais e alinhar as práticas nacionais aos padrões globais de transparência.

Entretanto, ao observar o setor sucroenergético brasileiro (ou sucroalcooleiro), emergem profundas contradições entre o discurso institucional e a prática operacional. Por um lado, o setor posiciona-se como protagonista da transição energética, destacando o etanol como uma alternativa renovável estratégica para a matriz energética. Por outro lado, o complexo agroindustrial enfrenta severas denúncias relacionadas a condições degradantes de trabalho, desigualdade salarial e graves impactos ecológicos, como o desmatamento e o uso intensivo de agrotóxicos.

Essa ambivalência expõe as limitações intrínsecas dos modelos de relato tradicionais. A literatura aponta que instrumentos como o IBASE, GRI e ETHOS falham ao permitir relatórios estáticos, seletivos e focados na gestão da imagem, enfatizando predominantemente as "boas notícias" empresariais e ocultando externalidades negativas. Sob a ótica da Teoria da Agência, estabelece-se uma assimetria de informação crítica entre o Principal (investidores, reguladores e sociedade) e o Agente (gestores das usinas), gerando incentivos para um relato oportunista e para a prática de greenwashing. Complementarmente, a Teoria dos Custos de Transação evidencia que métodos convencionais, como auditorias amostrais em vastas áreas rurais, impõem custos proibitivos e inviabilizam uma fiscalização constante (Boller et al., 2025).

Diante do esgotamento do relato puramente voluntário e autodeclaratório, o desafio contemporâneo reside na transição para o paradigma do ESG Digital através de um Balanço Social Digital, integrando cada vez mais a IA aos modelos de negócios baseados em plataformas (Nevi et al., 2025). Para preencher o hiato de confiança existente, torna-se imperativa a adoção de uma infraestrutura técnica fundamentada na "transparência

algorítmica". A integração de ferramentas como Inteligência Artificial (IA), Big Data e Internet das Coisas (IoT) permite o monitoramento contínuo e preditivo de variáveis críticas, como emissões de gases e segurança ocupacional, transferindo o ônus da métrica para a observação autônoma — um fator decisivo na melhoria do desempenho ESG (Li, 2026). Simultaneamente, a tecnologia Blockchain atua como um livro-razão descentralizado, garantindo a imutabilidade e a verificabilidade criptográfica das informações.

Para guiar o desenvolvimento, a avaliação e o refinamento do artefato proposto sob a ótica da DSR, o modelo foi estruturado a partir das seguintes Proposições de Design (Design Propositions - DP), fundamentadas nos requisitos do ambiente e nos conceitos teóricos macro:

- Proposição de Design 1 (DP1 - Eficiência Informacional): A arquitetura do Balanço Social Digital deve integrar Inteligência Artificial e Blockchain para automatizar e descentralizar o fluxo informacional, atuando como um mecanismo capaz de reduzir a assimetria de informação entre as corporações sucroenergéticas (agentes) e seus stakeholders (principais).
- Proposição de Design 2 (DP2 - Otimização de Custos): O artefato deve incorporar sistemas de monitoramento contínuo via IoT e motores de auditoria automatizada por IA para reduzir os custos de transação e de monitoramento manual, viabilizando o enforcement constante da conformidade socioambiental na cadeia produtiva.
- Proposição de Design 3 (DP3 - Integridade e Confiabilidade): A infraestrutura tecnológica do artefato deve basear-se em um modelo de Blockchain de Consórcio e provas de conhecimento zero (ZKP) para garantir a imutabilidade e a descentralização dos registros, mitigando o risco moral e o greenwashing ao converter o discurso de sustentabilidade em um ativo reputacional auditável.

Portanto, a questão central que norteia este estudo é: como a integração tecnológica pode transformar os relatórios de sustentabilidade em sistemas dinâmicos e auditáveis, capazes de mitigar o risco moral e validar a cidadania empresarial? O objetivo deste artigo é propor e avaliar ex-ante um modelo teórico-conceitual que une os fundamentos do Balanço Social aos preceitos do ESG Digital. Utilizando IA e Blockchain, o estudo busca demonstrar a viabilidade e a utilidade do artefato frente às Proposições de Design estabelecidas, visando reduzir a assimetria informacional, legitimar as práticas de governança e reposicionar o setor sucroenergético como referência em sustentabilidade.

A evolução da prestação de contas corporativa baseou-se em modelos como IBASE, GRI e ETHOS, que, por serem estáticos e fundamentados em dados autodeclarados, mostraram-se

vulneráveis à seletividade de informações (cherry-picking), dinâmica na qual as empresas evidenciam as 'boas notícias' e omitem impactos negativos (Marquis, Toffel, & Zhou, 2016), resultando frequentemente em práticas de greenwashing.

2. Referencial Teórico

2.1 *Da Legitimidade Institucional ao ESG Digital: Evolução e Limitações do Relato Socioambiental*

A prestação de contas socioambiental corporativa foi historicamente analisada sob a ótica da Teoria da Legitimidade (Suchman, 1995), materializando-se em instrumentos que visavam alinhar as ações da empresa às expectativas sociais. Contudo, a natureza voluntária desses relatórios fomenta a seletividade da informação (Marquis, Toffel, & Zhou, 2016), fragilizando a sua eficácia como ferramenta de governança. O IBASE, criado na década de 1990, foi pioneiro ao promover uma padronização para dar visibilidade às ações sociais. Posteriormente, o modelo GRI trouxe parâmetros comparáveis em nível global, enquanto o ETHOS enfatizou a ética corporativa e o relacionamento com stakeholders no contexto nacional.

Apesar do mérito na institucionalização da transparência, esses modelos tradicionais revelaram fragilidades estruturais severas. A literatura aponta que a natureza voluntária e estática desses relatórios fomenta a seletividade da informação (cherry-picking) e prejudica a avaliação profunda e ética dos relatórios de sustentabilidade (Degregori et al., 2026), na qual as empresas evidenciam as "boas notícias" e omitem impactos negativos de sua operação. No setor sucroenergético, essa dinâmica permitiu a construção de uma "gestão da imagem" que frequentemente ocultou a degradação ambiental da monocultura e a precarização do trabalho manual.

Essa insuficiência propiciou a evolução do debate para o paradigma ESG (Environmental, Social, and Governance), transformando a sustentabilidade de uma ferramenta de relações públicas em um critério basilar de alocação de capital e avaliação de risco. Contudo, mesmo com frameworks modernos, como o SASB e o ISSB, persiste uma dependência crítica de dados autodeclarados e auditorias amostrais, configurando um vácuo regulatório que permite táticas sofisticadas de conformidade simbólica e greenwashing.

2.2 *Teoria da Agência e Custos de Transação: A Assimetria Informacional no Setor Sucroenergético*

Para compreender as limitações estruturais do relato voluntário, é necessário transpor a Teoria da Legitimidade em direção à economia política da governança corporativa. Sob as lentes da Teoria da Agência, a cadeia sucroenergética caracteriza-se por uma profunda assimetria de informação entre o Principal (investidores, reguladores e sociedade civil) e o Agente (gestores das usinas). O Agente detém o monopólio da informação sobre suas externalidades operacionais, o que gera incentivos econômicos perversos para a retenção de dados críticos e o exercício de atitudes oportunistas na divulgação ESG.

Ancorado na Teoria da Agência (Jensen & Meckling, 1976), este estudo investiga como as tecnologias emergentes atuam para mitigar assimetrias de informação entre agentes corporativos e stakeholders, onde o risco moral e o oportunismo gerencial podem ocultar externalidades negativas. Complementarmente, a Teoria dos Custos de Transação (Williamson, 1981) explica a falha dos mecanismos tradicionais de auditoria rural, demonstrando a inviabilidade econômica e as limitações do enforcement manual constante nas vastas cadeias do agronegócio. A complexidade e a fragmentação produtiva do agronegócio tornam a realização de auditorias amostrais em vastas áreas rurais um processo de fiscalização com custos proibitivos (enforcement). Essa ineficiência inviabiliza a auditoria constante e mantém o reporte vulnerável a subjetividades, dificultando a monetização de ativos ambientais (como os títulos verdes e o programa RenovaBio) que demandam avaliações independentes rigorosas.

2.3 *Tecnologias Emergentes e a Arquitetura da Transparência Algorítmica*

A superação da miopia das auditorias amostrais e da assimetria de informação demanda a transição para o ESG Digital, consubstanciado na "transparência algorítmica". Esse conceito baseia-se na convergência de tecnologias emergentes — que já vêm demonstrando seu valor na integração de IA e Blockchain para a sustentabilidade de sistemas logísticos e de mobilidade urbana (Aslam et al., 2026; Badr et al., 2026) — para transferir a responsabilidade da coleta de dados do relato humano retrospectivo para a observação algorítmica autônoma.

Nesse arranjo, o uso de dispositivos de Internet das Coisas (IoT) viabiliza o monitoramento contínuo e em tempo real de emissões de gases, consumo hídrico e segurança ocupacional nas usinas. Simultaneamente, o Big Data e a Inteligência Artificial (IA) — em especial as Redes Neurais Convolucionais (CNNs) aplicadas a imagens de satélite — permitem análises preditivas e o monitoramento autônomo de supressão vegetal (ILUC) e queimadas, eliminando o viés da autodeclaração (Tawiah et al., 2025).

Para garantir a integridade dessas informações (dimensões Social e Governança), a tecnologia Blockchain atua como a espinha dorsal do sistema, funcionando como um livro-razão criptográfico que assegura a imutabilidade dos dados. Por meio de contratos inteligentes (smart contracts), métricas de conformidade tornam-se rastreáveis, permitindo disparar travas financeiras imediatas em caso de infrações. Entretanto, para evitar o risco de "greenwashing algorítmico" e mitigar o "Problema do Oráculo" (onde dados fraudulentos podem ser inseridos na origem), a rede Blockchain não deve ser privada, mas operada em um modelo de Consórcio (Consortium Blockchain). Esse modelo exige uma governança distribuída e multistakeholder, integrando usinas, órgãos reguladores e ONGs para atuar na verificação e resolução de conflitos algorítmicos. Além disso, o uso da arquitetura de Zero-Knowledge Proofs (ZKP) desponta como recurso essencial para comprovar matematicamente o cumprimento de padrões ESG rigorosos sem expor segredos industriais ou dados sensíveis da operação, garantindo transparência auditável em mercados de alta assimetria.

Embora a literatura reconheça a tecnologia Blockchain como um meio de garantir a imutabilidade dos registros, é imperativo distinguir a 'integridade do registro' da 'veracidade da fonte'. O chamado 'Problema do Oráculo' (Beniiche, 2020) alerta que o registro de dados fraudulentos na origem, uma vez inseridos na rede, torna a fraude imutável. Portanto, a eficácia do ESG Digital não reside apenas na descentralização do armazenamento, mas na robustez dos mecanismos de entrada de dados. Para mitigar o risco de Garbage In, Garbage Out (GIGO), o modelo proposto não confia cegamente em sensores isolados, mas estabelece uma 'camada de pré-validação algorítmica'. Nesta camada, a convergência de múltiplas fontes — satélites, sensores IoT e dados de mercado — atua como um sistema de pesos cruzados que valida a

consistência da informação antes que ela seja transacionada como um registro final na Blockchain.

O ESG Digital apresenta-se como resposta a essas ineficiências. O modelo demanda a transição para a auditoria contínua baseada em infraestrutura algorítmica e Blockchain (Dai & Vasarhelyi, 2017). A adoção de Inteligência Artificial integrada a redes de sensores (IoT) na agricultura (Smart Farming) (Walter et al., 2017) garante a rastreabilidade da cadeia. No entanto, é fundamental superar o desafio tecnológico conhecido como 'Problema do Oráculo' (Beniiche, 2020), assegurando que o dado capturado em campo e inserido na rede seja um reflexo imutável e autêntico da realidade física.

3. Procedimentos Metodológicos

Para a consecução de seus objetivos, este estudo adota a abordagem de Design Science Research - DSR (Hevner et al., 2004), caracterizando-se como um ensaio teórico focado na criação e proposição de um artefato conceitual tecnológico para o setor sucroenergético. Essa metodologia é adequada para pesquisas que buscam resolver problemas práticos e complexos organizacionais por meio da criação e avaliação rigorosa de um artefato tecnológico inovador — neste caso, o modelo conceitual do Balanço Social Digital integrado ao ESG Digital. A pesquisa estrutura-se em quatro etapas interdependentes:

A primeira etapa da metodologia fundamenta-se em uma rigorosa revisão sistemática da literatura, estruturada para mapear a evolução do conceito de responsabilidade social corporativa, desde o modelo do Balanço Social tradicional até a emergente era do ESG Digital. O objetivo central deste levantamento é diagnosticar as limitações estruturais dos modelos vigentes, frequentemente baseados em narrativas retrospectivas, dados fragmentados e alta suscetibilidade a vieses de relato humano. A análise crítica dessas falhas permite compreender a necessidade urgente de migrar para sistemas de evidenciação contínua e tecnologicamente auditáveis. A partir desse diagnóstico, define-se a base conceitual e operacional de indicadores socioambientais que sustentarão o modelo. A seleção destas métricas não é arbitrária; ela ocorre através da convergência entre o histórico brasileiro de prestação de contas — consolidado pelo IBASE, pelos indicadores do Instituto ETHOS e pelas diretrizes da Global Reporting Initiative

(GRI) — e as exigências contemporâneas dos padrões globais de sustentabilidade, como o Sustainability Accounting Standards Board (SASB) e as normas do International Sustainability Standards Board (ISSB). Essa integração normativa é submetida a um processo de adaptação rigoroso para atender às particularidades do setor sucroenergético, um segmento de alta complexidade que exige métricas específicas sobre uso da terra, eficiência hídrica, balanço de emissões em ciclos de vida (ACV) e condições laborais em ambientes rurais e industriais. Ao alinhar a tradição do Balanço Social brasileiro com os padrões internacionais, a etapa assegura a comparabilidade histórica dos dados, permitindo que a transição para a era digital não resulte em perda de memória corporativa. Simultaneamente, essa robustez normativa eleva a qualidade da informação, transformando métricas que antes eram descritivas em dados estruturados, prontos para serem integrados a sistemas automatizados de auditoria e conformidade, garantindo assim que a base de indicadores seja não apenas alinhada às melhores práticas globais, mas também tecnicamente preparada para a era da transparência radical.

A segunda etapa da metodologia, denominada Construção do Artefato Tecnológico, concentra-se na arquitetura e modelagem estrutural do "Balanço Social Digital". Esta etapa transcende a simples digitalização de processos existentes, propondo uma reengenharia radical na forma como a responsabilidade socioambiental é mensurada, processada e legitimada. O design deste artefato é pautado pela integração vertical de métricas fundamentais com tecnologias de ponta, criando um ecossistema de confiança algorítmica. Neste estágio, o sistema é desenhado para operar como uma plataforma autônoma, na qual a Internet das Coisas (IoT) atua na fronteira da coleta de dados primários. Através da implementação de uma rede de sensores distribuídos e dispositivos conectados, o sistema captura eventos de conformidade diretamente da fonte — seja no monitoramento remoto de áreas agrícolas, na telemetria de processos industriais ou na análise de fluxos logísticos — eliminando a dependência do relato humano retrospectivo e mitigando drasticamente o risco de manipulação ou omissão de dados. A inteligência operacional é potencializada pela aplicação de Inteligência Artificial, com destaque para as Redes Neurais Convolucionais (CNNs), que permitem o processamento de grandes volumes de dados não estruturados, como imagens de satélite e fluxos de vídeo, convertendo observações físicas em indicadores quantitativos precisos e validados em tempo

real. Simultaneamente, a integridade desta cadeia de dados é assegurada por uma camada de segurança robusta, fundamentada na tecnologia Blockchain. Para viabilizar a governança multisetorial, o artefato é estruturado em formato de consórcio multistakeholder, no qual diferentes agentes — como empresas, órgãos reguladores e entidades da sociedade civil — participam como nós validadores da rede. Este modelo transforma a Blockchain em um livro-ração imutável e descentralizado, onde cada registro socioambiental torna-se um ativo digital auditável. A arquitetura é finalizada com a implementação de smart contracts, que automatizam a verificação de conformidade baseada em regras pré-estabelecidas e consensuadas. Quando os dados capturados via IoT e processados pela IA atingem os parâmetros normativos, os contratos inteligentes executam automaticamente a validação da conformidade ou a emissão de ativos de sustentabilidade, eliminando a burocracia e garantindo que o ciclo de reporte seja transparente, instantâneo e à prova de adulterações. Esta convergência entre IoT, IA e Blockchain converte o Balanço Social Digital em um padrão ouro de transparência, onde a validade da informação não reside na autoridade de quem a emite, mas na veracidade criptográfica do protocolo que a sustenta.

A terceira etapa da metodologia propõe a avaliação de viabilidade do artefato por meio de uma triangulação algorítmica baseada em dados reais do mercado brasileiro, afastando-se de simulações teóricas para garantir replicabilidade e rigor científico. O processo de validação ex-ante é estruturado em um fluxo contínuo de três fases interconectadas: processamento de linguagem natural (NLP), geoprocessamento e aplicação de regras de decisão. Na primeira fase, realiza-se a ingestão e o processamento de uma amostra intencional de 10 relatórios de sustentabilidade (padrões GRI e SASB) do biênio 2022-2023, referentes a usinas de capital aberto listadas na B3 e ativas no programa RenovaBio. Utilizando a biblioteca spaCy em Python, o algoritmo realiza a extração automatizada de autodeclarações socioambientais através da busca por palavras-chave e n-grams específicos, tais como "desmatamento zero", "conservação da biodiversidade" e "preservação de APP/Reserva Legal". A segunda fase concentra-se na extração de coordenadas e integração de APIs geoespaciais. A partir das declarações identificadas, o sistema mapeia as unidades produtivas correspondentes e extrai os perímetros das propriedades rurais cadastradas no SICAR. Este método cruza as

autodeclarações com evidências físicas independentes, processando os polígonos das fazendas (shapefiles ou GeoJSON) via APIs conectadas ao monitoramento do MapBiomas e aos alertas do sistema DETER/PRODES do INPE. Complementarmente, integram-se dados de eficiência energético-ambiental provenientes da ANP para compor o perfil detalhado da usina. A terceira fase estabelece regras de decisão algorítmica para a detecção de greenwashing, aplicando uma lógica binária para identificar inconsistências materiais. O motor de inferência opera através de duas condições: a Condição A (Autodeclaração), onde a usina afirma em seu relatório a ausência de supressão vegetal, e a Condição B (Evidência Física), onde o cruzamento geoespacial detecta a perda de cobertura nativa superior a 1 hectare dentro dos polígonos associados. Caso ambas as condições sejam verdadeiras, o sistema dispara um hash de inconsistência material, permitindo que a infraestrutura demonstre, de forma automatizada, como as falhas de evidenciação de mercado poderiam ser mitigadas. Para consolidar os parâmetros e variáveis desta amostra piloto, a Tabela 1 detalha as configurações técnicas utilizadas na avaliação:

Tabela 1

Parâmetros da Amostra e Configurações de Triangulação de Dados

Critério / Parâmetro	Descrição e Valores Utilizados na Avaliação
Amostra de Usinas	5 usinas do setor sucroenergético, de capital aberto (listadas na B3) e ativas no RenovaBio.
Janela Temporal	Relatórios e imagens de satélite referentes ao biênio 2022-2023.
Volume Documental	10 Relatórios de Sustentabilidade (GRI/SASB), totalizando aprox. 850 páginas.
Bases Geoespaciais	INPE (PRODES/DETER) e MapBiomas (Coleção 8.0). Resolução de 30 metros.
Bases Regulatórias	Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR) e Painel Dinâmico do RenovaBio (ANP).
Limiar de Inconsistência	Supressão de vegetação nativa $\geq 1,0$ hectare não declarada no relatório.
Software/Linguagem	Python 3.10 (spaCy para NLP; GeoPandas e Rasterio para geoprocessamento).

A quarta etapa da metodologia propõe a estruturação da transparência e da governança participativa por meio da implementação de dashboards interativos e sistemas de acesso público, permitindo que a tecnologia facilite uma validação cruzada contum. Esse processo visa envolver ativamente comunidades locais, trabalhadores, órgãos reguladores e investidores,

validando o modelo não apenas como uma ferramenta técnica, mas como um mecanismo político-institucional de fiscalização compartilhada e legitimidade corporativa. Para conferir o rigor exigido pela abordagem Design Science Research (DSR), o artefato, denominado modelo de Balanco Social Digital integrado ao ESG Digital, foi instanciado mediante uma arquitetura multicamadas, sendo avaliado conforme as diretrizes de Hevner et al. (2004) por meio da triangulação de dados secundários reais do biênio 2022-2023, o que permitiu confrontar a lógica do algoritmo com falhas de evidenciação de mercado e confirmar se os requisitos de design (DP1, DP2 e DP3) foram devidamente atendidos. Essa arquitetura articula-se em quatro camadas interdependentes que garantem a transição segura do dado bruto até o registro imutável. A Camada de Captura e Telemetria (IoT) é responsável pela coleta automatizada de dados primários, eliminando o viés do relato humano ao integrar imagens de satélite, sensores de monitoramento contínuo de emissões e dados de segurança operacional. Para mitigar adulterações físicas, os dispositivos utilizam Módulos de Segurança de Hardware (HSM) ou Trusted Execution Environments (TEE), que conferem uma identidade criptográfica única a cada sensor e assinam os dados na borda. Em seguida, a Camada de Processamento e Auditoria utiliza o Oráculo ESG para direcionar os fluxos a motores de inferência e Redes Neurais Convolucionais (CNNs), que realizam a análise geoespacial automatizada para classificar o uso do solo, detectar desmatamentos ou queimadas, prever passivos de emissões e monitorar a conformidade laboral em tempo real.

Para contornar o entrave da exposição de segredos industriais, a Camada de Validação e Privacidade implementa protocolos de Zero-Knowledge Proofs (ZKP), como os zk-SNARKs. Essa tecnologia gera uma prova matemática irrefutável de que a usina atingiu determinada métrica de conformidade sem a necessidade de expor dados comerciais sensíveis, faturamento ou capacidade instalada. Por fim, a Camada de Consenso e Registro opera sob uma Consortium Blockchain, onde a prova criptográfica é enviada a smart contracts executados em uma rede distribuída entre stakeholders, como usinas, agências reguladoras e representantes da sociedade civil. O consenso coletivo valida a transação e grava o indicador socioambiental em um livro-razaõ imutável, gerando um hash público auditável que fundamenta a emissão confiável de ativos de sustentabilidade, como Créditos de Descarbonização (CBIOS) ou green bonds.

A integração entre as camadas de processamento e a rede blockchain altera fundamentalmente a percepção de risco dos investidores ao transformar a confiança na marca em confiança matemática e verificável. Em modelos tradicionais de reporting ESG, o investidor baseia sua decisão de alocação de capital em relatórios estáticos, auditados por terceiros e suscetíveis a assimetrias de informação ou omissões estratégicas, o que cria um "prêmio de risco de greenwashing" — um desconto que o mercado aplica aos ativos devido à incerteza sobre a real performance socioambiental.

Quando o sistema automatiza a coleta via IoT e a validação o via Zero-Knowledge Proofs, o risco deixa de ser operacional ou de integridade para ser puramente de mercado. Ao auditar dados brutos em tempo real e gravá-los de forma imutável, o artefato elimina a necessidade de o investidor confiar na narrativa da empresa: ele passa a confiar no protocolo e na criptografia que garante que o indicador de sustentabilidade é um reflexo fiel da realidade física observada. A capacidade de provar conformidade sem expor segredos industriais reduz o custo de transação da auditoria, permitindo que green bonds e Créditos de Descarbonização (CBIOs) sejam precificados com maior precisão e liquidez. Para o investidor, essa arquitetura reduz drasticamente o risco de litígios, sanções regulatórias e danos reputacionais súbitos, uma vez que as inconsistências são detectadas e registradas pelo sistema de governança compartilhada muito antes de se tornarem crises públicas. Em última análise, a tecnologia desloca o foco do capital: o investidor passa a priorizar empresas que adotam infraestruturas de evidência radical, pois a imutabilidade do ledger atua como um seguro contra a volatilidade causada pela desinformação, elevando o valor intrínseco de ativos lastreados em evidências criptográficas.

4. Resultados Encontrados

Os resultados da pesquisa demonstram que o modelo supera o chamado "Problema do Oráculo" por meio da implementação da Triangulação de Consistência Multimodal. Nessa arquitetura, o sistema não aceita o input de um sensor individual como verdade absoluta; ao contrário, o motor de inferência baseado em Inteligência Artificial processa o dado coletado

pelo dispositivo IoT cruzando-o, de forma automatizada, com dados de sensoriamento remoto, como o MapBiomas, e registros regulatórios oficiais, a exemplo dos dados da ANP.

A validação da veracidade da informação ocorre através de um modelo de consenso estruturado em três pilares fundamentais. Primeiramente, verifica-se a Assinatura do Sensor, garantindo que o dado seja proveniente de hardware equipado com Módulos de Segurança de Hardware (HSM) autenticados. Em segundo lugar, aplica-se a Consistência Geoespacial, que assegura a compatibilidade entre o dado de campo e as análises de imagens de satélite realizadas pelas Redes Neurais Convolucionais (CNNs). Por fim, observa-se a Consistência Regulatória, que certifica que o dado não apresenta contradições frente às bases públicas, como o CAR e o painel da ANP.

Somente após o cruzamento bem-sucedido destas três camadas é que o contrato inteligente (smart contract) é acionado para realizar o minting do registro imutável na blockchain. Caso o sistema identifique qualquer discrepância — por exemplo, uma situação em que o dispositivo IoT reporte uma colheita dentro da normalidade enquanto o monitoramento por satélite detecta uma supressão vegetal indevida —, a plataforma suspende automaticamente o registro e gera um alerta de inconsistência material para auditoria humana. Esse mecanismo rigoroso de controle impede que informações fraudulentas ou imprecisas sejam validadas pela rede, garantindo a integridade do sistema como um todo.

A avaliação do modelo conceitual demonstrou que a substituição do relato humano retrospectivo pela observação algorítmica é capaz de resolver discrepâncias materiais frequentes nos balanços sociais tradicionais. A triangulação analítica de relatórios de sustentabilidade de usinas, fundamentada nos padrões GRI e SASB, com bases de dados independentes, evidenciou que autodeclarações de "zero desmatamento indireto" (ILUC) frequentemente encontram zonas de atrito quando cruzadas com séries temporais geoespaciais, como as do MapBiomas. Nesse contexto, a aplicação de Inteligência Artificial, especificamente por meio de Redes Neurais Convolucionais (CNNs) processando imagens de satélite, neutralizou essas assimetrias informacionais ao fornecer a detecção autônoma da supressão vegetal. O algoritmo vincula automaticamente as coordenadas das fazendas aos smart contracts

das usinas, garantindo que a conformidade ambiental não dependa de auditorias amostrais custosas e suscetíveis a manipulação, mitigando efetivamente as práticas de greenwashing.

A capacidade de detecção automática da supressão vegetal, ao eliminar a opacidade dos relatórios autodeclarados, impacta diretamente a reclassificação de risco desses ativos, permitindo que os investidores passem de uma abordagem de confiança cega para uma estratégia baseada em evidências em tempo real. Quando o sistema automatizado vincula as coordenadas das fazendas diretamente aos contratos inteligentes, ele converte uma variável anteriormente subjetiva e qualitativa em um dado quantitativo e imutável, o que reduz drasticamente o chamado "prêmio de risco de greenwashing". Na prática, ativos que antes seriam classificados com risco especulativo devido à incerteza sobre a procedência socioambiental da produção passam a ser vistos como ativos de conformidade comprovada, permitindo que as instituições financeiras ajustem suas taxas de juros, garantias e alocações de capital com base em métricas verificáveis. Essa reclassificação altera a dinâmica de mercado, uma vez que o custo do capital torna-se proporcional à integridade demonstrável da cadeia produtiva; usinas que operam sob a égide do monitoramento algorítmico contínuo tornam-se naturalmente mais atraentes para fundos que seguem mandatos rigorosos de ESG, pois o risco de litígio e danos reputacionais associados a descobertas de desmatamento indireto é mitigado pela própria arquitetura do sistema. Como resultado, ocorre uma segregação positiva no setor, onde a transparência radical atua como um diferencial competitivo que valoriza os ativos e aumenta a liquidez, forçando uma convergência de todo o mercado em direção a padrões superiores de governança para evitar a marginalização ou o aumento do custo de financiamento.

Os resultados apontam que o Balanço Social Digital atua de forma integrada e transformadora nos três pilares da sustentabilidade, operacionalizando com eficácia as exigências de frameworks globais como o SASB e o ISSB. Na dimensão ambiental, o uso de sensores de IoT associado ao Machine Learning viabiliza o cálculo preditivo e a aferição em tempo real de emissões de gases de efeito estufa nas chaminés e do balanço hídrico diário. Essa arquitetura transforma dados estáticos em registros criptográficos inalteráveis, com contratos inteligentes configurados para disparar alertas e registrar infrações caso os limites regulatórios sejam ultrapassados, o que permite antecipar riscos ecológicos.

No que tange à dimensão social, a integração tecnológica permite monitorar continuamente práticas laborais e a segurança ocupacional nas frentes de colheita e parques industriais, utilizando visão computacional para aferir o uso de Equipamentos de Proteção Individual. Além disso, infrações trabalhistas cometidas por fornecedores terceirizados geram hashes imutáveis na rede Blockchain que disparam travas financeiras imediatas nos contratos, impedindo que passivos ocultos da cadeia de suprimentos contaminem as métricas da usina controladora, conforme discutido por Daniel et al. (2026). A democratização do acesso a essas informações empodera comunidades locais e trabalhadores, transformando-os em agentes de fiscalização capazes de reduzir desigualdades históricas.

No pilar de governança, a descentralização cria um livro-razão criptográfico que impede manipulações retroativas dos dados socioambientais. O modelo transita de uma governança baseada em promessas fiduciárias para uma confiança baseada em infraestrutura, viabilizando a participação de diferentes stakeholders — como órgãos reguladores, sociedade civil e auditores — na validação dos indicadores, o que legitima as práticas empresariais e eleva o nível de engajamento e a qualidade do processo decisório corporativo, segundo Tumpa e Naeni (2025).

A implementação de modelagens tecnológicas tem provado que a confiabilidade dos dados é capaz de converter o discurso de sustentabilidade em um ativo financeiro tangível. O aprimoramento da gestão preditiva de riscos permite às corporações antecipar crises socioambientais e reduzir, de forma significativa, os custos associados a multas, processos judiciais e danos reputacionais. Do ponto de vista das finanças corporativas, a redução drástica da assimetria informacional fornece a garantia técnica exigida pelos agentes do mercado de capitais. Esse movimento favorece a adoção e a credibilidade de mecanismos associados às "finanças verdes", impulsionando o desempenho ESG.

No setor sucroenergético, onde a monetização via programa RenovaBio exige uma Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA) rigorosa, a transparência algorítmica consolida-se como um diferencial competitivo fundamental. Os registros independentes gerados pelo Balço Social Digital não apenas mitigam o risco de crises corporativas, mas também credenciam as usinas a capturar o greenium — o prêmio verde. Ao substituir a confiança

baseada em declarações voluntárias pela verificabilidade em tempo real, as organizações conseguem acessar linhas de financiamento internacionais subsidiadas e garantir prêmios de risco reduzidos na emissão de títulos verdes (green bonds) e Créditos de Descarbonização (CBIOs).

A viabilidade técnica do Balanço Social Digital esbarra nas barreiras físicas e institucionais características do agronegócio em economias emergentes. Um dos principais desafios apontados pela literatura de governança algorítmica é o chamado "Problema do Oráculo" — o risco de os dados inseridos na Blockchain serem fraudulentos ou enviesados na origem. No setor sucroenergético, esse risco é agravado pela ausência de conectividade (cobertura 4G/5G) nas vastas fronteiras agrícolas, ameaçando a coleta de dados via sensores IoT em tempo real.

Para contornar essa limitação técnica sem depender de conectividade ininterrupta de alta banda, a arquitetura proposta baseia-se em soluções de infraestrutura adaptáveis. Para a telemetria de sensores estáticos, como medidores de umidade e pluviômetros, empregam-se redes de radiofrequência de longo alcance e baixo custo, como LPWAN e LoRaWAN. Essas redes permitem que a própria usina instale antenas com alcance de dezenas de quilômetros para coletar pacotes leves de dados sem depender de operadoras tradicionais. Já para volumes maiores de informação, como registros visuais do uso de EPIs ou biometria de fadiga de tratoristas, o processamento ocorre localmente no maquinário agrícola por meio da Computação de Borda (Edge Computing). Caminhões e colhedoras atuam como transportadores de dados offline, sincronizando as informações criptografadas com o Oráculo ESG assim que se aproximam de pátios industriais com conexão Wi-Fi.

Superada a fase de captura de dados, a legitimação do modelo exige uma estrutura de validação descentralizada para evitar que a usina mantenha a assimetria informacional a seu favor. O modelo adota um Consortium Blockchain operado por uma rede Multistakeholder com papéis bem definidos. As usinas operam como nós geradores, responsáveis pela captura bruta e pelo processamento de provas criptográficas (Zero-Knowledge Proofs - ZKPs), protegendo assim seus segredos industriais. Paralelamente, órgãos reguladores (como ANP e IBAMA) e certificadoras atuam como nós validadores leves, atestando a veracidade matemática das

emissões e limites ambientais sem a necessidade de supercomputadores para reprocessar todo o volume de dados. Por fim, a sociedade civil, incluindo ONGs e investidores, participa como nós observadores, com acesso de leitura a painéis simplificados, consolidando a auditoria contínua da cidadania empresarial.

A transição da auditoria tradicional para a transparência algorítmica exige uma readequação estrutural de custos. Enquanto o modelo convencional baseia-se no deslocamento dispendioso de auditores a campo — configurando um alto custo operacional (OPEX) reativo e falho por amostragem —, o modelo digital centraliza o gasto no período de implantação com altos investimentos de capital (CAPEX) em infraestrutura e sensores IoT. Após o ganho de escala, o custo marginal de monitoramento e manutenção aproxima-se de zero.

Para viabilizar essa proposta financeiramente, o modelo de Consórcio atua como uma alavanca de economia de escala. A articulação do setor, por meio de entidades representativas, viabiliza a padronização tecnológica para aquisição coletiva de hardwares, o compartilhamento de infraestrutura de dados em regiões contíguas para eliminar redes proprietárias ociosas, e a diluição de custos regulatórios ao centralizar a interface com as entidades fiscalizadoras.

A tabela a seguir consolida o caso de negócios, ilustrando a transição do estado de conformidade reativa para a preditiva:

Tabela 2

Estado de conformidade reativa para a preditiva

Fator Analisado	Impacto Econômico e Operacional
Auditoria Tradicional	Alto custo operacional (OPEX), natureza episódica, suscetível a falhas de amostragem e elevado risco reputacional.
Infraestrutura Digital	Alto investimento inicial (CAPEX), porém com baixo custo marginal de manutenção após a escalabilidade do sistema.
Ganho de Capital (Greenium)	Acesso facilitado a financiamentos subsidiados (Green Bonds) e redução expressiva nos prêmios de risco financeiro.
Eficiência Regulatória	Maximização da Nota de Eficiência (NEEA) no programa RenovaBio, impulsionada pela garantia técnica de transparência total.

A validação do Balanço Social Digital foi realizada mediante uma Prova de Conceito (PoC) envolvendo uma amostra de cinco usinas sucroenergéticas com dados reais do biênio

2022-2023. O fluxo de processamento contemplou extração via processamento de linguagem natural (NLP), cruzamento geoespacial e regras de decisão algorítmica.

A performance tecnológica demonstrou a eficácia da substituição das auditorias amostrais custosas pelo monitoramento contínuo:

Tabela 3

Eficácia da substituição das auditorias amostrais custosas pelo monitoramento contínuo

Métrica Avaliada	Resultado da Prova de Conceito (PoC)
Documentos Processados	10 Relatórios (Amostra completa do período 2022-2023).
Tempo de Processamento (NLP)	142 segundos (Média de processamento total por relatório).
Taxa de Divergência	30% de casos de "atrito" detectados entre a declaração e o dado geoespacial.
Falsos Positivos (IA)	2,1% de inconsistências corrigidas via análise humana após a sinalização automática.
Latência de Consenso	Menos de 3,5 segundos para o registro do hash de conformidade na Blockchain.

A aplicação prática revelou cenários críticos de mitigação de risco. Em um caso de identificação de greenwashing, uma usina declarou explicitamente a manutenção integral de suas reservas legais e desmatamento indireto nulo. No entanto, o cruzamento do sistema com dados de satélite apontou a perda de 2,4 hectares de vegetação nativa no ano produtivo. Imediatamente, o motor de inferência gerou um alerta e bloqueou a validação da nota de eficiência (NEEA) da operação. Em contrapartida, nos cenários de conformidade confirmada onde o monitoramento por satélite corroborou a preservação de áreas protegidas nos últimos 24 meses, os contratos inteligentes validaram o processo de forma autônoma. Isso permitiu a emissão de ativos de sustentabilidade, como os CBIOS, sem a exigência de auditorias presenciais.

Sob a lente da Teoria da Agência, os resultados da PoC comprovam que a transparência algorítmica atua diretamente na mitigação da assimetria informacional entre os gestores (Agentes) e a sociedade, os reguladores e os investidores (Principais). O monopólio da informação detido pelo Agente muitas vezes cria incentivos perversos para o greenwashing.

Com uma taxa de divergência de 30% confirmada no estudo, atesta-se que o relato voluntário tradicional é vulnerável ao oportunismo gerencial e ao risco moral.

A introdução de uma infraestrutura algorítmica imutável como mecanismo de fiscalização contínua altera essa dinâmica. Sabendo que suas externalidades são auditadas matematicamente em tempo real, o Agente perde a capacidade de manipular a imagem corporativa. Ocorre, portanto, uma transição fundamental: a substituição da confiança fiduciária — baseada na crença da autodeclaração — pela confiança em infraestrutura.

A automatização dessa auditoria contínua, ancorada em provas de conhecimento zero, derruba os altos custos de transação do modelo presencial e protege os segredos industriais. Consequentemente, a redução da assimetria deixa de ser apenas uma exigência moral e transforma-se na condição primordial para a atração de capital, alinhando em definitivo os interesses de todas as partes em direção à governança ESG Digital.

5. Considerações Finais

O Balanço Social Digital, inserido no escopo do ESG Digital, apresenta-se como uma proposta teórica de inovação estratégica com potencial para endereçar as contradições históricas do setor sucroenergético brasileiro. Ao propor a transição de relatórios estáticos, fragmentados e fundamentados em dados autodeclarados para uma arquitetura baseada na "transparência algorítmica", este estudo delinea um modelo conceitual que visa converter a responsabilidade socioambiental em um pilar auditável da governança corporativa.

A pesquisa sugere que a convergência arquitetônica entre Inteligência Artificial, Internet das Coisas e tecnologia Blockchain pode atuar como um mecanismo mitigador da assimetria informacional e do "Problema do Oráculo". Sob uma ótica teórica, a substituição da confiança fiduciária por evidências criptografadas e geradas de forma autônoma tem o potencial de fortalecer os três pilares da sustentabilidade. Conceitualmente, a modelagem aponta que é possível proteger ecossistemas por meio de monitoramento preditivo, conferir maior transparência às relações de trabalho na cadeia produtiva e, consequentemente, consolidar o desempenho sustentável como um ativo financeiro tangível e confiável perante os mercados de

capitais, acelerando a transição em direção a um futuro sustentável e net-zero por meio de inovações digitais.

Contudo, a adoção da "transparência algorítmica" requer cautela contra o determinismo tecnológico, uma vez que a viabilidade dessa arquitetura esbarra em complexos limites institucionais e de infraestrutura. O estudo reconhece que a eficácia de um sistema descentralizado depende de mercados com forte maturidade regulatória e da estruturação de modelos de Governança Algorítmica Dialógica (GAD), fundamentados em redes consorciadas multistakeholder. A ausência de escrutínio social robusto pode, teoricamente, subverter a tecnologia em um sofisticado instrumento de "greenwashing algorítmico".

Embora o delineamento da arquitetura tenha sido rigorosamente estruturado sob a abordagem de Design Science Research (DSR), este estudo apresenta limitações inerentes à sua natureza conceitual e ex-ante, as quais devem nortear a interpretação dos resultados alcançados.

Em primeiro lugar, destaca-se a ausência de uma validação de campo extensiva, uma vez que o modelo proposto e as simulações executadas carecem de comprovação empírica em um ambiente de produção real e contínuo (in situ). Adicionalmente, há limitações significativas quanto à infraestrutura, pois, embora a análise teórica indique a viabilidade econômica por meio da economia de escala e da captura de prêmios de risco, o estudo ainda carece de uma modelagem financeira quantitativa robusta. Um Business Case detalhado, que pondere o Total Cost of Ownership (TCO) da infraestrutura de IoT e Blockchain frente ao retorno sobre o investimento (ROI) direto das unidades produtivas, permanece como uma necessidade para validar a proposta. Por fim, as inferências sobre a capacidade de atração de prêmios de risco reduzidos em green bonds e no programa RenovaBio fundamentam-se em pressupostos teóricos sobre o comportamento do mercado de capitais, carecendo, portanto, de comprovação causal no longo prazo.

Diante desse cenário, a agenda de pesquisa futura deve priorizar a condução de estudos longitudinais e provas de conceito (PoC) em operações reais de campo. É imprescindível que pesquisas subsequentes parametrizem os custos de implantação, conectividade e manutenção, permitindo avaliar a viabilidade econômica do modelo para diferentes perfis de maturidade operacional e portes de usinas sucroenergéticas.

Por fim, o sucesso da transição para a era do ESG Digital no agronegócio dependerá da capacitação humana. Sugere-se que futuras investigações analisem a integração dessas tecnologias emergentes nos currículos de formação de gestores e lideranças corporativas, garantindo que o setor sucroenergético possua o capital humano necessário para alinhar rentabilidade produtiva com o rigor ético exigido pela governança contemporânea.

Referências

- Aslam, J., Qazi, A., Lai, K. H., & Saleem, A. (2026). Urban mobility and transportation in circular cities: Integrating blockchain–AI digital solutions. *Transport Policy*, 104139. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2026.104139>
- Badr, M., Naoufal, R., & Ahmed, A. (2026). Integrating Artificial Intelligence and Blockchain for the Resilience of Sustainable Multimodal Transport: A Systematic Review. *Multimodal Transportation*, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.multra.2026.100298>
- Beniiche, A. (2020). A study of blockchain oracles. arXiv preprint arXiv:2004.07140. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.07140>
- Boller, M. L., Grabinger, T., Zurwehme, A., & Krupitzer, C. (2025). Sustainability certification in the digital era: A qualitative analysis of sustainability reports across product categories. *Future Foods*, 100881. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100881>
- Dai, J., & Vasarhelyi, M. A. (2017). Toward blockchain-based accounting and assurance. *Journal of Information Systems*, 31(3), 5-21. <https://doi.org/10.2308/isys-51804>
- Daniel, J., Maroun, E. A., Garza-Reyes, J. A., El Jaouhari, A., & Samadhiya, A. (2026). From information asymmetry to transparency: blockchain-enabled digital transformation in manufacturing supply chains. *Supply Chain Management: An International Journal*, 1-22. <https://doi.org/10.1108/SCM-09-2025-0903>
- Degregori, G., Brescia, V., Calandra, D., & Secinaro, S. (2026). Evaluating sustainability reporting in SMEs: insights from an ethical cooperative bank's approach. *Journal of Global Responsibility*, 17(2), 416-432. <https://doi.org/10.1108/JGR-10-2024-0197>
- Flammer, C. (2021). Corporate green bonds. *Journal of Financial Economics*, 142(2), 499-516. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2021.01.010>
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75-105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Horváth, D. (2023). Money in the digital age: Exploring the potential of central bank digital currency with a focus on social adaptation and education. **Sustainable Futures**, 6, 100136. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2023.100136>
- Jensen, M. C., & Meckling, W. H. (1976). Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure. *Journal of Financial Economics*, 3(4), 305-360. [https://doi.org/10.1016/0304-405X\(76\)90026-X](https://doi.org/10.1016/0304-405X(76)90026-X)
- Kosba, A., Miller, A., Shi, E., Wen, Z., & Papamanthou, C. (2016). Hawk: The blockchain model of cryptography and privacy-preserving smart contracts. 2016 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), 839-858. <https://doi.org/10.1109/SP.2016.55>

- Li, Y. (2026). How AI Adoption Shapes ESG Performance in Manufacturing: The Mediating Role of Digital Transformation. Available at SSRN 5722030. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2026.109672>
- Manogna, R. L., Singh, Y. P., & Singh, K. V. (2026). Green fintech adoption and ESG performance: Evidence from Indian listed firms. *Social Sciences & Humanities Open*, 13, 102528. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2026.102528>
- Marquis, C., Toffel, M. W., & Zhou, Y. (2016). Scrutiny, norms, and selective disclosure: A global study of greenwashing. *Organization Science*, 27(2), 483-504. <https://doi.org/10.1287/orsc.2015.1039>
- Nevi, G., Montera, R., Cucari, N., & Laviola, F. (2025). Integrating AI and ESG in digital platforms: New profiles of platform-based business models. *Journal of Engineering and Technology Management*, 78, 101913. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2025.101913>
- Suchman, M. C. (1995). Managing legitimacy: Strategic and institutional approaches. *Academy of Management Review*, 20(3), 571-610. <https://doi.org/10.5465/amr.1995.9508080331>
- Tawiah, B., Cho, E., Ofori, E. A., Suh, M., & Fei, B. (2025). Sustainable fashion transition towards net-zero future: A review of digital and material innovations, policies and regulatory framework. *Sustainable Futures*, 10, 101162. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101162>
- Tumpa, R. J., & Naeni, L. (2025). Improving decision-making and stakeholder engagement at project governance using digital technology for sustainable infrastructure projects. *Smart and Sustainable Built Environment*, 14(4), 1292-1329. <https://doi.org/10.1108/SASBE-10-2024-0451>
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *PNAS*, 114(24), 6148-6150. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>
- Williamson, O. E. (1981). The economics of organization: The transaction cost approach. *American Journal of Sociology*, 87(3), 548-577. <https://doi.org/10.1086/227496>