

SANDBOXES REGULATÓRIOS E TECNOLOGIAS DIGITAIS NO SETOR ELÉTRICO: DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA A REGULAÇÃO BRASILEIRA

Autor: Ricardo Alvarenga¹

RESUMO

O presente artigo examina a interseção entre sandboxes regulatórios e tecnologias digitais emergentes, como redes elétricas inteligentes (smart grids), inteligência artificial e blockchain, no contexto do setor elétrico brasileiro. Analisa-se a aplicação dos sandboxes como instrumento de regulação responsiva e experimental, bem como os impactos regulatórios, contratuais e institucionais dessas tecnologias. A pesquisa utiliza metodologia qualitativa, com revisão bibliográfica, documental e normativo-comparada, observando casos internacionais e iniciativas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O artigo conclui que a articulação entre inovação tecnológica e regulação experimental é essencial para a modernização do setor elétrico e propõe caminhos normativos para viabilização de novos modelos de negócio.

Palavras-chave: Blockchain; Inteligência artificial; Sandbox regulatório; Smart grids; Setor elétrico.

¹ Advogado, mestrando em Direito Constitucional pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, pós-graduado em Direito Regulatório pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, advogado voluntário da Association of International Energy Negotiators - AIEN, membro do grupo de pesquisa sobre Direito Administrativo Contemporâneo - GDAC, pesquisador voluntário do Laboratório de Simulações e Cenários (LSC) da Escola de Guerra Naval (EGN), na linha de pesquisa de Energia Nuclear. Militante na área de energia e transição energética, principalmente sob uma perspectiva regulatória.

1. INTRODUÇÃO

O setor elétrico mundial atravessa profunda reconfiguração impulsionada pela descarbonização, descentralização e digitalização — os “3Ds” — que alteram a operação, a governança e a estrutura de incentivos dos mercados de energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021)². Tais transformações intensificam a necessidade de marcos regulatórios ágeis, capazes de lidar com incerteza tecnológica e com efeitos sistêmicos de inovações digitais, como medição avançada, automação e plataformas de dados (EPRI, 2018)³. Em particular, o avanço de redes inteligentes, IA e blockchain desafia modelos prescritivos tradicionais, demandando abordagens experimentais e iterativas (VINUESA et al., 2020; HUTHMACHER et al., 2021).

Nesse contexto, os sandboxes regulatórios despontam como ambientes de teste em condições reais, com flexibilizações normativas proporcionais e salvaguardas, favorecendo o aprendizado institucional e a redução de assimetrias de informação entre regulador e regulados (BLACK; HOPKINS; OVERTON, 2021). Experiências em jurisdições maduras — como o Energy Regulation Sandbox da Ofgem — evidenciam que a experimentação controlada acelera a incorporação de soluções inovadoras, preservando direitos dos consumidores e a segurança do sistema (OFGEM, 2020). No Brasil, a Resolução Normativa ANEEL nº 954/2021 (revogada pela REN 1.116/2025) inaugurou diretrizes para regulação experimental setorial, abrindo caminho para pilotos com tecnologias digitais.

Este artigo avalia a convergência entre sandboxes e tecnologias digitais no setor elétrico brasileiro, identificando oportunidades, riscos e caminhos normativos para um ecossistema regulatório inovador, seguro e eficiente, com base em fundamentos de direito regulatório, engenharia elétrica e governança tecnológica (ZETZSCHE; BUCKLEY; ARNER, 2017). A estrutura abrange a conceituação dos sandboxes, exame técnico das tecnologias, sua interface regulatória, desafios jurídicos e propostas normativas. (BLACK; HOPKINS; OVERTON, 2021; HUTHMACHER et al., 2021).

² Os “3Ds” foram adotados pela Agência Internacional de Energia como paradigma da transição energética global, consolidando-se após o Acordo de Paris em 2015 como eixo das políticas nacionais de energia.

³ Plataformas de dados energéticos englobam sistemas de medição avançada (AMI), centros de gestão de dados (MDMS) e data hubs setoriais, responsáveis por garantir interoperabilidade e segurança da informação.

A estrutura do artigo compreende a contextualização teórica dos sandboxes, a análise técnica das tecnologias digitais aplicáveis ao setor elétrico, a interface entre regulação experimental e inovação tecnológica, os desafios jurídicos e institucionais envolvidos, bem como propostas normativas para consolidação do ambiente de inovação regulatória no Brasil.

2. SANDBOXES REGULATÓRIOS: CONCEITO E APLICAÇÕES NO SETOR ELÉTRICO

Os sandboxes regulatórios são ambientes experimentais controlados que autorizam, por prazo e escopo delimitados, a testagem de produtos, serviços ou modelos de negócio com flexibilizações regulatórias proporcionais, sob supervisão do regulador (BLACK; HOPKINS; OVERTON, 2021). No setor elétrico, a ferramenta é estratégica para lidar com inovações transversais — como resposta da demanda, agregação de recursos distribuídos e mercados locais — que desafiam a regulação prescritiva (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

No Brasil, a ANEEL estabeleceu balizas de regulação experimental por meio da Resolução Normativa nº 954/2021 (revogada pela REN 1.116/2025), definindo critérios de seleção, métricas de desempenho e procedimentos de encerramento/transição dos pilotos, o que viabiliza experimentos com tecnologias digitais sob salvaguardas⁴. Em paralelo, experiências estrangeiras como a da Ofgem têm permitido testar arranjos comerciais inovadores, como comunidades energéticas e liquidação diferenciada de serviços ancilares (OFGEM, 2020).

Do ponto de vista técnico, sandboxes permitem avaliar, com dados reais, viabilidade e riscos de soluções como tarifação dinâmica, automação distribuída e contratos inteligentes, antes de sua adoção ampla, reduzindo custos de erro regulatório e melhorando a calibração normativa (EPRI, 2018). Como instrumento de governança, fomentam transparência, accountability e participação social quando combinados a métricas claras e análise de impacto regulatório (BLACK; HOPKINS; OVERTON, 2021).

Adicionalmente, governança de dados, cibersegurança e responsabilidade por decisões automatizadas carecem de regulação setorial específica, hoje mitigada por normas gerais

⁴ A REN 1.116/2025 substituiu e ampliou a 954/2021, prevendo transição obrigatória para regime definitivo, integração com ANPD e ANATEL e exigência de análise de impacto regulatório, tornando o Brasil um dos pioneiros na América Latina.

como a LGPD, insuficientes para nuances técnico-operacionais do setor elétrico (BRASIL, 2018). Déficits de capacidade institucional limitam o monitoramento de pilotos complexos, demandando investimento em competências e ferramentas.

3. TECNOLOGIAS DIGITAIS NO SETOR ELÉTRICO

A digitalização reconfigura a cadeia de valor elétrica ao viabilizar operação bidirecional, gestão intensiva de dados e novos papéis para consumidores-prosumidores (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021)⁵. No Brasil, tais tendências se expressam na expansão de medição inteligente, na automação de redes e na participação de recursos distribuídos, exigindo ajustes tarifários e de qualidade de serviço (EPRI, 2018). A seguir, analisam-se três tecnologias-chave — smart grids, IA e blockchain — com ênfase em implicações regulatórias.

Essas tecnologias exigem novos arranjos institucionais, contratuais e regulatórios, incluindo redefinição de estruturas tarifárias e criação de marcos para governança algorítmica e validação de transações digitais (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021). A ausência de arcabouço normativo adequado pode comprometer confiabilidade sistêmica, proteção dos consumidores e atratividade de investimentos (EPRI, 2018).

A regulação brasileira enfrenta o desafio de incorporar essas tecnologias de forma célere e segura, preservando universalidade, modicidade tarifária e continuidade do serviço público (BRASIL, 2019). O uso de sandboxes pode ser essencial, permitindo testes em ambientes supervisionados, identificação de falhas e formulação normativa baseada em evidências (BLACK; HOPKINS; OVERTON, 2021; OFGEM, 2020).

3.1. SMART GRIDS

As redes inteligentes integram sensoriamento, comunicação e controle para elevar confiabilidade, eficiência e integração de renováveis, permitindo resposta ativa da demanda e operação mais granular (EPRI, 2018). A difusão de AMI/MDMS e automação em distribuição possibilita tarifas horárias, gerenciamento de congestionamentos e redução de perdas técnicas e não técnicas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021). Esses avanços requerem

⁵ O “prosumidor” é simultaneamente usuário e fornecedor de energia, criando tensões jurídicas: deve ser tratado como consumidor protegido ou como agente de mercado sujeito a riscos e obrigações? Essa ambiguidade exige ajustes normativos.

padrões de interoperabilidade, proteção de dados e cibersegurança alinhados ao risco sistêmico (ANEEL, 2021).

Do ponto de vista técnico, as smart grids possibilitam a implementação de tarifas horossazonais dinâmicas, a inserção de geração renovável intermitente e o controle descentralizado de recursos energéticos distribuídos (DERs) (EPRI, 2018). Elas exigem infraestrutura de comunicação bidirecional, interoperabilidade de sistemas e plataformas de gestão avançada de dados energéticos (MDMS), elementos que demandam do regulador atuação inovadora com revisão de padrões de qualidade, confiabilidade e acesso não discriminatório às redes (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021).

A implementação plena de smart grids impõe desafios regulatórios como a definição de responsabilidades entre agentes, o reequilíbrio econômico-financeiro das distribuidoras frente à redução do consumo convencional e a criação de incentivos tarifários compatíveis com a resposta da demanda (BLACK; HOPKINS; OVERTON, 2021)⁶. Ademais, há implicações legais relevantes no tocante à privacidade e proteção de dados dos consumidores, nos termos da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD – Lei nº 13.709/2018) (BRASIL, 2018).

Por fim, destaca-se a necessidade de estabelecer padrões técnicos nacionais de interoperabilidade e segurança cibernética para os dispositivos conectados às redes inteligentes. A ausência de tais normativos pode comprometer a confiabilidade do sistema elétrico e expor a infraestrutura crítica a riscos operacionais e de segurança nacional (ANEEL, 2021). A experiência internacional indica que a harmonização regulatória e técnica é condição essencial para o sucesso das smart grids (OFGEM, 2020).

3.2. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A inteligência artificial (IA) vem sendo utilizada para ampliar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos, com aplicações que vão desde previsão de carga, manutenção preditiva e identificação de perdas até a otimização de despacho de geração e integração de fontes renováveis variáveis (ZHANG et al., 2018; WANG et al., 2019). Em países como os Estados Unidos e a China, já há implementações de algoritmos de machine

⁶ As smart grids tendem a reduzir o consumo faturado, impactando a receita das distribuidoras. Experiências internacionais adotaram “decoupling tarifário” e remuneração por disponibilidade de rede como solução para esse desequilíbrio.

learning em sistemas de transmissão para detecção automática de falhas e melhoria da resiliência da rede (KIRSCHEN; STRBAC, 2018)⁷.

Entretanto, a incorporação da IA ao setor elétrico levanta desafios regulatórios importantes, sobretudo quanto à explicabilidade e auditabilidade dos algoritmos, necessários para permitir imputação de responsabilidade em casos de falhas sistêmicas (FLORIDI et al., 2018). Além disso, decisões críticas automatizadas devem ser acompanhadas de mecanismos de supervisão humana e de garantias de devido processo para consumidores afetados, em linha com as melhores práticas internacionais de governança algorítmica (OECD, 2019).

Outro ponto relevante é a qualidade e a interoperabilidade dos dados utilizados para treinar os modelos de IA. No contexto brasileiro, a ausência de padronização dos dados de medição e a fragmentação entre distribuidoras limitam a eficácia das soluções digitais (ANEEL, 2021; CEER, 2022). A falta de governança de dados pode introduzir vieses e discriminações indiretas, violando direitos dos consumidores e exigindo proteção regulatória compatível com a LGPD (BRASIL, 2018).

Do ponto de vista jurídico e institucional, é necessário desenvolver um arcabouço regulatório que estabeleça critérios mínimos para uso de IA em sistemas críticos, incluindo requisitos de cibersegurança, transparência e padrões de certificação de algoritmos (EUROPEAN COMMISSION, 2021). Os sandboxes regulatórios podem desempenhar papel estratégico nesse processo, permitindo que modelos baseados em IA sejam testados em condições reais, mas com salvaguardas regulatórias, antes de sua adoção em escala (FARRELL; PYE, 2021).

3.3. BLOCKCHAIN

O blockchain desponta como uma das tecnologias mais promissoras para reconfigurar os modelos de transação e certificação no setor elétrico. Sua estrutura descentralizada e imutável possibilita registrar e liquidar transações de energia de forma segura e transparente, reduzindo custos de intermediação e aumentando a confiabilidade dos mercados (ANDONI et al., 2019). Experiências internacionais, como a *Power Ledger* na Austrália e a *LO3 Energy* nos Estados Unidos, já demonstraram a viabilidade de mercados locais de energia baseados

⁷ Esses pilotos reduziram o tempo de resposta de falhas de minutos para segundos. Porém, reguladores exigiram auditoria de algoritmos e mecanismos de supervisão humana, dada a criticidade das infraestruturas elétricas.

em blockchain, nos quais prosumidores podem negociar excedentes diretamente entre si (KOSSMANN; BURKHARDT, 2020).

No Brasil, a adoção de soluções em blockchain no setor elétrico ainda se encontra em estágio incipiente, mas há iniciativas relevantes em certificação de energia renovável e rastreabilidade de atributos ambientais, como os certificados de energia limpa (I-REC) (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022). Tais soluções podem contribuir para maior integridade e transparência no cumprimento de metas de descarbonização e na comprovação de compromissos ESG. Contudo, a ausência de um marco normativo específico que reconheça juridicamente os registros em blockchain limita sua aplicação em escala no setor elétrico brasileiro (FARIAS; PINHEIRO, 2021)⁸.

Outro aspecto crítico refere-se ao impacto ambiental e energético dos mecanismos de consenso utilizados em algumas redes blockchain. Sistemas baseados em *proof-of-work*, como o Bitcoin, apresentam elevado consumo energético, o que é incompatível com as metas de sustentabilidade do setor (DE VRIES, 2018). Alternativas como *proof-of-stake* ou redes permissionadas oferecem soluções mais eficientes e sustentáveis, sendo indicadas para aplicação no setor elétrico, especialmente em ambientes regulados (KOSBA et al., 2016).

Do ponto de vista regulatório, o uso de blockchain em contratos inteligentes (smart contracts) para liquidação automática de energia exige salvaguardas jurídicas e operacionais. É necessário estabelecer requisitos mínimos de interoperabilidade, auditoria e segurança cibernética, além de mecanismos de resolução de disputas em caso de falhas contratuais (MENDLING et al., 2018). Os sandboxes regulatórios podem desempenhar papel estratégico ao permitir que tais soluções sejam testadas em ambientes controlados, garantindo aprendizado institucional antes de sua aplicação em larga escala (ANDONI et al., 2019; CEER, 2022).

4. INTERFACE ENTRE SANDBOXES E TECNOLOGIAS DIGITAIS

A combinação de sandboxes regulatórios e tecnologias digitais configura uma abordagem inovadora de governança no setor elétrico, permitindo testar soluções disruptivas em condições controladas antes de sua adoção em larga escala. Os sandboxes funcionam

⁸ Alemanha e Suíça já editaram leis reconhecendo registros em blockchain para certificação de energia renovável. No Brasil, a ausência de norma específica gera insegurança sobre validade probatória e compatibilidade com a CCEE.

como laboratórios institucionais, nos quais tecnologias como smart grids, inteligência artificial e blockchain podem ser avaliadas de forma integrada, com monitoramento regulatório e métricas de desempenho claramente definidas (ZETZSCHE; BUCKLEY; ARNER, 2017; BLACK; HOPKINS; OVERTON, 2021).

Do ponto de vista prático, a integração de diferentes tecnologias em um mesmo ambiente experimental permite avaliar não apenas seus impactos individuais, mas também a interoperabilidade e os efeitos sistêmicos resultantes da sua interação. Projetos internacionais demonstram essa sinergia: no Reino Unido, o sandbox da Ofgem viabilizou a criação de comunidades energéticas locais com transações *peer-to-peer* de energia (OFGEM, 2020)⁹; na Austrália, a *Power Ledger* testou a liquidação de certificados de energia renovável via blockchain; e na Alemanha, projetos como o *Enerchain* investigaram a viabilidade de mercados descentralizados de energia (SCHMIEDER et al., 2020).

No Brasil, iniciativas como a Resolução Normativa nº 954/2021 da ANEEL e a REN 1.116/2025 representam um primeiro passo para a consolidação de um marco de regulação experimental no setor elétrico. Contudo, a eficácia dessa política depende de critérios claros de seleção de projetos, metodologias de análise de impacto regulatório e mecanismos de transição para o regime ordinário, a fim de evitar que os pilotos se tornem ilhas isoladas de inovação (WORLD BANK, 2020; CEER, 2022). A ausência desses elementos pode comprometer a difusão das soluções testadas e limitar o aprendizado institucional.

A literatura internacional indica que sandboxes bem-sucedidos compartilham três características centrais: foco em resultados (outcome-based regulation), transparência na gestão dos pilotos e mecanismos formais de feedback regulatório (FARRELL; PYE, 2021; IRENA, 2020). Nesse sentido, é recomendável que a experiência brasileira seja acompanhada pela criação de um observatório regulatório multissetorial, responsável por consolidar aprendizados, disseminar boas práticas e articular a cooperação entre agências nacionais e organismos internacionais de energia. Tal arranjo pode garantir que a interação entre inovação tecnológica e regulação experimental se traduza em ganhos reais de eficiência, sustentabilidade e proteção do consumidor.

⁹ O caso britânico tornou-se referência mundial: comunidades locais negociaram excedentes diretamente entre si, sob regulação experimental, fornecendo base empírica para revisão tarifária e regras de mercado.

5. DESAFIOS REGULATÓRIOS E JURÍDICOS

Apesar do potencial dos sandboxes regulatórios e das tecnologias digitais, sua implementação enfrenta desafios regulatórios e jurídicos significativos. Um dos principais entraves é a fragmentação normativa entre diferentes órgãos e agências, como ANEEL, ANPD, ANATEL, BACEN e MME, que frequentemente atuam de maneira isolada, resultando em sobreposição de competências, lacunas jurídicas e incerteza para investidores (WORLD BANK, 2020; CEER, 2022). Essa falta de coordenação interinstitucional dificulta a criação de um ecossistema regulatório integrado, essencial para lidar com tecnologias transversais como blockchain e inteligência artificial.

Outro desafio reside na ausência de mecanismos claros de transição regulatória. Projetos bem-sucedidos em sandboxes muitas vezes não encontram canais institucionais para migração ao regime normativo tradicional, o que gera insegurança jurídica e desestimula investimentos de longo prazo (SCHMIEDER et al., 2020). A literatura internacional recomenda que a fase experimental esteja sempre acompanhada de indicadores objetivos de desempenho, critérios de escalabilidade e processos transparentes de incorporação normativa, de modo a evitar que os pilotos se tornem iniciativas estanques (IRENA, 2020; FARRELL; PYE, 2021).

Adicionalmente, a ausência de marcos jurídicos específicos para governança de dados e inteligência artificial no setor elétrico compromete a proteção de consumidores e a integridade do sistema. Questões como validade jurídica de registros em blockchain, responsabilidade civil por decisões automatizadas e interoperabilidade de sistemas digitais ainda carecem de regulamentação direcionada (FARIAS; PINHEIRO, 2021; EUROPEAN COMMISSION, 2021)¹⁰. Atualmente, tais temas são apenas parcialmente tratados por legislações gerais, como a LGPD (Lei nº 13.709/2018), insuficientes para as especificidades técnicas e operacionais do setor energético.

Por fim, observa-se um déficit de capacidade institucional e técnica dos reguladores para acompanhar a complexidade das inovações digitais. A supervisão de pilotos de blockchain, IA ou redes inteligentes exige competências multidisciplinares em engenharia elétrica, ciência de dados, direito digital e regulação econômica (FLORIDI et al., 2018). Sem

¹⁰ A proposta do *AI Act* europeu classifica sistemas de IA aplicados em energia como “alto risco”, exigindo transparência, explicabilidade e certificação. O Brasil, ao manter apenas a LGPD como referência, está atrasado na governança de IA.

investimentos estruturados em formação de quadros e em infraestrutura tecnológica, há risco de que os sandboxes se tornem instrumentos subutilizados ou capturados por interesses de mercado (OECD, 2019).

6. PROPOSTAS NORMATIVAS E CAMINHOS SUGERIDOS

Para consolidar a adoção eficaz de sandboxes regulatórios e tecnologias digitais no setor elétrico, é recomendável instituir um Marco Legal da Inovação Regulatória no Setor Elétrico, formalizando objetivos, competências, critérios de elegibilidade, salvaguardas e ritos de transição do experimental ao regime ordinário, com inspiração nos princípios de liberdade econômica e governo digital já positivados no ordenamento (BRASIL, 2019; BRASIL, 2021). Tal marco deve adotar regulação orientada a resultados (outcome-based), com metas mensuráveis (ex.: confiabilidade, flexibilidade, segurança cibernética, modicidade) e avaliação regulatória ex ante e ex post por Análise de Impacto Regulatório (AIR), em linha com as melhores práticas da OCDE (OECD, 2020; OECD, 2021). Em complementação, recomenda-se a criação de guidelines técnicas para pilotos com IA, blockchain e smart grids (ex.: requisitos mínimos de interoperabilidade, explicabilidade algorítmica e cibersegurança), condicionando a autorização experimental ao cumprimento de métricas e salvaguardas proporcionais ao risco sistêmico (EUROPEAN COMMISSION, 2021; ENISA, 2019).

No desenho institucional, propõe-se um Observatório Nacional de Inovação Regulatória em Energia, multiator e permanente, com mandato para: (i) selecionar e monitorar pilotos; (ii) consolidar lições aprendidas; (iii) publicar painéis de indicadores e relatórios de AIR; e (iv) recomendar a internalização normativa de soluções exitosas (WORLD BANK, 2020; CEER, 2022). As métricas de desempenho devem ir além do binômio custo–benefício clássico, incorporando indicadores de flexibilidade (ex.: capacidade de resposta da demanda), integração de DERs (ex.: hosting capacity), resiliência (ex.: redução de SAIDI/SAIFI por automação) e maturidade digital (ex.: interoperabilidade AMI/MDMS), a partir de bases reconhecidas pelo EPRI e por órgãos europeus (EPRI, 2018; CEER, 2022). A adoção de planos de transição regulatória previamente acordados com os agentes (sunset/roll-out/scale-up) mitiga a “armadilha do piloto” e dá previsibilidade ao investimento, como observado em experiências internacionais de sandboxes (IRENA, 2020; WORLD BANK, 2020).

A regulação interagências deve ser formalizada por acordos de cooperação e resoluções conjuntas entre ANEEL, ANPD, ANATEL, BACEN, CADE, MME e MCTI, visando coordenar competências sobre dados pessoais, telecomunicações, pagamentos, defesa da concorrência e política energética, indispensáveis a projetos com IA, redes inteligentes e blockchain (OECD, 2021; CEER, 2022). Modelos europeus de coordenação regulatória (ACER/CEER) demonstram ganhos de coerência e redução de custos de conformidade quando há interfaces institucionais estáveis e portas únicas (one-stop shop) para autorizações experimentais (ACER, 2022; CEER, 2022). No contexto brasileiro, recomenda-se instituir um Comitê Interagências de Inovação em Energia, com secretaria técnica e agenda pública, responsável por: (i) harmonizar requisitos de governança de dados com a LGPD; (ii) alinhar requisitos de conectividade e espectro para AMI/IoT; (iii) viabilizar arranjos de pagamento e liquidação para smart contracts de energia; e (iv) avaliar impactos concorrenciais de agregadores e mercados locais (BRASIL, 2018; OECD, 2021).

No plano operacional, recomenda-se um roteiro padronizado de pilotos: (1) *scoping* técnico-jurídico com matriz de riscos e salvaguardas; (2) definição de KPIs (ex.: erro de previsão de carga por IA; latência/throughput em blockchain permissionado; perdas técnicas e não técnicas; indicadores de segurança cibernética) e gatilhos de parada; (3) governança de dados (minimização, finalidade, anonimização/pseudonimização, data lineage); (4) ensaios de cibersegurança (avaliação de vulnerabilidades, plano de continuidade) com referência a guias setoriais (ENISA, 2019; IEA, 2021); e (5) plano de incorporação normativa com consulta pública abreviada, sempre que os KPIs cumprirem os limiares pactuados (OECD, 2020; IRENA, 2020). Para incentivar a adesão, podem-se prever isenções proporcionais (ex.: dispensa de certos procedimentos prescritivos), janelas temporais e apoio técnico (laboratórios regulatórios), desde que preservada a isonomia e o controle de riscos, conforme diretrizes do Banco Mundial e experiências de innovation hubs (WORLD BANK, 2020; CEER, 2022).

7. CONCLUSÃO

A análise realizada demonstra que a integração entre sandboxes regulatórios e tecnologias digitais constitui instrumento essencial para a modernização regulatória do setor elétrico brasileiro. As experiências nacionais e internacionais mostram que a experimentação

regulatória permite reduzir assimetrias de informação, identificar riscos operacionais e normativos de novas tecnologias e construir soluções jurídicas mais aderentes à realidade técnica do setor (WORLD BANK, 2020; CEER, 2022).

O estudo evidenciou que smart grids, inteligência artificial e blockchain trazem benefícios expressivos em termos de eficiência, confiabilidade e descentralização, mas sua incorporação enfrenta barreiras jurídicas relevantes. Entre elas, destacam-se a ausência de padrões de interoperabilidade, os riscos de cibersegurança, a governança de dados sob a égide da LGPD, e a indefinição de responsabilidade civil por decisões automatizadas (BRASIL, 2018; EUROPEAN COMMISSION, 2021). Nessa perspectiva, os sandboxes funcionam como instrumentos de transição regulatória que equilibram segurança jurídica e estímulo à inovação (BLACK; HOPKINS; OVERTON, 2021).

Contudo, a efetividade desse mecanismo depende da superação de quatro eixos críticos: (i) fragmentação institucional, que exige coordenação entre agências como ANEEL, ANPD, ANATEL, BACEN e CADE; (ii) déficit de mecanismos de transição, que pode transformar pilotos em iniciativas estanques sem escalabilidade; (iii) lacunas normativas quanto à governança digital e jurídica de blockchain e IA; e (iv) insuficiência de capacidade técnica dos reguladores para acompanhar a velocidade das inovações (OECD, 2021; FLORIDI et al., 2018).

Diante disso, recomenda-se a adoção de um Marco Legal da Inovação Regulatória no Setor Elétrico, a institucionalização de um Observatório Nacional de Inovação Regulatória, e, sobretudo, o fortalecimento da regulação interagências como eixo estruturante de governança. A experiência europeia, em especial via CEER e ACER, demonstra que arranjos institucionais colaborativos aumentam a previsibilidade normativa e reduzem custos de conformidade (ACER, 2022; CEER, 2022). Para o Brasil, um Comitê Interagências de Inovação em Energia poderia ser o catalisador desse processo, garantindo coerência regulatória, proteção do consumidor e incentivo sustentável à inovação tecnológica.

Conclui-se que a modernização regulatória do setor elétrico deve ser entendida não apenas como resposta às inovações tecnológicas, mas como parte de uma estratégia mais ampla de transição energética justa, segura e eficiente¹¹. A adoção de sandboxes,

¹¹ A transição justa implica em equilibrar inovação com inclusão social: tarifas acessíveis, proteção do consumidor vulnerável e incentivo a modelos cooperativos de energia, evitando exclusão digital e desigualdade energética.

acompanhada de governança interinstitucional robusta, representa caminho viável para alinhar os objetivos constitucionais de interesse público, modicidade tarifária e universalidade do serviço às demandas emergentes da digitalização e da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ACER – AGENCY FOR THE COOPERATION OF ENERGY REGULATORS. *ACER Market Monitoring Report 2022*. Ljubljana: ACER, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Resolução Normativa nº 954, de 23 de novembro de 2021*. Estabelece diretrizes para regulação experimental. Brasília, DF: ANEEL, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Resolução Normativa nº 1.116, de 25 de fevereiro de 2025*. Consolida e atualiza as diretrizes para a regulação experimental no setor elétrico, revogando a REN nº 954/2021. Brasília, DF: ANEEL, 2025.

ANDONI, M. et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 100, p. 143–174, 2019.

BLACK, J.; HOPKINS, A.; OVERTON, R. Regulatory sandboxes: a tool for energy innovation. *Energy Regulation Quarterly*, v. 9, n. 1, p. 15–27, 2021.

BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 15 ago. 2018.

BRASIL. Lei nº 13.874, de 20 de setembro de 2019. Declara a liberdade econômica como garantia de livre mercado. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 20 set. 2019.

BRASIL. Lei nº 14.129, de 29 de março de 2021. Dispõe sobre princípios, regras e instrumentos para o Governo Digital. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 mar. 2021.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). *Relatório Anual 2022*. São Paulo: CCEE, 2022.

CEER – COUNCIL OF EUROPEAN ENERGY REGULATORS. *Regulatory Aspects of Sandboxes in the Energy Sector*. Bruxelas: CEER, 2022.

CEER – COUNCIL OF EUROPEAN ENERGY REGULATORS. *Regulation of Smart Grids in Europe*. Bruxelas: CEER, 2022.

DE VRIES, A. Bitcoin's growing energy problem. *Joule*, v. 2, n. 5, p. 801–805, 2018.

ENISA – EUROPEAN UNION AGENCY FOR CYBERSECURITY. *Cybersecurity in the Energy Sector*. Atenas: ENISA, 2019.

EPRI – ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *The integrated grid: realizing the full value of central and distributed energy resources*. Palo Alto, CA: EPRI, 2018.

EUROPEAN COMMISSION. *Proposal for a Regulation laying down harmonised rules on Artificial Intelligence (Artificial Intelligence Act)*. Bruxelas: Comissão Europeia, 2021.

FANG, X. et al. Smart grid – The new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 14, n. 4, p. 944–980, 2012.

FARIAS, T.; PINHEIRO, R. Blockchain e regulação de mercados de energia no Brasil: perspectivas e desafios. *Revista de Direito Público da Economia*, v. 19, n. 74, p. 57–82, 2021.

FARRELL, N.; PYE, S. Emerging governance challenges in smart energy innovation. *Energy Policy*, v. 149, 112052, 2021.

FLORIDI, L. et al. AI4People – An ethical framework for a good AI society. *Minds and Machines*, v. 28, p. 689–707, 2018.

GIORDANO, V. et al. *Smart grid projects in Europe: lessons learned and current developments*. Luxemburgo: European Commission, Joint Research Centre, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Digitalization and energy*. Paris: IEA, 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Innovation landscape for a renewable-powered future*. Abu Dhabi: IRENA, 2020.

KIRSCHEN, D.; STRBAC, G. *Fundamentals of Power System Economics*. 2. ed. Chichester: Wiley, 2018.

KOSBA, A. et al. Hawk: The blockchain model of cryptography and privacy-preserving smart contracts. In: *IEEE Symposium on Security and Privacy*. p. 839–858, 2016.

KOSSMANN, D.; BURKHARDT, T. Blockchain and the energy sector: use cases, regulatory challenges, and implications. *Energy Policy*, v. 145, 111631, 2020.

MENDLING, J. et al. Blockchains for business process management – Challenges and opportunities. *ACM Transactions on Management Information Systems*, v. 9, n. 1, p. 1–16, 2018.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *OECD Principles on Artificial Intelligence*. Paris: OECD, 2019.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *Best Practice Principles for Regulatory Policy: Regulatory Impact Assessment*. Paris: OECD, 2020.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *OECD Regulatory Policy Outlook 2021*. Paris: OECD, 2021.

OFGEM – OFFICE OF GAS AND ELECTRICITY MARKETS. *Energy Regulation Sandbox*. London: Ofgem, 2020.

SCHMIEDER, A. et al. Enerchain: Blockchain-based peer-to-peer trading of energy in Europe. *Energy Reports*, v. 6, p. 32–39, 2020.

VINUESA, R. et al. The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Communications*, v. 11, art. 233, 2020.

WANG, Y.; CHEN, C.; WANG, J. Deep learning for smart grid applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 121, 109768, 2019.

WORLD BANK. *Regulatory Sandboxes and Innovation Hubs for Energy*. Washington, DC: World Bank, 2020.

ZHANG, Y. et al. Artificial intelligence techniques for smart grid applications: A review. *Applied Energy*, v. 228, p. 182–197, 2018.

ZETZSCHE, D. A.; BUCKLEY, R. P.; ARNER, D. W. Regulating a revolution: from regulatory sandboxes to smart regulation. *Fordham Journal of Corporate & Financial Law*, v. 23, p. 31–103, 2017.