

POSITION PAPER

SISTEMAS SUSTENTÁVEIS DE ENERGIA PARA UMA TRANSIÇÃO LIMPA E A DESCARBONIZAÇÃO INDUSTRIAL

*Tecnologias estratégicas para a eletrificação da economia e para uma rede elétrica
segura, resiliente e flexível*

Resultado Iniciativa Bottom-Up AI² promovida pelo INESC TEC

Autores: Clara Gouveia; João Peças Lopes; Ricardo Bessa.

02 de outubro de 2026

Enquadramento

Este documento é o resultado de uma iniciativa *bottom-up* promovida pelo INESC TEC, no âmbito da Avaliação Estratégica para a definição das prioridades nacionais de investigação e inovação (AI²). Reconhece a visão e os objetivos do exercício e destina-se a contribuir para a definição dos domínios estratégicos nacionais, reunindo contributos científicos e tecnológicos em torno da energia para a transição limpa e a descarbonização industrial, transversal ao Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação. Esta reflexão visa posicionar Portugal como plataforma europeia de teste, validação e escala de novas tecnologias estratégicas para a eletrificação da economia e para uma rede elétrica segura, resiliente e flexível.

Sumário Executivo

O presente documento consubstancia o reconhecimento, como prioridade estratégica nacional e área de excelência os **sistemas sustentáveis de energia**, em três pilares: a eletrificação da economia, o desenvolvimento de tecnologias limpas e a operação de uma rede elétrica segura, resiliente e flexível.

A capacidade de integração do sistema elétrico é uma condição essencial à competitividade da economia. Cabe salientar que a vantagem nacional em integração de fontes renováveis e em preços de eletricidade só se converte em investimento industrial se a rede conseguir ligar e operar com segurança a nova procura industrial, promovendo por outro lado a flexibilidade dos consumos distribuídos.

Na dimensão científica, o sistema elétrico nacional é, em si, um ativo de investigação. A operação do sistema, considerando a elevada integração de produção renovável baseada em conversores, e a exposição a fenómenos climáticos extremos constituem evidências que fundamentam uma posição diferenciadora do sistema nacional.

Apesar da capacidade científica estar consolidada, carece de escala. A base científica nacional é reconhecida e a taxa de aprovação em concursos europeus supera a média, mas a captação de

financiamento permanece reduzida, as fases intermédias de validação, prototipagem e demonstração apresentam limitações de acesso significativas.

A rota até à escala exige instrumentos que hoje não existem. Um enquadramento de acesso a dados, uma rede nacional de ensaio e demonstração em condições reais, *sandboxes* técnicas e regulatórias e a capacidade nacional de certificação são condições para que o conhecimento produzido chegue aos operadores, às empresas e ao mercado europeu.

O alinhamento com o financiamento europeu é imediato. A janela de Transição Limpa e Descarbonização Industrial do Fundo Europeu de Competitividade (FEC) e o Pilar II do Programa-Quadro 10 (FP10) estão a ser desenhados precisamente para financiar cadeias contínuas, da investigação ao investimento industrial, modelo para o qual Portugal reúne qualidade científica, mas não escala de participação.

Neste contexto, defende-se que a estrutura organizacional da AI² deve acautelar as condições para posicionar Portugal como plataforma europeia de teste, validação e escala de novas tecnologias estratégicas para a eletrificação da economia e para uma rede elétrica segura, resiliente e flexível. Destaca-se, igualmente, a relevância de compromisso partilhado entre as áreas governativas que tutelam a energia e a ciência e inovação, financiamento plurianual que cubra as fases intermédias da cadeia de valor e a operação das infraestruturas, e um mandato para estabelecer o acesso regulado a dados e a ambientes de ensaio em condições reais.

1. A área e a sua ambição

A política energética europeia atual alia os objetivos de descarbonização, segurança de abastecimento e resiliência à competitividade industrial. O relatório *Draghi* identificou o **custo da energia** como uma das principais desvantagens estruturais da indústria europeia e destacou as redes elétricas como ativo crítico europeu [1]. Esta leitura foi assumida na Bússola para a Competitividade e no *Clean Industrial Deal*, ambos de 2025, que propõem a **descarbonização como instrumento para aumentar a competitividade** da economia e como estratégia de crescimento industrial.

No quadro europeu, Portugal é hoje líder na integração de produção renovável, assumindo não só uma percentagem elevada de produção de eletricidade gerada por fontes renováveis, como apresenta uma das quotas de renováveis na indústria mais elevadas da União Europeia (UE, 43% em 2023) [2]. A vantagem nacional traduz-se, também, em competitividade, onde o preço médio da energia elétrica no Mercado Ibérico da Energia Elétrica (MIBEL), e em Portugal, no 1.º semestre de 2025 foi cerca de 25% abaixo da média da UE [3].

No entanto, à semelhança dos restantes países europeus, **o aumento significativo da procura industrial** na sequência do licenciamento de um conjunto significativos de novos investimentos industriais nas áreas das tecnologias limpas e digitais, face ao crescimento da integração de produção renovável, **coloca**

desafios na adequação e segurança do sistema, reforçando a necessidade de integração de armazenamento de curto prazo e sazonal, assim como o aumento da flexibilidade do consumo.

Portugal apresenta, assim, uma **oportunidade estratégica** para a atração de nova procura industrial, com um potencial elevado de contribuição para o crescimento sustentado da economia nacional. No entanto, para viabilizar este crescimento, é **essencial potenciar a nível nacional soluções regulatórias, tecnológicas e novos mecanismos de mercado**, que promovam o desenvolvimento de um sistema elétrico nacional seguro, resiliente e flexível, que permita, por um lado, acelerar a eletrificação da indústria e da mobilidade e, por outro lado, acomodar a nova carga industrial associada, por exemplo, aos centros de dados e à produção de tecnologias limpas como o armazenamento de energia (quer por baterias ou hidrogénio).

1.1. Proposição e ambição

Transpondo os objetivos da janela europeia de Transição Limpa e Descarbonização Industrial, para o enquadramento nacional, propõe-se a definição de uma área estratégica que articule a eletrificação da economia, o desenvolvimento de tecnologias limpas e uma rede elétrica segura, resiliente e flexível. Esta poderá tirar partido do sistema elétrico de energia nacional como plataforma de teste e de aceleração de novos mecanismos regulatórios e de mercado, novas soluções de planeamento e operação de rede, e soluções que promovam a flexibilidade do consumo, num contexto de eletrificação da indústria e mobilidade.

A competitividade industrial nacional, dependerá em grande medida da capacidade do sistema elétrico nacional em acomodar os novos consumos de eletricidade, mantendo a competitividade dos preços da eletricidade assegurados pela integração em larga escala de produção de origem renovável.

Num contexto de **crescimento acelerado do consumo**, a capacidade do sistema elétrico de energia não poderá depender dos tempos associados aos investimentos na expansão e reforço de capacidade da rede elétrica, devendo para isso promover também alternativas baseadas na exploração da flexibilidade, quer pela integração de armazenamento de curto, médio e longo-prazo (hidrogénio), como por mecanismos que promovam a flexibilidade e gestão do consumo. Este racional exige uma mudança acelerada das metodologias de planeamento, operação do sistema, assim como **novos mecanismos regulatórios e de mercado**.

Tal como evidenciado no *blackout* de 28 de abril de 2025 [4], o planeamento e a operação de redes elétricas dominadas por recursos ligados à rede através de conversores eletrónicos requer, ainda, a integração a curto prazo de maior capacidade de monitorização em tempo-real e de soluções de apoio à decisão, que permitam uma resposta mais eficaz e coordenada dos operadores de rede.

A resiliência do sistema elétrico de energia assume uma importância crucial para a sociedade e para a economia, considerando, também, a exposição crescente a fenómenos climáticos extremos, como por exemplo a depressão *Kristin* em 2026, que deixou fora de serviço 774 km de linhas de muito alta tensão,

6000 km de rede de distribuição, afetando um milhão de clientes. A resiliência climática e a interdependência entre infraestruturas requerem a adoção de metodologias de planeamento integradas, incorporando cenários climáticos e eventos extremos, e a sua articulação com as redes de gás e hidrogénio, a água, as telecomunicações e a mobilidade, e a localização das novas cargas industriais e digitais.

O desenvolvimento de infraestruturas computacionais, como a Fábrica e Gigafábrica de inteligência artificial (IA) e outros investimentos privados relacionados, poderá também posicionar Portugal na liderança do desenvolvimento de modelos europeus de IA, em particular modelos fundacionais, para o planeamento e a operação das redes elétricas, contribuindo para a implementação do Roteiro Europeu Estratégico para a Digitalização e a IA no Setor da Energia. Este roteiro, adotado em junho de 2026, promove a integração dos centros de dados no sistema energético, a adoção de soluções digitais e de IA e a partilha transfronteiriça de dados energéticos num espaço de dados comum, prevendo ainda acordos entre centros de dados, setor energético e autoridades públicas, investimento em I&I e o reforço da soberania sobre modelos de IA aplicados a infraestruturas energéticas críticas [6]. No entanto, a disponibilidade de infraestruturas computacionais adequadas, por si só, não é suficiente para desenvolver e acelerar a adoção de soluções de IA em setores críticos, caracterizados por elevados requisitos de segurança, fiabilidade e desempenho e nos quais os fatores humanos desempenham um papel determinante. Torna-se, por isso, **relevante criar um centro nacional de cocriação, experimentação e validação para o setor energético**, no qual soluções desenvolvidas pela indústria nacional possam ser testadas e demonstradas em ambientes representativos das condições reais de operação. Uma abordagem deste tipo encontra paralelo no EUROCONTROL *Innovation Hub*¹, que aproxima a investigação das operações através de infraestruturas avançadas de simulação e validação, envolvendo utilizadores finais e profissionais do setor na avaliação de novos conceitos e tecnologias em cenários que reproduzem condições operacionais reais.

A antecipação dos desafios e desenvolvimento de soluções para o sistema elétrico em 2036, exigem, hoje, uma colaboração estreita entre as entidades do sistema científico nacional, regulador, decisores políticos, operadores de rede e indústria do setor, que nossos atuais mecanismos de financiamento não contemplam suficientemente.

Numa perspetiva de inovação para os próximos 10 anos, o País terá de dispor de capacidades que hoje não existem, do qual se salienta:

- Para 2036 ambiciona-se, assim, que Portugal **reforce posição de liderança a nível europeu** não apenas na integração de tecnologias renováveis e de baixo carbono, mas na capacidade para atração de investimento industrial, alavancados por um sistema elétrico seguro e flexível;

¹ <https://www.eurocontrol.int/innovation-research-simulation>

- **Programa de inovação para a rede elétrica nacional**, desenvolvido num contexto participativo e articulado com as políticas energéticas, estratégias de descarbonização industrial e plano nacional para os centros de dados. Este programa traduz os desafios identificados pelos operadores do sistema e da rede de distribuição, e promove a participação do sistema científico e de inovação nacional e das empresas nacionais e internacionais no desenvolvimento e teste de soluções, facilitando o acesso a dados do sistema energético nacional e da rede elétrica;
- **Reforço da cadeia de valor no setor das tecnologias limpas e para a rede elétrica**, aumentando o número de empresas tecnológicas que desenvolvem, produzem e exportam tecnologias de rede, eletrónica de potência, armazenamento de energia, carregadores de veículos elétricos, entre outras;
- **Planeamento integrado das infraestruturas críticas**, com base em cenários climáticos resolução espacial e temporal adequada para a análise de investimentos em infraestruturas críticas (rede elétrica);
- **Desenvolvimento e operacionalização de uma estratégia nacional para os dados energéticos**, que viabilize o desenvolvimento de modelos de IA para a operação e planeamento da rede elétrica, assim como para facilitar o desenvolvimento de novos serviços para os diferentes atores do sistema;
- **Rede nacional de teste para soluções de descarbonização do setor da energia**, organizada como um contínuo entre laboratório, piloto e rede real, com acesso simplificado e **sandboxes técnicas e regulatórias** e de **teste de soluções digitais para a rede elétrica e sistemas de energia**.

1.2. Contributo para domínio estratégico

A eletrificação e descarbonização industrial constitui uma prioridade e uma oportunidade estratégica nacional, considerando a necessidade de mobilização pública e privada para o desenvolvimento de respostas à transição e resiliência climática, segurança energética, que, por sua vez, assegurem o crescimento económico e a competitividade industrial à escala Europeia.

Enquanto a **capacidade nacional científica, tecnológica e privada apresenta credibilidade e solidez, carece ainda de** um esforço conjunto de **coordenação, e consolidação do ecossistema**, necessário para garantir a definição de políticas e estratégias de eletrificação e descarbonização eficazes, condições de acesso e mecanismos de mercado tecnologicamente agnósticos e competitivos e tecnologias diferenciadoras e inovadoras.

O **setor empresarial da energia**, em particular o setor das energias renováveis, **representa uma contribuição crescente para o produto interno bruto (PIB) nacional** e para o **emprego**. A atividade do tecido empresarial nacional no setor da energia está maioritariamente concentrada em empresas de grande dimensão, que atuam nas áreas da produção, do transporte e da distribuição de energia. O País conta ainda com empresas com atividades industriais relativas ao fabrico de tecnologias para as redes elétricas e com exposição e presença nos mercados internacionais.

A resolução dos desafios estruturais ao sistema elétrico de energia, a aceleração do desenvolvimento tecnológico, e a sua incorporação numa nova geração de soluções e produtos requerem, assim, uma abordagem multidisciplinar baseada nas ciências da engenharia e tecnologias, nas ciências exatas e nas ciências sociais.

A maturidade das capacidades científica e tecnológica carece, no entanto, de resposta a duas limitações que condicionam a sua conversão em valor: (i) continuidade de financiamento e (ii) infraestruturas para as fases intermédias de prototipagem, *scale-up* tecnológico e a sua “produtização”.

O reforço do financiamento plurianual nestas áreas pode assim consolidar a capacidade de atração de financiamento europeu, quer no que respeita às ações de investigação e inovação, quer de valorização e transferência de tecnologia.

A presente proposta surge assim em continuidade, articula os instrumentos nacionais com o FEC e o FP10, articula as agendas de transição energética, de competitividade industrial, digital e de resiliência das infraestruturas críticas, e cria a infraestrutura de investigação, inovação e *interface* que nenhum dos instrumentos assegura.

1.3. Definição e fronteiras

Esta área estratégica nacional abrange o conhecimento, as tecnologias e os serviços necessários para eletrificar a economia, desenvolver e produzir tecnologias limpas e planejar, operar e expandir uma rede elétrica segura, resiliente e flexível, com muito elevada penetração renovável, entendida como ativo crítico da competitividade industrial e digital.

A **rede elétrica** é o pilar que integra os outros dois: operação e planeamento das redes de transporte e distribuição, estabilidade e controlo de sistemas dominados por conversores eletrónicos, serviços de sistema, flexibilidade, mercados e regulação, digitalização, inteligência artificial e cibersegurança aplicadas à rede elétrica, planeamento integrado com as redes de gás e hidrogénio e com as restantes infraestruturas críticas, avaliação do risco climático e reposição de serviço.

A **eletrificação inclui a descarbonização da indústria e da mobilidade**, incluindo o calor de processo industrial, a ligação e a flexibilidade de consumidores eletrointensivos (ex. centros de dados, eletrolisadores) e a mobilidade elétrica, com carregamento inteligente e bidirecional.

O pilar das **tecnologias** inclui tecnologias que o Regulamento Indústria de Impacto Zero considera **estratégicas** — tecnologias de rede, incluindo carregamento e digitalização, armazenamento de energia, bombas de calor e eletrolisadores [9]. Na rede: eletrónica de potência e conversores eletrónicos operados em modo *grid-forming*; medição síncrona e proteção e controlo de área alargada; otimização da rede existente, como capacidade térmica dinâmica das linhas e controladores de fluxo; gémeos digitais, modelos de IA soberanos e cibersegurança de sistemas ciberfísicos; e tecnologias de resiliência, como micro-redes e arranque autónomo. Na eletrificação: bombas de calor de alta temperatura, caldeiras elétricas, aquecimento resistivo, por indução e por plasma [2], armazenamento térmico e carregamento

bidirecional. O seu desenvolvimento deve considerar critérios de circularidade e passaporte digital, incluindo por exemplo a reciclagem de baterias, painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas.

A fronteira é estabelecida pela contribuição para um dos três pilares identificados e pela sua contribuição para a descarbonização, segurança e estabilidade do sistema energético. Identificam-se assim um conjunto de áreas de fronteira:

- **Materiais e Recursos** — Ciência de materiais e química fundamental e extração e refinação de matérias-primas críticas; fica aqui o desenvolvimento a partir do componente, a integração em sistemas, o fabrico e a certificação;
- **Processos industriais e circularidade** — química de processo, matérias-primas renováveis e reciclagem;
- **Plataformas offshore e veículos elétricos** — estruturas flutuantes, engenharia naval e recurso marinho da energia offshore, desenho e desenvolvimento de veículos e sistemas de transporte;
- **Digital e clima** — métodos genéricos de IA e cibersegurança, desenvolvimento de tecnologias quantum, robótica ou engenharia de software, exceto numa perspetiva de aplicação às prioridades desta área; segurança de infraestruturas críticas e proteção civil, exceto no que respeita a segurança energética das infraestruturas críticas;
- **Tecnologias de produção nuclear**, de fissão e de fusão.

2. Prioridades e desafios a dez anos

2.1. Ponto de partida de Portugal

A capacidade científica e de inovação nesta área está estabelecida e consolidada:

- As Ciências da Engenharia e Tecnologias apresentam um índice de especialização relativa de 1,2 face à União Europeia (2019–2024) e são a área com maior fatia do financiamento competitivo nacional entre 2019 e 2025, com 26,7% de 546,9 M€ distribuídos por 3 939 projetos e o financiamento médio por projeto mais elevado do sistema, 152 k€ [10].
- Na área da energia, a massa crítica concentra-se num conjunto delimitado de laboratórios associados, laboratórios do Estado e unidades de I&D com centros dedicados a sistemas de energia, que cobrem em simultâneo a operação e o planeamento de redes, metodologias de previsão da procura, geração, preços de mercado, flexibilidade, a eletrónica de potência, o armazenamento de energia e a modelação de sistemas energéticos. Conta ainda com infraestruturas científicas e tecnológicas relevantes, com participação em redes europeias (e.g. DERlab) e uma integrando o ESFRI, integrando o ERIC EU-SOLARIS.
- Participação alargada em redes, como *European Energy Research Alliance* (EERA), CRESYM, associação constituída por operadores de transporte europeus e instituições de investigação

para projetos colaborativos de modelação de sistemas de energia, e de natureza tecnológica e industrial como CIGRÉ e CIRED.

- As agendas mobilizadoras do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) demonstraram, ainda, a capacidade de mobilização do ecossistema à escala industrial. A Aliança para a Transição Energética (ATE) é a mais significativa do setor da energia, reunindo 80 parceiros, 52 dos quais empresas, em torno da descarbonização, da reindustrialização, da digitalização e da descentralização do sistema energético, com metas de 209,5 M€ de investimento em I&D e 443 M€ de exportações. A Agenda *New Generation Storage* (NGS), por sua vez, endereçou especificamente os tópicos do armazenamento de energia, reunindo 48 entidades em torno de 168,14 M€, com 21 produtos, processos e serviços, oito linhas-piloto e industriais, 102 teses de mestrado e doutoramento, e deixando instalada a única unidade de reciclagem de baterias de iões de lítio da Europa Ocidental.

No que respeita à capacidade empresarial e procura, o setor das energias renováveis contribuiu com 5,3 mM€ para o PIB em 2024 e gerou 62,4 mil empregos [12]. A atividade concentra-se em grandes empresas de produção, transporte e distribuição, a que se juntam empresas industriais de fabrico de tecnologias para redes elétricas com presença internacional. Do lado da procura, as três frentes que o domínio serve crescem em simultâneo: os veículos elétricos (BEV) atingiram 23,2% [12] do mercado de ligeiros novos em 2025, a rede pública de carregamento tem 14 747 pontos de carregamento com uma potência instalada de 539 MW [13], e o país tem mais de 2,6 GW de capacidade de centros de dados planeada, mas que poderão aumentar significativamente com cerca de 44 manifestações de interesse conhecidas.

A principal lacuna não é de ausência de capacidade, mas de coordenação e conversão. Identificam-se quatro lacunas estruturais:

- Entre 2021 e 2026, as entidades nacionais captaram 117 M€ na área da energia, uma taxa de captação de 2,6% [14]. A taxa de aprovação de 26,4%, acima da média, indica que existe uma limitação de escala e de continuidade da participação, não de qualidade científica, concluindo-se assim que é uma área de elevado potencial para atrair financiamento europeu.
- A continuidade da cadeia de valor tem limitações, em particular nas fases de validação, de prototipagem e de demonstração [10]. Este ponto é particularmente crítico no desenvolvimento e *scale-up* de tecnologias críticas e limpas e resulta, por da ausência de estratégia nacional para as infraestruturas científicas e tecnológicas, como também da ausência de financiamento nacional de base para as infraestruturas científicas e tecnológicas, tal como indicado abaixo.
- O tecido empresarial na área da energia é dominado por micro e pequenas e médias empresas sem escala nem qualificação interna para absorver investigação ou cofinanciar validação. Portugal situa-se entre 50% e 60% da média europeia em patentes e criação de empresas *deep-tech*, e a participação empresarial no programa europeu mantém-se reduzida [10]. Existe, no entanto, a possibilidade de

colaboração com empresas relevantes do setor, com equipas de inovação em Portugal e que poderão beneficiar das competências científicas e nacionais, no desenvolvimento de novos produtos, geradores de mais emprego e investimento em Portugal.

- Ausência de enquadramento de acesso aos dados do sistema de energia que permita ao sistema científico e às empresas desenvolver e testar soluções.

2.2. Posições portuguesas a avaliar e prioridades de investigação e inovação

Portugal poderá ter uma posição diferenciadora nas seguintes áreas:

- **Operação de redes dominadas por conversores eletrónicos:** caracterizar os desafios técnicos e desenvolver soluções de monitorização, controlo, proteção e de avaliação da segurança dinâmica que assegure a segurança e estabilidade do sistema de energia nacional para um conjunto de perturbações críticas, num contexto de interligação ibérico e europeu. Abrange ainda a modelização de instalações de geração, armazenamento e de cargas industriais baseadas em conversores eletrónicos (e.g. centros de dados e eletrolisadores) com impacto relevante na estabilidade e operação do sistema. O desenvolvimento de um *digital twin* do sistema ibérico poderá contribuir para monitorizar a segurança dinâmica do sistema e identificar e definir e quantificar os volumes de serviços de sistema necessários para assegurar a estabilidade e segurança do sistema, assim como definir estratégias de reposição de serviço mais eficazes. A competência científica e de inovação nacional, poderá assim ser alavancada por um esforço de investimento e coordenação público, que viabilize a disponibilização de dados relevantes do sistema elétrico de energia nacional e da perspetiva da sua evolução. É importante, ainda, alargar esta caracterização às redes de distribuição, para que os estudos sejam desenvolvidos numa perspetiva integrada da rede de transporte e distribuição.
- **Flexibilidade da procura e integração de novas cargas industriais,** assegurando, por um lado, a capacidade do sistema elétrico nacional e promovendo, por outro lado, a flexibilidade do consumo. A integração de novos consumos industriais deve ser considerada promovendo uma componente de inovação, que assegure soluções de flexibilidade e suporte à operação da rede, mantendo os requisitos de funcionamento da carga. Este esforço é particularmente relevante no caso dos centros de dados, em particular para IA, cujo potencial de flexibilidade do consumo e impacto na rede carece de estudo e de definição das medidas adequadas. Tendo em conta o crescimento industrial esperado, existe assim o potencial de esta ser uma área diferenciadora a nível internacional, no que respeita em particular os aspetos relacionados com a gestão de energia e integração na rede. Por outro lado, a flexibilidade dos pequenos consumos terá uma importância crescente para a operação e estabilidade do sistema, exigindo soluções de agregação e mecanismos de mercado que promovam a sua participação. Esta prioridade exige ação pública porque depende das condições impostas para o licenciamento dos novos

consumos, das condições de ligação à rede e desenho dos mecanismos de mercado de energia e mercados locais de flexibilidade.

- **Planeamento integrado e resiliência climática das infraestruturas crítica**, tendo em conta cenários climáticos nos modelos de planeamento, modelação de interdependências entre eletricidade, gás, água, telecomunicações e mobilidade, risco climático dos ativos, e reposição de serviço com prioridade a cargas críticas. A Diretiva (UE) 2022/2557, transposta pelo Decreto-Lei n.º 22/2025, de 19 de março, e complementada pela Avaliação Nacional de Risco e pela Estratégia Nacional para a Resiliência das Entidades Críticas, estabelece uma arquitetura de segurança interna e multirrisco, centrada na identificação de entidades e na aprovação de planos. Não são fixados requisitos de quantificação probabilística do risco climático, nem se articula com o regulador setorial e o ciclo de planeamento e investimento das redes. Propõe-se o investimento em I&D orientado para o desenvolvimento de metodologias que integram a geração de cenários climáticos, com resolução espacial e temporal adequada à análise de investimentos em infraestruturas críticas, combinado meteorologia, estatística, IA, engenharia e técnicas de monitorização remota, explorando informação proveniente de outros setores e fontes, incluindo imagens de satélite, dados de observação da Terra e outros produtos geoespaciais, para melhorar a caracterização da exposição, vulnerabilidade e risco das infraestruturas. Um objetivo fundamental deverá ser desenvolver um modelo climático estocástico para a Península Ibérica que permita aos operadores de infraestruturas interligadas quantificar riscos climáticos, avaliar dependências entre sistemas e testar a robustez de opções de investimento futuro, em articulação com iniciativas europeias como o *Destination Earth* e o *Copernicus*. Para o setor elétrico, estas capacidades deverão ser acompanhadas pelo desenvolvimento de métodos probabilísticos de planeamento de redes e simulação de mercados de eletricidade, capazes de representar explicitamente a incerteza associada ao clima, à procura, à produção renovável, à disponibilidade dos ativos e à evolução tecnológica, permitindo comparar alternativas de reforço através de métricas de fiabilidade, resiliência, risco e custo, e também suportar políticas públicas. A adoção destas metodologias exige igualmente reforçar a literacia dos decisores em matéria de decisão sob incerteza e risco, promovendo uma utilização mais sistemática de distribuições de probabilidade, cenários, intervalos de confiança e métricas de risco no planeamento de infraestruturas. O desenvolvimento desta prioridade requer iniciativa pública, capaz de promover a articulação entre diferentes domínios científicos, operadores de infraestruturas, entidades públicas e reguladores, bem como criar condições para a experimentação, validação e adoção destas metodologias nos processos de planeamento e decisões sobre opções de política pública.
- **IA para sistemas energéticos sustentáveis**, considerando três linhas fundamentais de I&D. (1) **desenvolvimento de modelos fundacionais** para o setor da capazes de aprender a estrutura e a dinâmica do comportamento das redes elétricas dentro dos novos paradigmas de operação e de servir múltiplas tarefas simultaneamente, tais como: previsão, gestão de congestionamentos,

monitorização de ativos, apoio ao planeamento e serviços de flexibilidade, suporte à reposição de serviço rápida (podendo envolver mecanismos de segmentação e operação em rede isolada explorando sistemas de armazenamento e geração renovável) criando soluções modulares e com economia de escala. A participação no grupo fundador da iniciativa europeia *AI.grids*, promovida pela DG ENER, e no grupo transatlântico GridFM promovido pela IBM e Hydro-Québec, coloca Portugal na liderança desta área, sustentada em competências sólidas na área da IA aplicada aos sistemas de energia; (2) **criação de uma nova geração de IA**, com hibridização de modelos físicos, dados e conhecimento, tirando partido do conhecimento de domínio acumulado no setor energético nacional para desenvolver modelos de decisão baseados em IA mais compactos, eficientes e interpretáveis. Esta abordagem constitui uma alternativa complementar aos grandes modelos de IA, que apresentam requisitos computacionais e de manutenção mais elevados e, em muitos casos, menor transparência e interpretabilidade dos processos de decisão; (3) **modelos frugais de IA** para execução no *edge*, orientados para o controlo inteligente, distribuído e coordenado de dispositivos e ativos ligados à rede elétrica, em diferentes escalas espaciais e níveis da infraestrutura. Esta linha poderá beneficiar da capacidade industrial existente em Portugal no desenvolvimento de sistemas embarcados inteligentes, promovendo soluções de baixo consumo computacional, elevada autonomia e aplicação direta em contexto industrial. **A identificação desta área como prioridade nacional permitirá reforçar o investimento contínuo na ciência e inovação**, para permitir beneficiar dos resultados desta iniciativa. Será ainda relevante articular com outras iniciativas nacionais como a candidatura ibérica à gigafábrica de IA, complementada por uma estratégia nacional de dados energéticos e enquadramento de acesso regulado para investigação.

- **Integração de gases renováveis nas redes de distribuição de gás:** a rede de distribuição de gás portuguesa é das mais recentes da Europa e tem vindo a integrar um número crescente de pedidos de ligação produtores de gases renováveis, hidrogénio e biometano. A aceleração da integração de gases renováveis, representa uma importante complementaridade à eletrificação dos consumos, em particular na descarbonização dos processos industriais de calor de altas temperaturas. Os desafios passam pelo desenvolvimento de metodologias e de ferramentas adequadas ao planeamento e operação de redes de gás, tendo em conta as injeções distribuídas, fluxos bidirecionais, controlo de pressões e monitorização da qualidade da mistura, que poderão beneficiar das competências relevantes no setor elétrico. Adicionalmente, o **planeamento integrado indústria-infraestruturas** permitirá ainda apoiar, de forma mais eficaz, a evolução industrial, nomeadamente estudos detalhados da localização da procura (atual e futura), capacidade de ligação, flexibilidade e armazenamento.
- **Tecnologias estratégicas para a rede e a eletrificação:** a conversão de competência científica em capacidade industrial deve concentrar-se nas tecnologias que a UE classificou como estratégicas no Regulamento Indústria de Impacto Zero. **A diferenciação nacional poderá**

decorrer em duas classes de tecnologias estratégicas: as que têm capacidade industrial instalada, nomeadamente: tecnologias de rede e de eletrónica de potência, armazenamento de energia, infraestrutura e sistemas de gestão de carregadores elétricos; e as tecnologias limpas emergentes cuja base industrial não está desenvolvida, como painéis fotovoltaico de filme fino ou flexível, químicas alternativas de armazenamento estacionário, componentes de baixo carbono para sistemas de armazenamento e armazenamento térmico (e.g. elétrodos, cátodos, eletrólitos, entre outros). Para que Portugal possa posicionar-se na atração de financiamento europeu é essencial assegurar um financiamento plurianual às atividades de I&I e às infraestruturas nacionais existentes, que viabilizem o *scale-up* das tecnologias e facilitem o acesso a financiamento europeu *deep-tech*. A promoção de programas de acesso e cooperação com infraestruturas de interface transfronteiriças e europeias poderão ainda evitar investimento e duplicação de capacidades laboratoriais.

2.3. Rota até à escala

A definição de um **programa de inovação para a rede elétrica nacional** é uma iniciativa essencial para articular consistente e eficientemente as entidades do sistema científico e de inovação e os principais atores do sistema elétrico nacional. Este programa deverá ter como objetivos, a definição de uma estratégia de acesso aos dados do sistema energético nacional e da rede elétrica de transporte e distribuição, facilitar a partilha de dados (anonimizados) de recursos energéticos distribuídos, como instalações de produção, armazenamento, carregamento de veículos elétricos, que viabilizem o desenvolvimento um *digital twin* da rede ibérica, e o acesso a dados relevantes para o teste de aplicações de previsão, gestão e controlo do sistema de energia.

Este programa poderá desenvolver-se com base num plano de inovação para o sistema de energia nacional, definido com base nos objetivos das políticas energéticas e de descarbonização e que poderá desencadear um conjunto de iniciativas com participação de financiamento privado. Como resultados, esperam-se **benefícios para os operadores do sistema e da rede de distribuição** na definição das estratégias de planeamento e operação de rede, desenho e volume de serviços de sistema e de flexibilidade, como também o desenvolvimento de **novas ferramentas relevantes aos restantes atores do sistema**, quer para o desenvolvimento de estratégias de negócio sustentáveis, como para assegurar critérios de ligação à rede e de flexibilidade adequados às condições de operação.

A evolução do programa poderá operacionalizar-se através da criação de um **centro nacional de cocriação, experimentação e validação para o setor energético**, direcionado à validação de soluções desenvolvidas pela indústria nacional. Este centro poderá recorrer a gémeos digitais e humanos para acelerar a maturação tecnológica, permitindo simultaneamente explorar o potencial da IA generativa no desenvolvimento de soluções, na experimentação e na incorporação sistemática de requisitos, conhecimento e *feedback* humanos.

Numa perspetiva de atração de maior financiamento europeu, recomenda-se o desenvolvimento de mecanismos de financiamento nacional que promovam: ações em áreas estratégicas como a de aplicação de IA aos sistemas elétricos sustentáveis; participação nas parcerias europeias, redes e outros fóruns de influência na política de inovação relevantes; o ecossistema nacional através da continuidade das ações de I&D entre as entidades do sistema científico e de inovação e as empresas nacionais do setor; o financiamento de base das infraestruturas científicas e tecnológicas.

2.4. Seleção e decisões estratégicas

As prioridades identificadas requerem formas de ação distintas. Propõe-se a seguinte repartição, sujeita a discussão e a revisão periódica:

- **Liderar** prioridades relacionadas com a operação de redes dominadas por inversores, flexibilidade da procura e integração de novas cargas industriais, e IA para os sistemas energéticos sustentáveis. Estas áreas apresentam capacidade científica e tecnológica consolidada e reconhecida internacionalmente, tendo potencial para atrair maior financiamento europeu e privado;
- **Construir e consolidar a capacidade nacional**, no que respeita o planeamento integrado e resiliência climática e a integração de gases renováveis nas redes de distribuição, com impacto relevante para as políticas energéticas e de descarbonização nacional.

Relativamente às tecnologias estratégicas e limpas, sugere-se desenvolver através de cooperação europeia. Em primeiro lugar, será necessário mapear as competências, capacidades laboratoriais, caracterizar lacunas e identificar as áreas de nicho que poderão diferenciar a capacidade nacional. O esforço deve concentrar-se nos segmentos com capacidade comprovada nacional e nas tecnologias emergentes cuja base industrial não está fixada, participando nas cadeias europeias para o restante. A cooperação com infraestruturas de interface transfronteiriças evita duplicação de capacidade laboratorial.

- **Prioridades excluídas na delimitação desta área prioritária:** A produção de hidrogénio ao nível do dispositivo, por dispersão das competências nacionais e por insuficiência de resultados consolidados; o hidrogénio mantém-se no domínio como carga flexível, vetor de armazenamento e gás a integrar na rede. O desenvolvimento de tecnologia de eletrificação de processos de alta temperatura, onde a massa crítica é insuficiente e a posição defensável é a de acolhimento de demonstração e integração da flexibilidade industrial. A energia oceânica nas componentes de estrutura e recurso, que pertencem ao domínio do mar, mantendo-se a solução de interface e interligação à rede elétrica.

Propõe-se reavaliação das prioridades e ações segundo quatro critérios: adoção dos resultados das prioridades de liderança, captação de financiamento europeu na área da energia, utilização regular das infraestruturas científicas e tecnológicas nacionais por empresas e entidades do

sistema científico e de inovação, a incorporação de novas tecnologias nas empresas do setor e desenvolvimento de produtos nacionais certificados para o mercado internacional, a contribuição efetiva para a definição e revisão de políticas públicas.

3. Valor acrescentado e contributo para o país e autonomia após cinco anos

Os contributos e as prioridades identificados poderão valorizar o domínio no que respeita: ao **conhecimento científico**, pela produção de evidência e de métodos inexistentes; na **inovação**, pela conversão dessa evidência em soluções adotadas pelos operadores nacionais e em produtos e serviços exportáveis; e na **sustentabilidade** e na **economia**, porque a capacidade de integrar nova procura e nova produção condiciona o ritmo de descarbonização da indústria e da mobilidade, e porque a capacidade de ligação à rede constitui fator de decisão na localização de investimento industrial e digital.

Quanto à autonomia, impõe-se uma distinção. Uma parte dos resultados, tais como a contribuição para a segurança de abastecimento, resiliência de infraestruturas críticas, métodos de planeamento de monopólios regulados, constituem prioridades da política pública e do respetivo investimento. No entanto, a capacidade de atração de financiamento competitivo europeu e investimento privado, poderá contribuir para a redução progressiva da dependência de financiamento público nacional. A condição é que o investimento público nacional do primeiro quinquénio seja dirigido ao reforço das atividades do ecossistema e investimento nas áreas com potencial liderança, assegurando o financiamento base das infraestruturas científicas e tecnológicas e da participação ativa em redes e iniciativas europeias.

Valor acrescentado e contributos para o país e autonomia após cinco anos	Tipologias de financiamento	Condições para a transição
Enquadramento de acesso a dados do sistema energético nacional, em particular da rede elétrica.	Investimento público nacional não recorrente; operação integrada nos proveitos regulados dos operadores	Decisão regulatória sobre categorias de dados, condições de acesso, confidencialidade e responsabilidade, alinhada com o Espaço Europeu Comum de Dados da Energia.
Infraestruturas de ensaio e demonstração com acesso aberto e indicadores de utilização	Financiamento de base plurianual para operação, receitas próprias decorrentes de projetos competitivos e serviços.	Financiamento de base estável que cubra operação, manutenção, atualização tecnológica e retenção de equipas. Esforço conjunto para a integração das infraestruturas nacionais como europeias.
Estratégias de planeamento integrado do sistema energético nacional, incluindo análise de riscos e de resiliência	Financiamento de base plurianual para o desenvolvimento de novas metodologias em articulação/cofinanciamento pelos operadores de rede	Enquadramento regulatório que reconheça despesa de I&D e determine novos requisitos de planeamento alinhado com as práticas europeias e os desafios futuros do sistema
Participação crescente nos programas europeus na área da indústria	Horizonte Europa, FP10 e parcerias europeias	Aumento do volume de submissão; Articulação entre instituições que concorrem isoladamente; Apoio

Valor acrescentado e contributos para o país e autonomia após cinco anos	Tipologias de financiamento	Condições para a transição
		alargado à procura e preparação das candidaturas.
Tecnologias nacionais em <i>scale-up</i> , com primeiros produtos certificados para o mercado europeu	Janela de Transição Limpa do FEC, Pilar II do FP10 e STEP; coinvestimento industrial e capital privado	Consórcios com continuidade entre ciclos de financiamento; estrutura dedicada de acompanhamento de candidaturas
Quadros qualificados formados em contexto operacional, com mobilidade entre academia, operadores e indústria	Programas doutorais em contexto empresarial; cofinanciamento dos operadores e da indústria	Percursos de carreira entre setor público e privado; retenção face à concorrência internacional

3.1. Riscos e salvaguardas

O primeiro risco é o de **captura por interesses instalados**. O domínio tem poucos utilizadores finais, alguns dos quais monopólios regulados, e assenta numa base científica concentrada. Nesse sentido, a mesma concentração que lhe confere massa crítica pode estreitar e refletir apenas as necessidades de curto prazo de um conjunto restrito de atores. A salvaguarda consiste em promover a cooperação entre as diferentes entidades, promover o acesso aberto às infraestruturas e aos resultados de investigação, quando aplicável e numa governação que inclua o regulador e os restantes atores do sistema de energia.

Segue-se o risco de **dispersão**. A amplitude do domínio justifica-se pela interdependência das prioridades, mas expõe-no à diluição. Assim, as prioridades que, após dois ciclos, não tenham utilizador final identificado devem ser descontinuadas em 2029, e não mantidas por inércia.

O risco de **duplicação** decorre das fronteiras ativas com os domínios de materiais, circularidade, mar, mobilidade e digital, e da sobreposição potencial com instrumentos nacionais e europeus em vigor. A fronteira por maturidade tecnológica e a articulação explícita com esses instrumentos são as salvaguardas disponíveis. Assim, a monitorização de impacto dos resultados obtidos nas entidades públicas e privadas é essencial e a ausência de maturidade das soluções produzidas constitui o sinal mais visível de falha.

O **desalinhamento com agendas externas** reduz a escala e o possível impacto e potencial de internacionalização. No entanto, a participação nas iniciativas europeias que definem essas agendas é simultaneamente salvaguarda e indicador: a exclusão nacional de iniciativas estruturantes do setor sinaliza perda de influência, e o desalinhamento face aos programas de trabalho europeus, em 2029 ou em 2032, justifica redirecionamento das prioridades.

O último risco, e o mais provável, é a **ausência de procura nacional ou de capacidade de absorção**, já sinalizado pela evidência reunida na secção 2.1. Mitiga-se pela ligação das infraestruturas às

necessidades das empresas e pela articulação com equipas de inovação de empresas internacionais sediadas em Portugal. A baixa utilização empresarial das infraestruturas e a ausência de cofinanciamento privado são os sinais a vigiar e poderá conduzir a uma revisão das prioridades ou mecanismos de financiamento, promovendo por exemplo mecanismos que promovam o financiamento de *start-ups*.

Em termos agregados, o **reforço da aposta em 2029 depende da verificação cumulativa de três condições: a adoção dos resultados pela indústria, a captação europeia de financiamento na área da energia e a contribuição efetiva para a definição, monitorização e eventual revisão das políticas públicas. Em 2032, a manutenção exige evidência de produtos nacionais certificados e de receita própria das infraestruturas científicas e tecnológicas.**

Referências

- [1] Draghi, M. (2024). The future of European competitiveness. Comissão Europeia, setembro de 2024.
- [2] Comissão Europeia, Direção-Geral da Energia; Ecorys e VITO (2026). Study on pathways and policies for accelerating electrification and use of renewables in industry — Final report. Serviço das Publicações da União Europeia, 21 de julho de 2026. ISBN 978-92-68-36896-1, doi:10.2833/5174805.
- [3] Associação Portuguesa da Energia (2026). Competitividade Energética como Vetor de Reindustrialização. White Paper. [Online] <https://apenergia.pt/competitividade-energetica-como-vetor-de-reindustrializacao/>
- [5] ENTSO-E (2026). Grid Incident in Spain and Portugal on 28 April 2025 — ICS Investigation Expert Panel Final Report, 20 de março de 2026. [Online] <https://www.entsoe.eu/news/2026/03/20/entso-e-publishes-expert-panel-final-report-on-28-april-2025-blackout-in-spain-and-portugal>
- [6] EERA (2026). EU Commission presents European Technological Sovereignty Package, including roadmap for energy sector digitalisation and AI, junho de 2026. [Online] <https://eera-set.eu/news-and-resources/8594-eu-commission-presents-european-technological-sovereignty-package-including-roadmap-for-energy-sector-digitalisation-and-ai.html>
- [9] Regulamento (UE) 2024/1735 (Regulamento Indústria de Impacto Zero) e Regulamento (UE) 2024/1252 (Regulamento das Matérias-Primas Críticas).
- [10] PLANAPP, DGE e DGEPA (2026). Avaliação estratégica para a definição das prioridades nacionais de investigação e inovação no âmbito da criação da AI² — Relatório de Focagem Estratégica e Anexos, junho de 2026.
- [11] APREN e EY-Parthenon (2026). Estudo de impacto das energias renováveis em Portugal, abril de 2026. [Online] <https://www.apren.pt/wp-content/uploads/2026/05/Estudo-impacto-das-energias-renovaveis-PT-2026.pdf>
- [12] ACAP — Associação Automóvel de Portugal (2026). Mercado automóvel em Portugal com crescimento de 6,2 por cento em 2025, 2 de janeiro de 2026. [Online] <https://www.acap.pt/index.php?route=base/pt/noticia/1283/mercado-automovel-em-portugal-com-crescimento-de-62-por-cento-em-2025>
- [13] MOBI.E (2026). Rede de carregamento conectada à MOBI.E regista recorde de carregamentos em abril com mais de 898 mil sessões, 11 de maio de 2026. [Online]. <https://mobie.pt/w/comunicado-abril-2026>
- [14] ANI (2026). Horizonte Europa: a energia como motor de excelência científica e inovação nacional, 13 de julho de 2026. <https://ani.pt/horizonte-europa-a-energia-como-motor-de-excelencia-cientifica-e-inovacao-nacional/>