

POSITION PAPER

DIGITALIZAÇÃO DA INDÚSTRIA TRANSFORMADORA

Resultado Iniciativa Bottom-Up AI² promovida pelo INESC TEC

Autores: António Almeida; António Lucas Soares; Américo Azevedo; Luís Carneiro

Entidades que contribuíram e apoiam o documento: Amorim Cork, S.A: APICCAPS – Associação Portuguesa dos Industriais de Calçado, Componentes, Artigos de Pele e seus Sucedâneos; Amorim Cork S.A; CITEVE; The Navigator Company, PALBIT S.A; PRODUTECH- Pólo das Tecnologias de Produção

30 de setembro 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. Recebeu contributos e apoio das entidades acima indicadas, refletindo uma comunidade de interesse partilhado em torno da digitalização da indústria, transversal ao Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação.

Sumário Executivo

Num contexto em que os dados industriais passaram de subproduto a base sobre a qual se decide, se coopera e se acede às cadeias de valor, o presente documento sinaliza a **digitalização da indústria transformadora como área estratégica nacional**: a capacidade científica e de engenharia para (i) conceber, integrar, rastrear e operar sistemas produtivos e cadeias de valor sustentáveis e resilientes, com decisões (humanas e automáticas) assentes em dados e em métodos híbridos que combinam analítica, aprendizagem e conhecimento de domínio, otimizando a afetação de recursos, os processos e a utilização das capacidades instaladas; (ii) governar esses dados dentro e entre organizações; e (iii) formular os requisitos e alavancar a adoção de inteligência artificial (IA) e de robótica nas condições reais da produção, para aumentar a flexibilidade e a produtividade dos sistemas produtivos e das cadeias em que se inserem. Não se trata apenas de digitalizar a fábrica: a mesma capacidade estende-se à gestão integrada da cadeia de valor a montante e a jusante (da matéria-prima ao cliente final), para que a indústria nacional conceba produtos mais complexos e diferenciadores, explore modelos de negócio de base digital e ocupe posições de maior valor acrescentado nas cadeias em que participa. A área tem dois destinatários inseparáveis: a indústria transformadora e as empresas tecnológicas nacionais de sistemas avançados de produção, que precisam de incorporar estas tecnologias na sua oferta para responder à procura da primeira. A referência de avaliação é a produtividade da organização e da cadeia, à qual os ganhos individuais e locais devem contribuir.

Mensagens-chave

1. A digitalização deixou de ser vantagem competitiva e passou a condição de admissão às cadeias de valor mais exigentes.

As obrigações de informação que a regulação europeia impõe a quem coloca produtos no mercado declinam-se contratualmente até aos fornecedores, e chegam antes da lei que as origina: desde 2025, o registo no espaço de dados automóvel Catena-X faz parte do processo de aprovisionamento de construtores europeus, e fornecedores de primeira linha exigem já dados de pegada de carbono verificáveis por componente [14, 15]. A indústria portuguesa enfrenta esta transição em posição desfavorável: maioritariamente fornecedora, com intensidade digital inferior à média europeia [7] e sem capacidade instalada para produzir a evidência exigida a partir dos seus dados de operação; mas é também uma oportunidade de diferenciação e de proteção face a concorrentes de outras geografias. No horizonte de dez anos, a capacidade de fornecer dados fiáveis, auditáveis e com transparência ao longo da cadeia determinará a permanência na cadeia tanto quanto hoje o preço e a qualidade.

2. O investimento em tecnologia não produziu convergência, porque falta a capacidade de a integrar.

Cerca de 64% das PME portuguesas apresentam, pelo menos, intensidade digital básica, contra 71% na UE; a computação na nuvem em 34% contra 47%; a inteligência artificial em 11,5% contra cerca de 20% [7], e o desvio persiste apesar de existir financiamento dedicado [8]. A relação entre digitalização e produtividade não é automática: a evidência internacional mostra que os retornos do investimento em tecnologias digitais dependem de investimentos complementares em inovação, processo, organização e competências, e são reduzidos na sua ausência. É essa capacidade complementar, maturidade e experiência de a integrar no desenvolvimento de novos produtos, modelos de negócio e em sistemas produtivos reais, que o investimento nesta área se propõe construir.

3. A adoção de IA e de robótica na indústria não falha por falta de tecnologia, mas por falta de requisitos formulados a partir das condições reais de produção.

As soluções de mercado pressupõem séries longas, dados abundantes e ambientes estruturados; a indústria portuguesa opera, em parte significativa, com séries curtas, elevada variedade, equipamento legado e matéria-prima variável. Ambas as tecnologias atravessam as três prioridades deste domínio como meio e não como fim: investiga-se a inteligência artificial industrial, que aprende sob escassez estruturada de dados, opera sobre dados governados, quantifica a própria incerteza, decide em tempo útil com regras que quem opera pode inspecionar, e coopera entre organizações sem transferência de dados, e a integração robótica que devolve flexibilidade à célula e à linha, com colaboração humano-robô verificável. Formular esses requisitos, demonstrá-los em contexto real e alavancar a adoção determina se a próxima geração de tecnologia industrial é concebida para as condições da indústria nacional.

4. A soberania tecnológica não se esgota nos dados: depende também de quem produz os sistemas avançados de produção.

Uma indústria que adota IA e robótica com equipamento, *software* e integração integralmente importados não reduz a dependência externa, transfere-a do produto para o meio de produção, agravando-a à medida que a digitalização avança. Portugal dispõe de uma base de empresas

tecnológicas de sistemas avançados de produção, construtores de máquinas e equipamento, integradores de sistemas, empresas de automação e de software industrial, que a rede das Agendas Mobilizadoras consolidou e que pode responder a esta procura, desde que capacitada para incorporar tecnologia de ponta. Esta área serve, por isso, dois destinatários: as empresas industriais que adotam e as empresas tecnológicas que desenvolvem.

5. A soberania sobre os dados industriais determina quem captura o valor da IA industrial. As arquiteturas europeias de espaços de dados estão especificadas do ponto de vista de quem orquestra a cadeia e pressupõem parceiros com maturidade digital própria, perfil que a maioria do tecido industrial europeu não tem. Sem governação e contextualização próprias, as empresas nacionais partilham dados sem garantias e cedem a terceiros a capacidade de os transformar em decisões. À medida que a IA industrial se consolidar, o valor deslocar-se-á da produção para quem detém os dados de operação e a capacidade de os interpretar; a alternativa exige arquiteturas e modelos de governo que protejam o conhecimento industrial, promovendo a cooperação na cadeia. Essa é uma capacidade a construir, não a adquirir.

6. As Agendas Mobilizadoras deixaram uma rede de cooperação que importa preservar e cujo potencial pode não ser integralmente aproveitado. Trinta das cinquenta e três agendas têm impacto industrial, envolvendo mais de mil entidades entre empresas, centros de interface e instituições científicas [9–11]; só o PRODUTECH R3 reúne 106 parceiros (45 fornecedores de tecnologia e 37 utilizadores industriais) e 52 projetos-piloto [12]. Essa composição é, em si, um dado: a rede é, em parte substancial, a própria base nacional de oferta tecnológica de produção. O que daí resulta de mais valioso, além dos resultados contratualizados, são atores que aprenderam a trabalhar em conjunto, infraestruturas instaladas e pessoas formadas em contexto industrial, o elemento mais lento e mais caro de construir num sistema de inovação, e o primeiro a dissipar-se quando o programa termina, salvo infraestrutura permanente que o sustente [13]. Propõe-se converter essa rede em capacidade duradoura, com as infraestruturas abertas a quem não participou.

1. A área e a sua ambição

1.1. Proposição e ambição

Propõe-se uma **missão de reposicionar a indústria nacional nas cadeias de valor globais**, com particular incidência nas europeias, e de aumentar a produtividade, através da capacitação das empresas industriais **para conceber e produzir produtos mais complexos e diferenciadores e para gerirem a relação com o cliente final por meio de modelos de negócio de base digital**. O mecanismo não é a aquisição de tecnologia, mas a construção de três capacidades: i) integrar tecnologia digital em sistemas produtivos e de apoio à gestão que operam com equipamento legado, séries curtas e matéria-prima variável, de modo a que as decisões (humanas e automáticas) passem a assentar em dados e em métodos híbridos que combinam analítica, aprendizagem e conhecimento de domínio, otimizando a afetação de recursos, os processos e a utilização das capacidades instaladas; ii) governar esses dados,

garantindo a sua qualidade, contextualização e auditabilidade, dentro de cada empresa e entre organizações que cooperam mantendo objetivos e poder negocial distintos; e iii) formular os requisitos e alavancar a adoção de inteligência artificial e de robótica nas condições reais da produção, convertendo condições industriais caracterizadas em especificações, arquiteturas de referência e protocolos de validação, e demonstrando-as em sistemas produtivos reais.

A ambição tem dois destinatários inseparáveis. O primeiro é a indústria transformadora, que precisa de integrar tecnologias digitais e governar os seus dados para se reposicionar nas cadeias de valor. O segundo são as empresas tecnológicas nacionais de sistemas avançados de produção, construtores de máquinas e equipamento, integradores de sistemas, empresas de automação e de software industrial, que precisam de incorporar inteligência artificial e robótica de ponta na sua oferta para responder a essa procura. Tratá-los separadamente é o que tem impedido a convergência: sem procura qualificada, a oferta nacional não tem para quem desenvolver; sem oferta nacional capaz, a modernização da indústria traduz-se na importação de sistemas concebidos para outras condições de produção.

Estas capacidades são condição de participação nas cadeias de valor mais exigentes, onde a interoperabilidade e a rastreabilidade apoiada em dados contextualizados, que funcionam, por exemplo, como evidência para passaportes digitais de produto [16], deixaram de ser diferenciadoras e passaram a requisitos (order qualifiers). São também a base da utilização transparente, segura, confiável e explicável da IA industrial: sem dados governados, os sistemas de apoio à decisão são inaplicáveis ou não auditáveis. Trata-se, no essencial, de desenvolver conhecimento, capacidade e soluções nacionais que aumentem a soberania tecnológica e industrial face a mercados e cadeias externos, com impacto na rastreabilidade da produção, na qualidade, na minimização do consumo de recursos e energia e na incorporação de materiais circulares ou de base biológica, uma digitalização que sirva a sustentabilidade no triple bottom line e sustente cadeias de valor nacionais mais cooperativas, resilientes e adaptativas.

Produtividade da organização e da cadeia

A produtividade que este domínio pretende reforçar é a da organização no seu conjunto, considerando o valor gerado e os recursos mobilizados ao longo do processo produtivo. A melhoria do desempenho de pessoas, equipamentos ou tarefas deve ser avaliada pelo seu contributo para esse resultado global. Executar mais tarefas ou reduzir o tempo de uma operação não representa necessariamente um ganho de produtividade da organização se persistirem estrangulamentos, falhas de coordenação, esperas ou retrabalho noutras etapas.

O mesmo raciocínio aplica-se à cadeia de valor: um ganho numa empresa que se obtenha por transferência de custo, de stock ou de risco para montante ou para jusante não é um ganho da cadeia, e a posição que a empresa nela ocupa depende do desempenho do conjunto. A digitalização deve, por isso, apoiar a coordenação entre funções e entre organizações, a identificação das restrições do sistema e a tomada de decisões que melhorem o desempenho coletivo.

O contributo individual continua a ser relevante, incluindo atividades de cooperação, aprendizagem e transmissão de conhecimento cujo benefício não é captado por métricas de produção imediata. Os sistemas de apoio à decisão e de colaboração humano-máquina devem ser concebidos e avaliados pelo seu efeito sobre a capacidade da organização para produzir valor, sem reduzir esse objetivo à intensificação do trabalho ou à monitorização individual de desempenho.

Capacidades a desenvolver até 2036

Em 2036, antevê-se que existirão em Portugal capacidades que hoje não existem de forma sistemática:

Sistemas produtivos que se explicam. Uma fábrica capaz de reconstruir, para qualquer instante do passado, o contexto completo em que qualquer dado foi gerado e, a partir daí, diagnosticar o seu próprio estado, identificar estrangulamentos e propor alterações que um gestor não especializado compreende e pode contestar. Capaz de representar explicitamente o que consegue fazer, que operações, em que condições, com que desempenho, qualidade, custo, prazo e impacto ambiental, incluindo limites, incertezas e estados de degradação, deixando de estar dispersa em manuais, parametrizações rígidas e conhecimento tácito, e passando a modelo mantido e corrigido pela própria operação. Inclui a integração digital de equipamento legado por retrofit não intrusivo e contextualização semântica, a custo compatível com PME e sem substituição do parque produtivo.

Cadeias e sistemas produtivos que se adaptam. Produção, logística interna, interfaces de informação com a logística externa e controlo de qualidade que se ajustam a novo produto ou nova especificação sem reengenharia; que produzem em conformidade a partir de matéria-prima de qualidade variável, proveniente de reciclagem, simbioses industriais ou de origem biológica, com a variabilidade adicional da sazonalidade e do lote agrícola ou florestal; e que se reconfiguram na cadeia face a indisponibilidade de componentes ou variação da procura, em tempo útil e não em ciclos trimestrais. Sabendo o que consegue fazer, o sistema avalia a sua própria aptidão antes de se comprometer: aceita ou recusa uma tarefa com fundamento, estima o que falta para produzir um produto que nunca produziu, e identifica quando a capacidade em falta existe noutro equipamento ou parceiro. A adaptação torna-se propriedade do sistema, e não um projeto de cada vez, o que depende de métodos que substituem volume de dados por estrutura, dados sintéticos e conhecimento de domínio, para o desafio das séries curtas e de elevada variedade.

Plataforma multi-agente para a produção. Uma plataforma em que máquinas, células, linhas e funções de planeamento, qualidade e logística são representadas por agentes que negociam, cooperam e se coordenam para decidir e se adaptar sem orquestração central rígida, planeando contra representações preditivas do sistema produtivo - a concretização, numa capacidade única e reutilizável, das arquiteturas de decisão distribuída (P2) e das configurações humano-agente (P3). Concebida para as condições da indústria portuguesa: agentes que decidem sob escassez

estruturada de dados e com dados heterogéneos e de qualidade variável, sem exigir um modelo centralizado e completo do sistema; e que absorvem o elevado mix de produção e a variabilidade de séries curtas negociando capacidade entre si, em vez de recalcularem um plano global a cada mudança de produto ou de procura.

Células e linhas que se reconfiguram com pessoas. Integração robótica que devolve flexibilidade à célula e à linha, com afetação dinâmica de tarefas entre pessoas e robôs e colaboração cuja segurança e responsabilidade são demonstráveis antes de operar; resposta às operações repetitivas, penosas ou de difícil execução humana e à escassez de mão de obra que as afeta.

Sistemas de apoio à decisão acessíveis a quem opera. Sistemas de planeamento e escalonamento, cujas regras são claras e cujas restrições podem ser alteradas por quem conhece o processo, sem intermediação de especialistas em otimização.

Partilha de dados na cadeia sem perda de soberania. Arquiteturas em que uma PME pode partilhar informação com um cliente de grande dimensão com garantias verificáveis, e não apenas contratadas, sobre o que dela pode ser inferido.

Trabalho ampliado e conhecimento retido. Configurações em que a delegação de tarefas e de decisão a sistemas automáticos amplia a capacidade de ação das pessoas, em vez de as substituir, com responsabilidade atribuível, supervisão demonstrável antes de operar e mecanismos que retêm na organização o conhecimento dos operadores mais experientes.

Digitalização como base para novos modelos de negócio. Infraestrutura digital que deixa de servir apenas a eficiência interna do processo e passa a habilitar proximidade ao cliente final, serviços associados ao produto e subida na cadeia de valor.

Oferta nacional capaz de incorporar tecnologia de ponta. Empresas tecnológicas nacionais de sistemas avançados de produção que incorporam inteligência artificial industrial e integração robótica nos seus produtos e serviços, desenvolvidas em codesenvolvimento com utilizadores industriais e validadas em contexto real, com capacidade de as comercializar fora dos consórcios que as originaram e em mercado europeu.

Marcos verificáveis em 2030. A trajetória cumpre-se se, até 2030, for possível demonstrar:

Um referencial nacional de governo e contextualização de dados industriais, validado em pelo menos três setores com perfis produtivos distintos, adotado por empresas externas aos consórcios que o desenvolveram, e com oferta nacional, empresas de tecnologia e centros de interface, capaz de o implementar comercialmente.

Um espaço de dados industrial em operação, com governo partilhado, operador neutro constituído e mecanismos de verificação de utilização, ligando empresas de pelo menos duas cadeias de valor; e um consórcio utilizando aprendizagem federada, com ganho de desempenho demonstrado face aos modelos locais e garantias auditadas sobre a informação revelada.

Adaptação demonstrada em contexto industrial: introdução de novo produto ou especificação numa linha com ajuste automático de parâmetros de processo e critérios de controlo, medida em tempo e custo de transição; e produção em conformidade a partir de material reciclado ou de base biológica com variabilidade caracterizada, sem agravamento da taxa de refugo.

Pelo menos uma configuração humano-máquina com supervisão verificável, implantada em contexto industrial, com repartição de decisão documentada, responsabilidade atribuível e instrumentação de capacidade retida ao nível da organização.

Sistemas produto-serviço em que empresas industriais nacionais obtêm receita recorrente proveniente de serviços associados ao produto, sustentada em dados de utilização e com desempenho contratualizado.

Infraestruturas permanentes de demonstração e ensaio industrial, herdeiras dos pilotos das Agendas Mobilizadoras, com acesso aberto a terceiros e modelo de sustentação estabelecido. Massa crítica de recursos humanos qualificados, ultrapassando o limiar estabelecido, incluindo doutorados em contexto industrial.

Oferta nacional com tecnologia de ponta incorporada: soluções de empresas tecnológicas nacionais de sistemas avançados de produção que incorporem inteligência artificial industrial ou integração robótica desenvolvidas neste domínio, colocadas no mercado, com venda a clientes externos aos consórcios de origem e pelo menos uma validação em mercado europeu.

Critério transversal de avaliação. A avaliação das três prioridades deve verificar ganhos ao nível da organização e da cadeia, e a sua manutenção para além do piloto. Para cada demonstrador devem definir-se valores de referência, perímetro e horizonte temporal, e metas de produtividade, como o valor acrescentado por hora total trabalhada, acompanhadas por indicadores de flexibilidade, qualidade, prazo, desperdício e condições de trabalho, sem que nenhum funcione como medida única: a comparação deve explicitar alterações na composição da produção, no perímetro e em fatores externos, e relacionar os ganhos locais com os resultados do conjunto, incluindo transferências de carga, espera ou retrabalho entre funções e entre empresas da cadeia. A exigência adapta-se ao tipo de projeto, distinguindo evidência científica, desempenho do demonstrador e impacto organizacional, que um projeto de investigação não demonstra necessariamente no seu prazo.

1.2. Contributo para domínio estratégico

Importância nacional. A indústria transformadora representa cerca de 21% do valor acrescentado bruto do setor não financeiro, 16,5% do pessoal ao serviço e aproximadamente 53% das exportações de bens e serviços, com cerca de 68 mil empresas das quais 98% são PME [1–4], e emprega perto de 730 mil pessoas [5]. É o principal contribuinte para a balança comercial e o setor cuja evolução determina a capacidade do país para sustentar rendimentos elevados e as importações de que necessita — uma questão de segurança económica, num contexto de fragmentação geopolítica e recomposição das cadeias de valor

européias. Está, no entanto, há duas décadas num patamar de valor acrescentado que não melhorou face à média europeia [6], com deterioração adicional da posição competitiva das empresas nacionais e europeias face à Ásia e aos Estados Unidos, visível na cadeia automóvel e extensiva ao fabrico de equipamento industrial, onde a capacidade asiática cresceu de forma acelerada na última década [18]. A digitalização é, nesse quadro, tanto condição de permanência como instrumento de diferenciação. A alternativa, não priorizar este domínio, traduz-se em dependência de tecnologias de produção externas, ficando a competitividade futura dos setores industriais dependente do acesso que os respetivos fornecedores concedam. É também uma questão de autonomia estratégica: não se trata de substituir integralmente essas tecnologias, mas de dominar o conhecimento sobre os elementos críticos para a competitividade industrial e de assegurar o posicionamento das empresas nacionais da fileira das tecnologias de produção nas cadeias industriais e de desenvolvimento internacionais.

Falha de coordenação. Existem duas falhas distintas, e ambas resistem à correção pelo mercado. A primeira liga valor, talento e adoção num equilíbrio de baixo nível: o baixo valor acrescentado limita salários e perspetivas; isso torna a indústria pouco atrativa para quadros qualificados; a ausência desses perfis impede a integração de tecnologia; a baixa integração mantém o valor acrescentado baixo. Nenhuma empresa isolada quebra o ciclo: investir em competências só compensa se houver tecnologia integrada para operar, e investir em tecnologia só compensa se houver quem a saiba integrar.

A segunda incide sobre a infraestrutura de partilha de dados de forma verticalizada, entre IT (tecnologias de informação) e OT (tecnologia operacional), e de forma horizontal entre organizações. Condições de uso verificáveis, referenciais semânticos partilhados e operadores neutros de espaços de dados são bens intermédios de que todos os participantes dependem e cujo benefício nenhum capta integralmente: quem investe suporta o custo e partilha o retorno. O resultado é subinvestimento sistemático, agravado pela assimetria de posição: o participante com maior poder negocial não tem incentivo para financiar garantias que limitam o que pode fazer com os dados dos seus fornecedores.

Capacidade instalada e cooperação. As Agendas Mobilizadoras do PRR construíram uma rede de cooperação sem precedentes em Portugal entre a indústria, fornecedores de tecnologia e o sistema científico, conforme referido acima. A capacidade científica, dirigida especificamente às classes de problemas aqui identificadas, é, porém, dispersa entre instituições e projetos. A capacidade de cooperar está desenvolvida, mas a de acumular conhecimento a partir dessa cooperação precisa ser alavancada.

Adicionalidade. Enquanto os domínios estratégicos relacionados com a oferta tecnológica produzem tecnologia digital, os domínios setoriais aplicam-na aos seus contextos, e o problema de a integrar em sistemas produtivos reais e de governar os dados que dela resultam não é objeto de nenhum deles. Acresce uma segunda ausência: nenhum desses domínios se ocupa de capacitar as empresas tecnológicas nacionais de sistemas avançados de produção para incorporarem tecnologia de ponta na oferta que colocam junto da indústria. Os domínios de oferta desenvolvem as tecnologias de base, os setoriais adotam, e a passagem de uma à outra por via de fornecedores nacionais é insuficientemente

alavancada. A digitalização da indústria foca-se na gestão eficiente de todo o processo produtivo, centrada no cliente e no valor acrescentado percebido, e não apenas na otimização local, nas arquiteturas de referência europeias, especificadas do ponto de vista de quem orquestra a cadeia (ver P1), este domínio aborda o que essas arquiteturas assumem como resolvido.

Seletividade. A digitalização da indústria define-se por classes de problemas, pelo que a exclusão é feita caso a caso, com critérios explícitos. O critério é duplo: retêm-se as classes em que nenhum participante isolado tem incentivo para resolver aquilo de que todos dependem, e em que a estrutura da indústria portuguesa (séries curtas, elevada variedade, posição de fornecedor, equipamento legado) coloca o problema de forma mais aguda do que nas economias que definem a agenda internacional. Selecionar problemas que a estrutura nacional apresenta de forma aguda não equivale, porém, a desenvolver tecnologia para o mercado nacional: esses problemas têm expressão global, e as soluções internacionais que hoje os abordam fazem-no de forma fragmentada, o que constitui uma oportunidade de mercado para a fileira nacional de tecnologias de produção. A aplicação deste critério deixa de fora temas correntes no discurso sobre digitalização industrial: computação quântica aplicada, desenvolvimento de hardware robótico, novos sensores, fabricação aditiva como tecnologia de processo, formação profissional, entre outros, enumerados em Seleção e decisões estratégicas, com indicação de onde devem ser tratados.

1.3. Definição e fronteiras

Esta iniciativa propõe-se a abordar os problemas científicos e de engenharia que emergem quando tecnologias digitais encontram sistemas produtivos reais variados, com equipamento legado, sob restrições de tempo real, com dados escassos e heterogêneos, com pessoas no ciclo de decisão e distribuídos por organizações que cooperam em cadeias de valor mantendo objetivos e poder negocial distintos.

Delimitação da área. Três eixos delimitam o domínio. O primeiro é a **integração**: conceber, integrar e operar sistemas produtivos em que as decisões (humanas e automáticas) assentam em dados, desde a instrumentação do processo até às camadas de planeamento operacional, tático e estratégico. O segundo é o **governo dos dados**: assegurar que os dados gerados na operação são contextualizados, fiáveis e partilháveis entre organizações sem perda de controlo sobre o que deles pode ser inferido. O terceiro é a **adoção de inteligência artificial e de robótica**: formular, a partir de condições industriais caracterizadas, os requisitos que a alavancam, especificações, arquiteturas de referência, protocolos de validação, e demonstrá-la em sistemas produtivos reais. Os três eixos são inseparáveis na prática: não há decisões fiáveis sobre dados mal governados, nem valor em dados que nenhum sistema utiliza, nem adoção real de inteligência artificial e de robótica sem sistemas integrados e dados governados sobre os quais operar.

Relação com as áreas de oferta de tecnologia. a digitalização da indústria articula-se com as áreas de oferta por duas vias. Impulsiona a definição de requisitos: a partir de condições industriais caracterizadas (séries curtas, elevada variedade, equipamento legado, dados escassos e heterogêneos, pessoas no ciclo de decisão) formula os requisitos, as arquiteturas de referência, os conjuntos de dados e os protocolos de

ensaio que orientam o desenvolvimento de IA e de robótica aplicáveis à indústria, e que a investigação de base tipicamente não observa. E alavanca a adoção: valida essas tecnologias em sistemas produtivos reais, constituindo procura qualificada que as empresas tecnológicas nacionais podem servir. O desenvolvimento das tecnologias de base, novos modelos e algoritmos de treino, componentes e *hardware* de robótica, redes de comunicação, permanece nos domínios de oferta.

Papel da IA. A IA atravessa as três prioridades, mas como meio e não como fim. Esta área não investiga novos modelos ou algoritmos de treino de propósito geral, que pertencem aos domínios de oferta de tecnologia; investiga a IA industrial, a que tem de funcionar nas condições que a indústria real impõe e que a investigação de base tipicamente não enfrenta.

Concretamente, é a IA que aprende sob escassez estruturada de dados, substituindo volume de observações por estrutura, dados sintéticos e conhecimento de domínio (IA informada pela física); que opera sobre dados governados, contextualizados e auditáveis, sem os quais nenhum sistema de apoio à decisão é fiável ou explicável; que quantifica a própria incerteza em sistemas que evoluem e se degradam; que constrói representações preditivas do comportamento do sistema produtivo, para simular e avaliar decisões antes de as executar em produção real (modelos do mundo), particularmente valiosa quando a experimentação tem custo elevado, séries curtas, equipamento legado, matéria-prima variável; que decide em tempo útil, com critérios em conflito e regras que quem opera pode inspecionar e alterar; e que coopera entre organizações sem transferência de dados (aprendizagem federada). É esta classe de problemas, e não a IA em geral, que constitui o contributo científico distintivo do domínio, e é nela que a estrutura da indústria portuguesa cria um alinhamento raro entre necessidade nacional e fronteira do conhecimento. A delimitação separa a IA que este domínio desenvolve e integra em contexto produtivo da IA de propósito geral que consome dos domínios de oferta; a IA industrial é componente científica transversal central, não a totalidade do domínio, que compreende também engenharia de sistemas, otimização, interoperabilidade, governação de dados e organização do trabalho.

Papel da robótica . A robótica industrial é objeto de análise no *position paper* “Tecnologias Críticas para a Soberania Digital” submetida como contributo nas Iniciativas *bottom-up*, para o qual se remete o desenvolvimento de *hardware*, de componentes e de capacidade de propósito geral. Esta área afirma a sua importância para a produtividade, para a ergonomia e para a resposta à escassez de pessoas em tarefas repetitivas, penosas ou de difícil execução humana, e retém o que decorre da integração: interoperabilidade entre robôs e sistemas de automação de fabricantes distintos, reconfiguração de células e linhas para novas referências sem reprogramação especializada, programação por demonstração e transferência rápida de tarefas em séries curtas, perceção e manipulação em ambientes pouco estruturados (IA corporizada / *embodied AI*), e colaboração humano-robô com segurança e responsabilidade demonstráveis. A fronteira entre os dois documentos é a mesma que separa a IA de propósito geral da IA industrial, e a sua articulação é de complementaridade e não de sobreposição.

O que fica de fora. Apesar de promover o desenvolvimento, a integração e a adoção de tecnologias emergentes na indústria, esta iniciativa não pretende investigação fundamental em novos modelos ou algoritmos de treino de IA, novos materiais, novos sensores, novo hardware de robótica ou novas redes de comunicação, pertencem aos domínios de oferta, para os quais este domínio formula requisitos e roteiros. A incorporação dessas tecnologias em produtos, equipamentos e soluções de empresas tecnológicas nacionais pertence, pelo contrário, a este domínio, nos termos da regra de fronteira abaixo. Quanto à descarbonização, fica fora a digitalização cujo objetivo primário é reduzir emissões; retém-se a base de dados de operação sobre a qual as suas metas assentam, porque as mesmas capacidades de contextualização e governo de dados produzem a rastreabilidade de consumos e a pegada por produto, o domínio articula-se com a descarbonização em vez de a excluir, com o objeto científico principal de cada projeto a determinar o enquadramento. Ficam ainda fora a cibersegurança, retendo-se apenas a capacidade de demonstrar conformidade a partir dos dados de operação; a formação profissional e a literacia digital; e a avaliação retrospectiva do impacto da automação no emprego.

Regra de fronteira. Perante um caso ambíguo, o critério não é quem produz a tecnologia, mas qual é o objeto da investigação. Se o objeto for fazer avançar uma tecnologia de propósito geral — um novo método de aprendizagem, um novo componente robótico, uma nova rede de comunicação, pertence ao domínio de oferta correspondente. Se o objeto for incorporar tecnologia de ponta em sistemas produtivos reais, ou nos equipamentos, máquinas e soluções que os constituem, sob as condições de integração, operação e governação de dados próprias da indústria, pertence a este domínio, independentemente de o resultado ser uma capacidade instalada numa fábrica ou um produto novo de uma empresa tecnológica nacional.

Âmbito setorial e da cadeia de valor. O domínio incide sobre a indústria transformadora (secção C da Classificação das Atividades Económicas) e sobre a sua inserção em cadeias de valor globais, com particular incidência nas europeias. O objeto não é apenas o sistema produtivo de cada empresa, mas o conjunto formado por esse sistema e pelas relações de produção e informação que o ligam a montante e a jusante: fornecedores de matéria-prima e de componentes, fornecedores de tecnologia e de soluções necessárias à sua implementação, clientes industriais que impõem requisitos de dados, e o produto em uso junto do cliente final. A inclusão de fornecedores de tecnologia e de soluções liga, por esta via, a cadeia de valor à cadeia (ou ciclo) de inovação de onde essas tecnologias e soluções provêm: a capacidade de participar numa depende, em boa parte, da capacidade de participar na outra. É nessas relações que se colocam os problemas de interoperabilidade, de rastreabilidade e de partilha de dados sob assimetria de poder negocial. Os restantes elos da cadeia entram, por isso, como contrapartes e não como objeto próprio, com exceção dos fornecedores de tecnologia e de soluções, cuja dupla qualidade no domínio se detalha a seguir: o que aqui se investiga é a capacidade da empresa industrial para conceber produtos, coordenar essas relações sem perda de soberania e ocupar nelas posições de maior domínio e valor acrescentado, e não as atividades desses elos.

As empresas tecnológicas de sistemas avançados de produção entram no domínio em dupla qualidade: como empresas industriais que digitalizam a sua própria produção, e como fornecedoras que incorporam

inteligência artificial e robótica na oferta destinada às restantes. Os construtores de máquinas e equipamento e os fabricantes de equipamento elétrico e eletrónico integram já a secção C; os integradores de sistemas, as empresas de automação e as de software industrial situam-se em secções distintas da Classificação e incluem-se no domínio nesta segunda qualidade.

Ficam fora do domínio a indústria extrativa, a logística de transporte e a distribuição, que são objeto de domínios próprios. Retém-se a coordenação digital da cadeia industrial e as interfaces de informação com a logística externa, e não a investigação autónoma sobre transporte.

2. Prioridades e desafios a dez anos

A transformação visada na digitalização da indústria assenta num encadeamento de três funções: **observar** o que acontece na produção e na cadeia de valor; **decidir** com base na observação e **adaptar** o sistema produtivo quando produtos, materiais ou condições mudam, o que potencia melhorias na captura de valor e na posição na cadeia de valor. Asna confluência das três funções estão as pessoas, quem interpreta o que se observa, decide ou supervisiona quem decide e executa a adaptação. A dimensão humana não é um elo do encadeamento, mas o meio em que as prioridades se concretizam.

	Prioridade	Eixo	Onde incide
P1	Dados industriais: contextualização, governo e posição na cadeia de valor.	i), ii) e iii)	Observar.
P2	Sistemas produtivos e cadeias de fornecimento adaptativos e decisões robustas	i) e iii)	Decidir. Adaptar.
P3	Trabalho, conhecimento e colaboração humano-máquina	i), ii) e iii)	Transversal.

P1. Dados industriais: da aquisição à soberania

Questão central. Como tornar os dados de operação industrial contextualizados, fiáveis e partilháveis entre organizações, de modo a serem interpretáveis por sistemas de apoio à decisão, em particular baseados em IA, e rastreáveis e transacionáveis ao longo da cadeia, sem perda de soberania e com potencial de acrescentar mais valor?

Curto prazo.

Contextualização semântica e governo de dados IT/OT. Métodos e arquiteturas que tornem os dados de tecnologia operacional (OT) interpretáveis nas aplicações de negócio (IT), com contexto preservado e versionado no tempo, incluindo a integração de equipamentos legados por meio de instrumentação não intrusiva e modelação semântica, a um custo compatível com empresas de menor dimensão.

Espaços de dados industriais. Arquiteturas de participação em espaços de dados que preservem a autonomia da empresa participante: condições de uso verificáveis e não apenas contratadas, e independência face às plataformas dominantes. Inclui os modelos de governação coletiva, associações e centros setoriais como operadores neutros, que tornam a participação viável para quem não a sustenta isoladamente.

Aprendizagem federada entre organizações. Cooperação na aprendizagem de modelos de IA sem transferência de dados, com garantias auditáveis sobre a informação efetivamente revelada e regras de repartição do benefício entre participantes com contribuições desiguais.

Médio e longo prazo.

Valorização dos dados de produto em uso. Infraestrutura de dados que permita conhecer as condições reais de utilização do produto e sustentar desempenho contratualizado, condição técnica da passagem de venda de produto à venda de resultados, e do reposicionamento na cadeia.

Construção de uma economia de dados industriais. Os dados constituem um recurso vital para a economia e um motor de inovação, com potencial para acrescentar valor, promover o crescimento económico e contribuir para a resposta aos principais desafios da sociedade. São também a base para o desenvolvimento de aplicações de inteligência artificial, que potenciem a inovação cruzada e a transferência de conhecimento, e que dependem do processamento de grandes volumes de dados de elevada qualidade, recolhidos de diferentes empresas e indústrias. Neste contexto, a definição de uma estratégia nacional para os dados industriais contribui para um mercado único de dados que reforce simultaneamente a competitividade global da Europa e a sua soberania sobre os dados.

Posição na cadeia de valor e razão para ação pública. Situa-se entre a investigação de arquiteturas e a implantação setorial. A infraestrutura de confiança de que todos dependem é um bem intermédio partilhado: quem a financia capta apenas uma fração do benefício, pelo que nenhum participante isolado a constrói. Acresce que as arquiteturas europeias de referência estão especificadas do ponto de vista de quem orchestra a cadeia, e a indústria portuguesa está maioritariamente do lado do fornecedor. A formulação de requisitos a partir dessa posição é também o que permite que as ferramentas de contextualização e de participação em espaços de dados sejam desenvolvidas por fornecedores nacionais, e não apenas adquiridas.

P2. Sistemas produtivos e cadeias de fornecimento adaptativos e flexíveis

Questão central: Como manter qualidade, produtividade e disponibilidade, ganhar flexibilidade e decidir em tempo útil, quando o produto muda com frequência, o material tem variabilidade não caracterizada, as condições de operação são instáveis e os dados disponíveis são escassos?

Curto prazo

Controlo adaptativo sob variabilidade de produtos e de materiais. Estratégias de controlo e de otimização de processos (por exemplo baseadas em tecnologias híbridas de IA) que mantenham conformidade com

a especificação perante elevado *mix*, séries curtas e matéria-prima de qualidade variável, incluindo materiais reciclados e de base biológica, cuja variabilidade tem origem em lote, sazonalidade e proveniência.

Controlo de qualidade de produto, processo e ativos em geral. Utilização de gémeos digitais que contextualizem os dados e a informação recolhidos do produto e do processo (por exemplo, através de novos sensores em processos não destrutivos), para antecipar anomalias e definir intervenções, com quantificação explícita da incerteza em sistemas que evoluem (por exemplo, utilizando técnicas de manutenção preditiva baseada em IA) de forma a atingir produção com zero defeitos e desperdício reduzido.

Planeamento e escalonamento com decisão auditável. Métodos de decisão sob incerteza, com critérios em conflito, cujas regras sejam explicáveis e cujas restrições possam ser alteradas por quem conhece o processo, sem intermediação de especialistas em otimização. O planeamento deve coordenar funções e recursos segundo o desempenho global, avaliando o efeito das decisões sobre estrangulamentos, esperas e retrabalho, em vez de maximizar isoladamente a ocupação de cada recurso.

Integração robótica para flexibilidade da célula e da linha. Reconfiguração de células e linhas para novas referências sem reprogramação especializada, e afetação dinâmica de tarefas entre pessoas e robôs em operações repetitivas, penosas ou de difícil execução humana. O objeto é a integração, não o desenvolvimento de hardware.

Médio e longo prazo

Sistemas de produção circulares. Controlar e gerir cadeias de processos produtivos que permitam suportar diferentes estratégias de circularidade (reutilizar, reparar, recondicionar, remanufaturar e reciclar) de forma escalável e financeiramente sustentável, alicerçadas nos passaportes digitais de produto e nos respetivos gémeos digitais de produto.

Aprendizagem sob escassez de dados. Aplicação da IA informada pela física, descrita em Definição e fronteiras, como condição técnica sem a qual as linhas anteriores não se aplicam a séries curtas e de elevada variedade, que é o regime dominante na indústria portuguesa.

Gémeos digitais de produto e de processo para simulação e decisão. Gémeos digitais construídos e mantidos com IA informada pela física, capaz de os calibrar sob a mesma escassez estruturada de dados referida acima, e modelos do mundo que operam sobre esses gémeos para simular ambientes industriais complexos e avaliar cenários e *trade-offs* antes de qualquer decisão ser executada em produção real. Alimenta, a jusante, as arquiteturas de decisão distribuída seguintes.

Arquiteturas de decisão distribuída autoajustáveis. Orquestração entre agentes de decisão que evite ótimos locais, habilitando o autodiagnóstico e autoajuste do sistema produtivo e, no limite, reconfiguração dentro da cadeia face a ruturas de fornecimento ou variação da procura.

Posição na cadeia de valor e razão para ação pública: Incide sobre o processo produtivo e é o núcleo técnico do domínio. As séries curtas, o elevado *mix* e a variabilidade de matéria-prima que definem o problema são características do tecido industrial de menor dimensão, cuja procura individual não sustenta o desenvolvimento das soluções. Os fornecedores de tecnologia de escala global desenvolvem para os regimes de produção que remuneram o investimento, que são os de grande série. É precisamente aí que se abre espaço para a oferta nacional: os requisitos das séries curtas e da elevada variedade constituem um segmento que esses fornecedores não servem e que empresas tecnológicas nacionais, capacitadas para incorporar tecnologia de ponta, podem ocupar.

P3. Trabalho, conhecimento e colaboração humano-máquina

Questão central: Como conceber configurações de trabalho e de tecnologia em que a delegação de tarefas e de decisões a sistemas automáticos amplia a capacidade de ação da organização e das pessoas, em vez de a substituir por dependência, e como verificar essa propriedade antes de operar?

Curto prazo

Apoio cognitivo ao operador. Interfaces, visualização e assistência contextual em linguagem natural, apoiada em modelos de linguagem (LLM) e IA generativa, e ancorada nos dados e no conhecimento de domínio da operação para conter o risco de resposta não fundamentada, que sustentem a qualidade da operação em ambientes de complexidade crescente, adaptadas ao operador e não exigindo formação prolongada.

Incorporação do conhecimento tácito. Métodos que incorporem (por exemplo em sistemas de apoio à decisão) o conhecimento dos operadores mais experientes e o devolvam na forma de competências ampliadas. A médio prazo, evoluir para uma coaprendizagem entre operadores e agentes de IA, moldando o comportamento dos agentes de IA para a colaboração, e apoiando caminhos de mentoria e desenvolvimento de competências humanas.

Médio e longo prazo

Colaboração humano-robô e repartição de tarefas. Estudar, simular, otimizar e facilitar a interoperabilidade entre diferentes tipos de robôs e sistemas de automação, em estrita relação com os operadores, em tarefas repetitivas ou de baixo valor acrescentado, tais como movimentações de intralogística, alimentação de matéria-prima e componentes às máquinas ou controlo de qualidade discreto. A repartição de tarefas entre pessoas e robôs responde simultaneamente à ergonomia, à escassez de mão de obra nestas operações e à flexibilidade exigida por séries curtas. O desenvolvimento de hardware permanece fora do domínio.

Configurações de trabalho com sistemas de IA agênticos. Métodos de projeto para operação conjunta entre pessoas e sistemas que executam tarefas com iniciativa própria: atribuição dinâmica de tarefas, mecanismos de interrupção e de reatribuição, e manutenção de modelo mútuo entre operador e sistema

sobre o que cada um está a fazer e porquê. A colaboração deixa de ser mediada por interface e passa a ser coordenação entre agentes com autonomia desigual.

Posição na cadeia de valor e razão para ação pública: Incide sobre a interface entre o sistema produtivo e quem o opera. A justificação para financiamento público é tripla. De apropriabilidade: parte do retorno é social e difuso — qualidade do trabalho, redução de riscos físicos, retenção de conhecimento que de outro modo se perde com a saída dos operadores mais experientes — e não é integralmente captável pela empresa que investe. De procura induzida por regulação: as obrigações de supervisão humana e de responsabilidade atribuível para sistemas de IA de risco elevado tornam-se exigíveis entre 2027 e 2028 [17], e a capacidade de demonstrar conformidade, bem como a possibilidade de influenciar a especificação técnica, têm de estar construídas antes disso. E de recurso: o conhecimento tácito de operadores qualificados é o material de partida dos sistemas híbridos humano-IA, em que a aprendizagem é mútua, um recurso a explorar antes de se perder, com janela limitada, e não um atraso a corrigir.

2.1. Ponto de partida de Portugal

O sistema científico nacional dispõe de massa crítica reconhecida em engenharia de sistemas de produção, sistemas de informação e governo de dados, automação e robótica, otimização, sistemas ciber-físicos e IA aplicada, com trajetória consolidada de participação em programas europeus e de cooperação com a indústria. As Agendas Mobilizadoras do PRR constituíram, entre 2022 e 2026, o maior esforço concertado de investigação e desenvolvimento industrial realizado no país [9–11].

Distinguem-se cinco lacunas que definem a aposta neste domínio. *De fragmentação:* a massa crítica existe, mas dispersa por instituições e projetos, sem concentração em nenhuma das classes de problema identificadas; a cobertura ampla reflete, em parte, dispersão e não profundidade acumulada. *De perfis:* a escassez de quadros com competências simultâneas em processos produtivos e em gestão e governo de dados limita a investigação e a absorção eficaz de sistemas de apoio à decisão. *De procura:* existem utilizadores industriais avançados, mas a sua escala é insuficiente e a sua capacidade de investimento em investigação e inovação nestes domínios é limitada, o que exige iniciativas de larga escala capazes de traduzir requisitos e realidades individuais em objetivos comuns de investigação. *De infraestrutura permanente:* os pilotos existem enquanto durar o financiamento que os criou, sem mecanismo para os converter em ativo duradouro. *E de oferta:* a base nacional de empresas tecnológicas de sistemas avançados de produção existe e está organizada [19], mas a incorporação sistemática de tecnologia de ponta depende de cooperação científica continuada que nenhum projeto isolado sustenta.

A cada lacuna corresponde uma resposta neste documento: a concentração em classes de problema definidas responde à dispersão; a formação avançada em contexto industrial, à escassez de perfis; a conversão dos pilotos das Agendas em infraestrutura permanente de acesso aberto, à ausência de ativo duradouro; e o instrumento dedicado de capacitação, à lacuna de oferta. À limitação da procura responde o desenho dos instrumentos que sucedem as Agendas Mobilizadoras, tratado a seguir.

Essa conversão depende, por sua vez, do desenho dos instrumentos de financiamento que sucedem as Agendas Mobilizadoras: só instrumentos que continuem a permitir consórcios de massa crítica e a lógica de ecossistema e cadeia de valor com que esta rede foi construída sustentam a sua conversão em capacidade permanente; a sua substituição por instrumentos fragmentados e de menor escala esvazia essa rede e compromete a soberania tecnológica que dela depende.

2.2. Posições portuguesas a avaliar

Identificam-se cinco posições em que empresas, centros de interface e entidades do sistema científico e tecnológico nacional podem ocupar espaço próprio. Todas partilham a mesma lógica: correspondem a problemas que o contexto industrial português apresenta de forma aguda e que as soluções concebidas para grandes empresas e cadeias integradas não endereçam.

Governo e contextualização de dados em empresas sem competências digitais internas, incluindo equipamento legado de difícil integração. (P1) Os espaços de dados industriais europeus (Gaia-X, Manufacturing-X, Catena-X) pressupõem, como referido, parceiros com maturidade digital que a maioria do tecido industrial europeu não tem. Tornar esse governo viável numa PME com equipamento com décadas de utilização, cuja substituição não é pressuposto realista, é um problema não resolvido, com dimensão de mercado europeia, e que Portugal tem em casa. Instrumentação não intrusiva, retrofit e modelação semântica constituem um segmento por explorar.

Cooperação digital entre PME de um mesmo cluster. (P1) A organização da indústria portuguesa em clusters setoriais geograficamente concentrados, com centros tecnológicos de interface consolidados, oferece condições de constituição de espaços de dados setoriais e de consórcios de aprendizagem federada que tecidos mais dispersos não reúnem.

Produção com elevado mix, séries curtas e materiais de qualidade variável. (P2) A indústria portuguesa (moldes, têxtil e vestuário, calçado, metalomecânica, cerâmica, agroalimentar, fileira florestal) opera em regimes de variedade elevada e séries curtas, e incorpora crescentemente material reciclado e de base biológica. Os métodos dominantes de IA industrial pressupõem regimes de dados e estabilidade de matéria-prima que estas estruturas não têm. Há aqui um alinhamento raro entre necessidade nacional e fronteira do conhecimento.

Tecnologias centradas no operador em setores intensivos em mão de obra. (P3) A estrutura produtiva nacional mantém componente significativa de trabalho manual qualificado, cujo conhecimento é tácito e está concentrado em operadores em vias de saída do mercado de trabalho. Isso torna o país ambiente de validação para apoio cognitivo, colaboração humano-máquina e incorporação de conhecimento tácito que economias de elevada automação não oferecem.

Oferta nacional de sistemas avançados de produção para regimes de séries curtas e elevada variedade. (P2, P3). Os construtores de máquinas, os integradores de sistemas e as empresas de software industrial nacionais conhecem de perto regimes produtivos que os fornecedores de escala global não

servem, e operam junto de clientes com esse perfil. A incorporação de inteligência artificial industrial e de integração robótica nessa oferta constitui uma posição de mercado europeia e global, e não apenas nacional, porque o problema das séries curtas e da elevada variedade é comum ao tecido industrial europeu de menor dimensão.

2.3. Rota até à escala

Para cada prioridade, identifica-se o utilizador ou comprador final, o horizonte de adoção e o que falta para escalar para além do primeiro caso.

Prioridade	Comprador ou utilizador final	Horizonte	O que falta para escalar
P1 Dados industriais: contextualização, governo e posição na cadeia de valor	O cliente industrial que necessita de dados dos seus fornecedores e não os obtém; empresas de média dimensão com obrigações de rastreabilidade e custo de não conformidade já visível; associações e centros setoriais como operadores de espaços de dados; e, na valorização de dados de produto em uso, fabricantes em subcontratação com objetivo de progressão na cadeia	Curto prazo	Referencial partilhado; ferramentas que não exijam competência semântica especializada; constituição de um operador neutro de espaço de dados; regras de repartição de benefício na aprendizagem federada; aceitação de contratos de desempenho pelo cliente
P2 Sistemas produtivos e cadeias de fornecimento adaptativos e decisões robustas	Empresas com custos de não qualidade mensuráveis, custo de paragem elevado e sob pressão para incorporar material reciclado; empresas que adquiriram sistemas de planeamento e não os utilizam por impossibilidade de ajuste; empresas que procuram maior visibilidade e controlo da cadeia de fornecimento; e empresas tecnológicas de sistemas avançados de produção que precisam de incorporar inteligência artificial e integração robótica na sua oferta	Curto a médio prazo	Demonstração em contexto real de que o desempenho se mantém com poucos dados; sensores não destrutivos a custo compatível; modelos de decisão editáveis por quem conhece o processo; e fornecedores nacionais com produto validado e capacidade de suporte

Prioridade	Comprador ou utilizador final	Horizonte	O que falta para escalar
P3 Trabalho, conhecimento e colaboração humano-máquina	Fabricantes de máquinas e integradores que precisam de demonstrar conformidade para colocar produto no mercado europeu; empresas com dificuldade de recrutamento e de retenção de conhecimento e com risco ergonómico associado	Curto a longo prazo	Evidência de ganho de qualidade e redução de erro; interfaces que não exijam formação prolongada; referencial de evidência aceite por entidades certificadoras; acordo com representantes dos trabalhadores

2.4. Seleção e decisões estratégicas

A seleção demonstra-se pela diferenciação da postura entre prioridades e pela explicitação do que fica fora.

Prioridade	Postura	Fundamento
P1 Dados industriais	Liderar	As arquiteturas europeias de espaços de dados são especificadas do ponto de vista de quem orquestra a cadeia, e a indústria portuguesa está maioritariamente do lado do fornecedor. É espaço estreito, não ocupado, e com procura criada por obrigações regulatórias e contratuais.
P3 Trabalho, conhecimento e colaboração humano-máquina	Liderar	Setores intensivos em mão de obra qualificada, com conhecimento tácito concentrado em operadores em fim de carreira. Constitui uma base de conhecimento operacional a incorporar em sistemas híbridos humano-IA, com janela temporal limitada, e é o eixo com menor sobreposição com outros domínios
P2 Sistemas produtivos e cadeias de fornecimento adaptativos e decisões robustas	Construir capacidade própria	Séries curtas, elevado mix e materiais de qualidade variável correspondem ao perfil produtivo nacional, mas o problema é disputado internacionalmente e a liderança não é sustentável em toda a sua extensão. A posição defensável está na combinação entre esses regimes produtivos e a existência de uma base nacional de fornecedores de tecnologia de produção que os conhece. Nas arquiteturas de decisão distribuída, a posição é de construção; na infraestrutura de computação de alto desempenho, de acesso por cooperação

Prioridade	Postura	Fundamento
		européia, retendo-se apenas a camada nacional de intermediação

Esta proposta não compete com: Modelos e algoritmos de treino de IA de propósito geral. Hardware de robótica, dispositivos de deteção e microeletrónica, retendo-se a sua integração e incorporação em sistemas de produção. Tecnologias de rede e hardware de computação quântica, com posição de vigilância e não de investimento quanto à formulação de problemas industriais para processamento quântico, explorando a rede de supercomputação europeia. Plataformas industriais horizontais e computação em nuvem de escala global, assegurando acesso e soberania por via europeia. Hardware de computação periférica (edge), pela mesma razão que vale para a robótica: retendo-se a integração e a operação de inteligência artificial e de gémeos digitais junto da máquina, ao longo do contínuo entre a periferia (edge) e a nuvem, onde correm de facto as decisões em tempo real e o controlo dos dados que a soberania exige. Arquiteturas de base de espaços de dados e normas semânticas, com posição de participação na especificação e não de desenvolvimento próprio. Cibersegurança de tecnologia operacional, retendo-se apenas a integração e a demonstração de conformidade.

Prioridades consideradas e deixadas de fora. A investigação em novos materiais e em processos de reciclagem, que pertence aos domínios de materiais e de economia circular, retém-se apenas a adaptação do processo produtivo à variabilidade do material. O desenvolvimento de dispositivos de sensorização, que pertence ao domínio de microeletrónica e sensores, retém-se a sua integração e a fusão de dados heterogéneos. A fabricação aditiva enquanto tecnologia de processo. A formação profissional e a literacia digital, instrumento de política educativa. A avaliação retrospectiva do impacto da automação no emprego, que pertence ao território das ciências sociais.

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

Conhecimento científico. A digitalização da indústria propõe-se produzir contribuições em classes de problema hoje subinvestigadas por não pertencerem a nenhuma disciplina isolada: contextualização semântica e temporalmente versionada de dados industriais; aprendizagem sob escassez estruturada de observações e variabilidade de matéria-prima; cooperação de aprendizagem entre organizações sem transferência de dados; repartição de decisão entre operador e sistema; quantificação de incerteza em gémeos digitais de sistemas em evolução; e integração e reconfiguração de sistemas robóticos em regimes de elevada variedade, com repartição de tarefas entre pessoas e robôs. A formulação de requisitos e de protocolos de validação a partir de condições industriais caracterizadas é, ela própria, resultado científico e não atividade de serviço: são as arquiteturas de referência, os conjuntos de dados e os referenciais de ensaio que a tornam verificável e reutilizável.

Inovação e sustentabilidade. Os contributos incidem sobre a redução do consumo de matéria-prima e de energia por unidade de valor produzido; a viabilização da incorporação de materiais recuperados e de base biológica através de controlo adaptativo de processo; a redução do desperdício por via de produção com zero defeitos.

Desenvolvimento territorial. A indústria transformadora portuguesa apresenta distribuição territorial substancialmente mais equilibrada do que os serviços de elevado valor acrescentado, e organiza-se em clusters geograficamente concentrados. O reforço da sua capacidade tecnológica constitui, por essa razão, um instrumento de coesão territorial com eficácia superior à da generalidade das políticas de inovação, e a capacidade construída fixa-se onde os clusters estão.

Sociedade e economia. O contributo central é a progressão da indústria nacional para patamares superiores de valor acrescentado, com efeito sobre salários, atratividade do setor para quadros qualificados e capacidade de retenção de talento. A automação de tarefas de baixo valor acrescentado é indissociável de uma trajetória de requalificação, sem a qual o ganho de produtividade se converte em perda de emprego e não em progressão de qualificações.

Fontes dos dados

Todos os valores quantitativos apresentados no documento remetem para as fontes abaixo. A coluna de estado indica o grau de verificação à data desta versão.

#	Indicador utilizado no documento	Fonte	Edição / ano	Estado
1	Peso da indústria transformadora no VAB do setor não financeiro (~21%)	INE — Empresas em Portugal	2022	A confirmar na edição mais recente
2	Peso da indústria transformadora no pessoal ao serviço do setor não financeiro (~16,5%)	INE — Empresas em Portugal	2022	A confirmar na edição mais recente
3	Peso da indústria transformadora nas exportações de bens e serviços (~53%)	DGAE — Indústrias Transformadoras (Secção C da CAE Rev. 3); INE — Comércio Internacional	2020	A atualizar
4	Número de empresas da indústria transformadora (~68 mil) e proporção de PME (98%)	DGAE / INE — Sistema de Contas Integradas das Empresas	2020	A atualizar

#	Indicador utilizado no documento	Fonte	Edição / ano	Estado
5	Emprego na indústria transformadora (~730 mil pessoas)	Eurostat — Inquérito ao Emprego / Contas Nacionais, secção C da NACE Rev. 2	2025	A confirmar
6	Produtividade horária face à média da UE e ausência de convergência em duas décadas	Eurostat — Produtividade real do trabalho por hora trabalhada, índice UE-27 = 100; PORDATA	Série 2000–2025	A confirmar
7	Intensidade digital das PME (64% vs 71%), adoção de computação em nuvem (34% vs 47%) e de inteligência artificial (11,5% vs ~20%)	Comissão Europeia — <i>Relatório do Estado da Década Digital</i> , capítulo nacional Portugal; Eurostat — Inquérito à Utilização de TIC nas Empresas	2025	A confirmar a edição exata
8	Dotação pública dedicada à transição digital das empresas (PRR, Componente 16 — Empresas 4.0)	Recuperar Portugal / IAPMEI — PRR, Componente C16	2021–2026	A confirmar valor executado
9	Número de Agendas Mobilizadoras e Agendas Verdes contratualizadas (50 de 53 selecionadas) e entidades envolvidas (1.247, das quais 941 empresas)	Governo de Portugal — comunicado de 6 de julho de 2023; IAPMEI — <i>Agendas para o Futuro</i>	2023–2024	Confirmado
10	Agendas com impacto na indústria transformadora (30 de 53), investimento (~3 mil M€) e incentivo público (~1,1 mil M€), correspondentes a ~39% do programa	Compilação própria a partir da lista oficial IAPMEI de propostas finais (abr. 2023), da brochura <i>Agendas para o Futuro</i> (mar. 2024) e das fichas de projeto publicadas pelos copromotores	2023–2025	Compilação própria
11	Investimento total e incentivo público do conjunto do programa (~7,7 mil M€ / ~2,9 mil M€)	IAPMEI — <i>Agendas para o Futuro</i> ; Portal Mais Transparência	2024	Confirmado
12	PRODUTECH R3: investimento (167,3 M€), parceiros (106, dos quais 45 fornecedores de	Ficha de projeto PRODUTECH R3 publicada pelos copromotores; comunicação pública da agenda	2023–2024	Confirmado

#	Indicador utilizado no documento	Fonte	Edição / ano	Estado
	tecnologia e 37 utilizadores industriais) e projetos-piloto (52)			
13	Persistência das redes de cooperação após o termo do programa que as criou	<i>Research Policy</i> 49(3) — "A shot in the dark? Policy influence on cluster networks"	2020	Confirmado (fonte primária)
14	Obrigação contratual de fornecedores calcularem e reportarem PCF (Product Carbon Footprint) segundo o rulebook Catena-X, com cobertura mínima de 98% do peso da BOM	Bosch — FAQ de PCF para fornecedores	2025	
15	Rulebook PCF v4 (set. 2025); quota de dados primários como métrica obrigatória	Catena-X — CX-PCF-Rulebook v4		
16	Passaporte digital de bateria obrigatório a partir de fevereiro de 2027	Regulamento (UE) 2023/1542		Confirmado
17	Calendário de aplicação das obrigações de supervisão humana e responsabilidade atribuível para sistemas de IA de risco elevado	Regulamento (UE) 2024/1689 (Regulamento de Inteligência Artificial)	2024, com aplicação diferida	A verificar em EUR-Lex — o calendário esteve sob revisão