



TRANSIÇÃO DIGITAL, COORDENAÇÃO E PRODUTIVIDADE: POR QUE OS RETORNOS SÃO CONDICIONAIS ENTRE FIRMAS?

Thiago Cavalcante de Souza (FACE/UFG)¹

Resumo: Este artigo propõe uma reinterpretação teórica da transformação digital baseada em um objeto econômico ainda subformalizado: o crescimento endógeno da interdependência decisória induzida pela intensificação digital. A tese central é que, à medida que o ambiente digital sistêmico se expande, aumenta-se mais do que proporcionalmente a densidade de interfaces e dependências entre decisões produtivas e organizacionais. Operar sob alta interdependência exige coordenação consistente, mas a coordenação não escala automaticamente: enfrenta custos congestivos convexos associados à integração de processos, governança de dados, consistência decisória e reconciliação de sistemas. Para formalizar esse mecanismo, o modelo distingue capacidade produtiva/industrial $c_i(t)$ e capacidade de coordenação organizacional $h_i(t)$, ambas endógenas, e trata a intensidade digital sistêmica $D(t)$ como força que amplia interdependência, e não como multiplicador direto da função de produção. A dinâmica resultante gera retornos condicionais, não linearidades (incluindo trajetórias compatíveis com defasagens de implementação) e, via seleção replicadora, concentração endógena sem requerer diferenças exógenas persistentes de produtividade. O artigo deriva implicações para mensuração (integração/interoperabilidade versus adoção), identificação empírica por regimes/limiares e desenho de políticas industriais e de inovação orientadas a capacidades de coordenação, e não apenas à difusão tecnológica.

Palavras-chave: Transformação digital; interdependência decisória; coordenação.

Código JEL: D23; L25; O14.

Área Temática: 9. Teorias e Metodologias de Estudo em Inovação e Indústria

DIGITAL TRANSITION, COORDINATION AND PRODUCTIVITY: WHY ARE RETURNS CONDITIONAL BETWEEN FIRMS?

Abstract: This paper develops a theoretical reinterpretation of digital transformation centered on an under-formalized economic object: the endogenous growth of decision interdependence induced by rising systemic digital intensity. The core claim is that, as digital infrastructures, data integration and

¹ Faculdade de Administração, Contabilidade e Economia da Universidade Federal de Goiás.



algorithmic systems expand, the density of interfaces among production and organizational decisions increases—often more than proportionally—thereby reshaping the firm’s fundamental problem from “access to technology” to “operating consistently under interdependence.” Coordination, however, does not scale automatically. It faces convex congestion costs linked to process integration, data governance, consistency constraints and system reconciliation. The model separates productive/industrial capability $c_i(t)$ from organizational coordination capability $h_i(t)$, both evolving endogenously, and treats systemic digital intensity $D(t)$ as a driver of interdependence rather than a direct productivity shifter. This structure delivers conditional and nonlinear returns to digitalization, implementation lags consistent with observed J-curve patterns, and—through replicator selection—endogenous concentration without imposing persistent exogenous productivity gaps. The paper derives empirically implications for measurement (integration and interoperability versus adoption), identification strategies based on thresholds/regimes, and industrial/innovation policies that target coordination capabilities rather than diffusion alone.

Keywords: Digital transformation; decision interdependence; coordination.

1. Introdução

A transformação digital consolidou-se como elemento central da dinâmica do crescimento econômico contemporâneo, assim como do mudança estrutural e da competição entre firmas operada em diferentes mercados. As tecnologias digitais, caracterizadas por elevada difusibilidade, custos marginais reduzidos, escala e grande capacidade de reorganizar fluxos de informação e coordenação, aproximam-se da noção clássica de tecnologias de propósito geral (GPTs), cujo impacto econômico depende criticamente da emergência de complementaridades produtivas, organizacionais e institucionais (Bresnahan e Trajtenberg, 1995; Shapiro e Varian, 1999; Brynjolfsson, Rock e Syverson, 2017, 2021). No entanto, diferentemente do que uma leitura “ingênua” da analogia com ondas tecnológicas anteriores poderia sugerir, a difusão de tecnologias digitais não tem produzido padrões robustos de convergência econômica, nem no nível microeconômico nem no nível macroestrutural. Pelo contrário, a evidência empírica acumulada aponta, de forma consistente, para um aumento de heterogeneidade e divergência.



No nível das firmas, diferentes trabalhos apontam que os investimentos em tecnologias digitais geram ganhos significativos de produtividade apenas quando combinados com mudanças organizacionais, capital intangível e novas práticas gerenciais, com efeitos que se materializam no médio e longo prazo (Brynjolfsson e Hitt, 2000; Brynjolfsson, Hitt e Yang, 2002; Brynjolfsson e Hitt, 2003). No nível setorial, por sua vez, observa-se uma ampliação persistente do hiato de produtividade entre empresas de fronteira e retardatárias, indicando que a difusão tecnológica é incompleta e que a adoção efetiva está condicionada à dotação de capacidades organizacionais e intangíveis (OECD, 2015; Andrews, Criscuolo e Gal, 2016). De modo similar, tecnologias digitais e de automação podem elevar produtividade média ao mesmo tempo em que reforçam processos de polarização setorial e regional e, em certos contextos, amplia a concentração industrial (Acemoglu e Restrepo, 2020; Autor et al., 2020).

Esses fatos estilizados tensionam representações convencionais da tecnologia na teoria econômica. Nos modelos neoclássicos e de crescimento endógeno — de Lucas (1988) e Romer (1990) aos modelos schumpeterianos de destruição criativa (Aghion e Howitt, 1992; Aghion et al., 2005) — o progresso tecnológico atua como deslocamento da fronteira produtiva e tende a ser tratado como fator relativamente homogêneo. Mesmo quando heterogeneidade, instituições ou políticas são incorporadas, diferenças persistentes de desempenho frequentemente aparecem como fricções externas ao processo de adoção, e não como consequência lógica de um mecanismo endógeno relacionado à própria natureza da implementação tecnológica. Essa representação é adequada para tecnologias cujo efeito principal opera diretamente sobre a função de produção. Contudo, ela se torna insuficiente no contexto da digitalização, em que o impacto econômico central decorre da reorganização da coordenação, do aprendizado e das rotinas, com retornos crescentes condicionais à existência de capacidades dinâmicas inerente às firmas (Brynjolfsson, Rock e Syverson, 2017, 2021; OECD, 2015).

Diversas vertentes teóricas já apontaram, de forma parcial, para esse limite. A literatura de GPT enfatiza a necessidade de complementos custosos e desigualmente distribuídos (Bresnahan e



Trajtenberg, 1995). A tradição neo-schumpeteriana destaca o caráter cumulativo, direcional e dependente de trajetória do progresso técnico (Dosi, 1982; Pavitt, 1984). A economia evolucionária mostra que desempenho econômico resulta de processos históricos de aprendizado e seleção, e não de respostas instantâneas a choques tecnológicos (Nelson e Winter, 1982). A literatura de complexidade econômica discute empiricamente que o desenvolvimento depende da densidade e da estrutura das capacidades produtivas acumuladas (Hidalgo e Hausmann, 2009). Apesar desses avanços, permanece relativamente pouco explorada uma dimensão específica: como a implementação de tecnologias digitais interage endogenamente com a estrutura de capacidades produtivas e organizacionais para gerar trajetórias divergentes, mesmo quando o acesso às tecnologias digitais é amplo e relativamente homogêneo?

Este artigo parte de uma premissa distinta e explicitamente delimitada. Argumenta-se que, ao elevar o grau de interdependência decisória, a digitalização transforma o problema econômico fundamental enfrentado pelas firmas: operar sob alta interdependência exige coordenação consistente, mas coordenação não escala automaticamente com a interdependência. Quando a coordenação enfrenta custos congestionados crescentes com essa interdependência, a economia pode exibir retornos condicionais e não linearidades na relação entre digitalização e desempenho, além de seleção cumulativa e concentração endógena. Crucialmente, esse mecanismo pode produzir diferenças persistentes de desempenho como consequência da dinâmica de implementação e coordenação sob interdependência crescente, sem depender, no caso-base, de heterogeneidade exógena de produtividade entre as firmas.

O artigo é teórico, com implicações empiricamente testáveis. A unidade analítica é um conjunto de firmas organizadas como um *continuum*, permitindo derivar resultados agregados a partir de uma estrutura microeconômica deliberadamente parcimoniosa: a tecnologia produtiva é simples, enquanto o novo objeto analítico — interdependência decisória e coordenação — recebe tratamento explícito. Desenvolve-se um modelo dinâmico no qual desempenho e estrutura emergem da interação entre dois estados endógenos ao nível da firma: (i) capacidades produtivas $c_i(t)$, que representam conhecimentos,



rotinas e competências industriais acumuladas; e (ii) capacidades de coordenação organizacional $h_i(t)$, que representam a habilidade de governar decisões interdependentes, integrar processos e explorar sinais digitais por meio de tecnologias digitais. A economia apresenta ainda um estado agregado $D(t)$, a intensidade digital sistêmica. A interação entre esses elementos é não linear e sujeita a custos congestivos de coordenação, o que dá origem a regimes de seleção, concentração e divergência persistente, em um modelo dinâmico de crescimento via transformação digital, útil no contexto da transformação digital.

A contribuição do artigo é estritamente delimitada. Não se propõe uma teoria geral da transformação digital, nem se reivindica unificação de campos distintos. A contribuição consiste em demonstrar formalmente um mecanismo específico — baseado em interdependência decisória crescente e custos congestionados de coordenação — capaz de gerar seleção cumulativa, concentração endógena e divergência persistente sob acesso tecnológico semelhante, conectando evidências empíricas dispersas sob uma estrutura analítica parcimoniosa. A maior parte da literatura trata a digitalização como um choque tecnológico que afeta diretamente a produtividade ou a fronteira de produção. Mesmo quando complementaridades organizacionais são reconhecidas, a tecnologia permanece modelada como um fator produtivo ampliado. Este artigo propõe uma mudança ontológica: a digitalização é tratada como um processo de crescimento endógeno da interdependência decisória. A partir dessa reformulação, o modelo mostra que retornos condicionais, defasagens de implementação, heterogeneidade persistente e concentração endógena emergem como propriedades lógicas do regime digital, sem requerer heterogeneidade exógena de produtividade ou hipóteses ad hoc.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 revisa criticamente as abordagens relevantes e explicita como fatos estilizados impõem restrições ao modelo. A Seção 3 apresenta a estratégia de modelagem e a distinção entre adoção e implementação. A Seção 4 define o objeto ontológico — interdependência decisória — e sua implicação econômica e apresenta o modelo



formal, resultados e proposições. Finalmente, a seção 5 conclui, indicando limitações e extensões possíveis obtidas a partir desta pesquisa.

2. Transformação digital, crescimento e desenvolvimento industrial: uma tensão teórica

A teoria econômica dispõe de tradições consolidadas para analisar o papel da tecnologia no crescimento e no desenvolvimento. A formulação schumpeteriana moderna, cristalizada nos modelos de crescimento por destruição criativa, forneceu uma estrutura analítica poderosa para compreender como a inovação sustenta trajetórias de crescimento de longo prazo por meio da substituição contínua de tecnologias e produtos obsoletos por inovações superiores (Aghion; Howitt, 1992). Esse enquadramento foi posteriormente ampliado para incorporar concorrência, instituições, heterogeneidade setorial e políticas públicas, mantendo, contudo, a hipótese central de que a tecnologia afeta a economia primordialmente por meio do deslocamento da fronteira produtiva e da dinâmica inovativa das firmas e setores (Aghion et al., 2005; Acemoglu, 2009).

Esse arcabouço permanece fundamental para compreender a inovação de fronteira no contexto da trajetória de crescimento das economias contemporâneas, marcada pela profusão de ideias e da inter-relação entre os mercados de bens finais, intermediários e de pesquisa. No entanto, a ascensão das tecnologias digitais para além da mera conectividade da informação desloca o centro de gravidade do problema analítico. Se, nos anos 1990, a digitalização estava associada sobretudo à informatização de processos, à comunicação em rede e à redução de custos de transação informacional, hoje ela envolve sistemas algorítmicos, automação cognitiva, integração de dados em tempo real e reconfiguração profunda das arquiteturas organizacionais e produtivas da indústria. Parte substantiva do impacto econômico da digitalização não se manifesta como um “salto tecnológico” pontual, mensurável por



aumentos diretos de eficiência técnica, mas como reorganização dos mecanismos de coordenação, decisão e aprendizado dentro e entre firmas. Trata-se, portanto, de uma transformação da arquitetura econômica que conecta informação, rotinas, capacidades e processos produtivos, cuja lógica difere daquela incorporada em modelos tradicionais de crescimento pelo progresso técnico.

A natureza das tecnologias digitais ajuda a explicar por que esse deslocamento é teoricamente exigente. Diferentemente de tecnologias cujo efeito principal se materializa como aumento direto da produtividade em etapas específicas da produção, as tecnologias digitais são altamente difusíveis, escaláveis e transversais, com custos marginais baixos de replicação e forte caráter combinatório. Essas propriedades aproximam a digitalização da noção de GPT, cujo impacto econômico depende menos da adoção isolada e mais da emergência de complementaridades organizacionais, intangíveis, de capital humano e de integração de sistemas, que viabilizam usos produtivos e difusão efetiva (Bresnahan; Trajtenberg, 1995). A economia da informação já antecipava essa lógica ao demonstrar como bens informacionais alteram estruturas de custo, formas de concorrência e estratégias empresariais, tornando a organização interna e a coordenação determinantes do desempenho (Shapiro; Varian, 1999).

Em ambientes industriais, isso implica que a digitalização tende a operar como transformação sistêmica: mudanças em rotinas produtivas, governança de dados, integração de processos, coordenação de cadeias e realocação de tarefas — e não como mera incorporação de “mais um insumo” à função de produção. Essa interpretação encontra respaldo empírico especialmente a partir da década de 2010. No nível microeconômico, uma vasta literatura mostra que a adoção de tecnologias digitais está associada a ganhos de produtividade e inovação apenas de forma condicionada. Estudos pioneiros já indicavam que investimentos em tecnologias da informação só produzem efeitos econômicos quando acompanhados por mudanças organizacionais, práticas gerenciais e investimentos em ativos intangíveis (Brynjolfsson; Hitt, 2000; Brynjolfsson; Hitt; Yang, 2002). Evidências posteriores reforçam o diagnóstico ao documentar defasagens sistemáticas entre adoção e ganhos observáveis, padrão que Brynjolfsson, Rock



e Syverson interpretam como típico de GPTs e sintetizam na chamada productivity J-curve (Brynjolfsson; Rock; Syverson, 2017; 2021). Nessa perspectiva, os complementos necessários (reengenharia de processos, capital organizacional, dados, treinamento) antecedem os ganhos de produtividade, gerando trajetórias inovativas e de crescimento não lineares e, frequentemente, períodos iniciais de queda ou estagnação posterior.

Esse resultado impõe uma restrição conceitual central: o “efeito da digitalização” não pode ser tratado como imediato nem incondicional. Ele é mediado por um processo de implementação que transforma gradualmente capacidades produtivas e organizacionais das firmas. A distinção entre adoção e implementação torna-se, assim, essencial para qualquer tentativa de modelagem consistente para tratar o crescimento impulsionado pela digitalização. Evidências para economias avançadas mostram ampliação do hiato de produtividade entre firmas de fronteira e retardatárias, associada à difusão incompleta de tecnologias digitais e à dificuldade de adoção efetiva por empresas com menor dotação de capacidades organizacionais e intangíveis (OECD, 2015; Andrews; Criscuolo; Gal, 2016; OECD, 2021). Em paralelo, a literatura sobre *superstar firms* indica que tecnologias digitais contribuem para a concentração produtiva ao reforçar retornos crescentes associados à escala, aos dados e à coordenação, ampliando vantagens cumulativas (Autor et al., 2020). Esses resultados sugerem que a digitalização opera como mecanismo de amplificação de diferenças entre firmas e também entre setores, e não apenas como um choque homogêneo que induz convergência automática.

A tensão torna-se ainda mais decisiva quando o foco recai sobre desenvolvimento industrial. A industrialização historicamente esteve associada a aprendizado cumulativo, coordenação ao longo de cadeias produtivas e acumulação progressiva de capacidades técnicas e organizacionais (Kaldor, 1966; Lall, 1992). A transformação digital pode reforçar esses processos, mas sob condições específicas. Relatórios recentes e evidências setoriais indicam que tecnologias associadas à Indústria 4.0 geram ganhos quando combinadas com capacidades industriais, engenharia de processos e integração



organizacional; na ausência desses elementos, seus efeitos sobre *upgrading* produtivo são limitados e podem coexistir com estagnação ou especialização regressiva (UNIDO, 2019). Evidências recentes para a manufatura europeia reforçam o diagnóstico ao mostrar que tecnologias de integração digital, automação avançada e análise em tempo real se associam, em média, a ganhos de produtividade do trabalho, mas com forte heterogeneidade entre firmas e setores, refletindo diferenças estruturais de capacidades e organização interna das firmas (Bettioli et al., 2024; Lamperti et al., 2024).

O avanço de aplicações de inteligência artificial (IA) coloca uma dimensão adicional ao problema. Ao interpretar IA como tecnologia que reduz o custo de previsão, a literatura destaca seus efeitos sobre decisão, coordenação interna e desenho organizacional (Agrawal; Gans; Goldfarb, 2019). Em perspectiva macroestrutural, Acemoglu e Restrepo (2019) mostram que os efeitos agregados da automação dependem criticamente de como tecnologias são integradas às tarefas existentes e de como a economia ajusta sua composição setorial e a criação de novas tarefas, permitindo a coexistência de ganhos agregados e deslocamentos estruturais ou distributivos. A implicação para o desenvolvimento industrial é direta: a mesma tecnologia pode gerar trajetórias distintas a depender de como é incorporada às rotinas produtivas e às competências existentes, não resultando, portanto, em padrões de convergência automáticos.

A literatura sobre inovação, capacidades e transformação digital aprofunda essa visão ao mostrar que a relação entre digitalização e desempenho inovativo é mediada por capacidades de absorção, base de conhecimento e integração organizacional. Estudos recentes destacam que a adoção de tecnologias digitais não implica automaticamente maior inovação, e que a profundidade de uso — isto é, a incorporação efetiva em rotinas e processos — é crucial para retroalimentar trajetórias inovativas (Usai et al., 2021; Blichfeldt; Faullant, 2021; Li et al., 2023). Retoma-se, aqui, um resultado clássico: a capacidade de explorar conhecimento externo depende do conhecimento prévio acumulado e do esforço



deliberado de aprendizagem (Cohen; Levinthal, 1990). Na era digital, esse mecanismo ganha escala ampliada, tornando capacidades digitais e capacidades de absorção profundamente complementares.

Tomadas em conjunto, essas literaturas convergem para três fatos estilizados centrais com implicações teóricas precisas: (i) os efeitos econômicos da digitalização são mediatos por complementos organizacionais, ativos intangíveis e capacidades, com defasagens e não linearidades; (ii) a digitalização associa-se a heterogeneidade persistente e, em certos contextos, a maior concentração produtiva; (iii) no desenvolvimento industrial, a digitalização pode reforçar *upgrading* sob condições específicas, mas pode também coexistir com estagnação e divergência estrutural. Embora as tradições schumpeteriana, neo-schumpeteriana e evolucionária capturem elementos centrais desse quadro (Aghion; Howitt, 1992; Dosi, 1982; Nelson; Winter, 1982), elas ainda não oferecem, em formulação formal integrada, um mecanismo capaz de articular propriedades do digital como a difusibilidade, a transversalidade e o caráter combinatório, que implicam em: (a) custos de implementação e coordenação e (b) seleção competitiva cumulativa, gerando simultaneamente retornos condicionais, heterogeneidade persistente e concentração endógena sob acesso tecnológico semelhante. É essa lacuna que motiva o modelo desenvolvido na seção seguinte, no qual a transformação digital é tratada como crescimento de interdependência decisória e a coordenação organizacional como estado econômico distinto, sujeito a congestionamento e cumulatividade. O Quadro 1 organiza a literatura discutida em torno de mecanismos econômicos recorrentes e explicita como esses mecanismos impõem restrições formais à estrutura do modelo proposto no artigo, conectando evidência empírica, processos teóricos e os parâmetros da modelagem.



Quadro 1 - Síntese esquemática: literatura → mecanismos → objeto do modelo a ser formalizado

Evidência na literatura	Mecanismo econômico recorrente	Implicação formal no modelo
Adoção ≠ Implementação Defasagens, J-curve, fricções organizacionais (Brynjolfsson; Rock; Syverson, 2017, 2021; Usai et al., 2021; Blichfeldt; Faullant, 2021)	A adoção tecnológica não gera efeitos imediatos: há custos de coordenação, aprendizado e reconfiguração organizacional.	Introdução de um estado distinto de coordenação h_i com dinâmica própria , capturando defasagens e transições não instantâneas.
Complementaridades Organização, intangíveis, gestão (Bresnahan; Trajtenberg, 1995; Shapiro; Varian, 1999)	Ganhos tecnológicos dependem de ajustes simultâneos em múltiplas dimensões, gerando sobrecarga de coordenação.	Não linearidades na dinâmica produtiva via custos crescentes de coordenação sob alta interdependência.
Capacidade de absorção Aprendizado cumulativo (Cohen; Levinthal, 1990; Nelson; Winter, 1982)	O aprendizado depende da base prévia de conhecimento da firma.	A dinâmica de $\dot{h}_i$ depende de uma base c_i , refletindo dependência de trajetória.



Superstars e concentração Retornos crescentes e seleção (Autor et al., 2020; OECD, 2021)	Diferenças iniciais são amplificadas por processos seletivos.	Dinâmica replicadora: $\dot{s}_i = s_i(g_i - \bar{g})$, gerando concentração endógena.
Indústria 4.0 e upgrading Ganhos condicionais (Kaldor, 1966; Lall, 1992; UNIDO, 2019; Bettiol et al., 2024; Lamperti et al., 2024)	O impacto tecnológico depende das capacidades produtivas e institucionais.	Existência de regimes heterogêneos de desempenho conforme o nível de capacidades.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Com base nisso, o modelo organiza-se em torno de duas variáveis de estado ao nível da firma. A primeira é a capacidade industrial $c_i(t)$, entendida como estoque de competências técnicas, engenharia de processos, rotinas produtivas e integração ao longo de cadeias de valor, sintetizando a tradição de aprendizado cumulativo associada à industrialização (Kaldor, 1966; Lall, 1992). A segunda é a capacidade de coordenação organizacional $h_i(t)$, definida como a habilidade de integrar sistemas, governar dados, reorganizar fluxos de informação e traduzir sinais digitais em decisões econômicas consistentes. Essa capacidade é transversal às funções da firma e atua como tecnologia de coordenação, em linha com a caracterização das tecnologias digitais de natureza organizacional (Bresnahan; Trajtenberg, 1995; Shapiro; Varian, 1999).

Para conectar explicitamente o modelo ao tema transformação industrial, assume-se que $c_i(t)$ sintetiza não apenas “capacidade produtiva” em sentido abstrato, mas um conjunto de competências industriais diretamente ligado ao upgrading: engenharia de processos, integração em cadeias, padronização, qualidade, automação e capacidade de reconfigurar layouts e rotinas produtivas. Por sua vez, $h_i(t)$ captura a infraestrutura organizacional necessária para operar manufatura digital e integração vertical/horizontal — governança de dados, interoperabilidade, rastreabilidade e consistência decisória em tempo real — elementos centrais de Indústria 4.0. Nessa leitura, a transição digital altera a topologia de decisões industriais (produção, logística, etc.) e o desempenho depende da capacidade de coordená-las sob interdependência crescente.

A escolha metodológica crucial é que a intensidade digital sistêmica $D(t)$ não entra como “multiplicador mecânico” do produto, mas como força que expande a interdependência decisória e, portanto, a carga de coordenação a ser governada internamente. Ao mesmo tempo, para acomodar heterogeneidade e evolução estrutural sem impor “superstars” exógenas, utiliza-se um continuum de firmas e uma dinâmica competitiva do tipo replicadora para participações $s_i(t)$, de modo que diferenças em crescimento relativo se traduzam em realocação cumulativa de atividade econômica. Essa escolha é



coerente com a tradição evolucionária ao tratar estrutura de mercado como resultado de seleção, e não como mero equilíbrio de conduta estratégica.

Por fim, é necessário fechar minimamente o canal de implementação. Introduce-se um termo $I_D(t)$ que representa a intensidade efetiva de esforço de implementação digital (treinamento, reengenharia de processos, integração de sistemas, governança de dados). Para manter o núcleo analítico focado no mecanismo de coordenação e evitar uma camada adicional de escolhas ótimas, assume-se, no caso-base, $I_D(t)$ como comum às firmas e proporcional ao ambiente digital:

$$I_D(t) = \bar{i} D(t), \bar{i} > 0, \quad (1)$$

o que permite interpretar $I_D(t)$ como função do ambiente institucional e tecnológico no qual as firmas operam. Essa hipótese preserva o foco: a heterogeneidade e a seleção não decorrem de “escolhas arbitrárias de investimento”, mas da conversão desigual de esforço em coordenação devido à complementaridade com a base industrial $c_i(t)$ e à presença de obsolescência organizacional.

4. Resultados e Discussão

4.1. Formalização ontológica do regime digital

No enquadramento de tecnologias de propósito geral, o digital é entendido como inovação de uso amplo cujos efeitos dependem de complementos e reorganização produtiva (Bresnahan e Trajtenberg, 1995). Essa interpretação captura uma regularidade essencial: o papel de complementos custosos e desigualmente distribuídos, ao passo que já antecipa a ideia de retornos condicionais. Contudo, frequentemente permanece agnóstica quanto à estrutura interna da coordenação que sustenta tais



complementos: descreve difusão e complementaridades, mas não endogeniza porque a reorganização produtiva concentra ganhos, amplifica diferenças e produz assimetrias persistentes, mesmo sob ampla difusão tecnológica. Em abordagens baseadas em intangíveis, por sua vez, a digitalização aparece como estoque acumulável sujeito a fricções, subinvestimento e dificuldades de mensuração; ainda assim, tratar o digital como “mais um ativo” pode obscurecer o canal crucial de transformação: não é apenas “quanto” ativo digital se acumula, mas como decisões passam a ser interligadas, sincronizadas e executadas.

De modo semelhante, modelos que interpretam inteligência artificial como redução do custo de previsão capturam com precisão mudanças em decisões marginais e na fronteira de tarefas, mas não formalizam de maneira explícita o que ocorre com o desenho organizacional quando decisões deixam de ser aproximadamente separáveis e passam a ser sistematicamente interdependentes (Agrawal, Gans e Goldfarb, 2019). Em termos econômicos, essas formulações reconhecem a presença de complementaridades, reorganização e aprendizagem, mas ainda deixam indeterminado o objeto que transforma o problema competitivo e dá origem, como consequência recorrente, à combinação observada de ganhos agregados condicionais, heterogeneidade persistente e concentração, sobretudo em contextos industriais modernizados.

O ponto ausente pode ser formulado como um objeto econômico autônomo: interdependência decisória. A transformação digital altera a topologia das decisões econômicas, elevando o grau em que o payoff de uma decisão depende de um conjunto crescente de outras decisões tomadas simultaneamente ou em sequência. Processos, tarefas e unidades organizacionais passam a operar em sistemas integrados em tempo real, nos quais decisões deixam de ser aproximadamente separáveis e passam a produzir externalidades internas crescentes. Esse fenômeno é amplamente descrito por meio de plataformas, integração de cadeias, governança de dados, interoperabilidade e automação inteligente, mas permanece subformalizado como objeto analítico central. Dito de outra forma: o regime digital não é apenas um regime com mais informação, nem apenas um regime com novas máquinas; é um regime em que a



estrutura de dependências internas se expande, e isso desloca o lócus das restrições de disponibilidade tecnológica para a capacidade de coordenação interdependente.

A contribuição desta seção é, portanto, tratar o crescimento endógeno da interdependência decisória como o núcleo da transformação digital, e derivar suas implicações econômicas quando a coordenação enfrenta custos congestionados. A digitalização amplia sistematicamente esse grau ao integrar fluxos de informação, sincronizar processos e permitir coordenação algorítmica em larga escala. Crucialmente, esse crescimento não é neutro: operar sob alta interdependência exige coordenação consistente, mas coordenação não escala automaticamente com interdependência. A consequência é um trade-off estrutural: ao mesmo tempo em que amplia o espaço de decisões coordenáveis e, com isso, abre possibilidades de recombinação, integração e ganhos de eficiência, a digitalização eleva custos de governança, integração e consistência organizacional — custos que podem ser intrinsecamente convexos, isto é, crescer mais do que proporcionalmente à medida que interfaces, dependências e integrações se multiplicam. Esses custos não são meramente transitórios; são inerentes ao crescimento do espaço de interdependências e, de forma decisiva, não afetam simetricamente todas as firmas. Firms com maior capacidade prévia de governar decisões interdependentes tendem a internalizar ganhos; firmas com menor capacidade enfrentam sobrecarga organizacional, comprimindo crescimento e elevando fragilidade competitiva. Nesse ponto, heterogeneidade deixa de ser hipótese e torna-se consequência: sob interdependência crescente, o regime digital seleciona endogenamente quem consegue operar com consistência.

Para formalizar essa ontologia em uma estrutura capaz de conversar com os fatos estilizados documentados na literatura, o modelo introduz um estado agregado de intensidade digital sistêmica, $D(t) \geq 0$, que sintetiza o ambiente tecnológico e institucional no qual as firmas operam (infraestrutura, conectividade, plataformas, IA e dados), e uma medida de interdependência decisória agregada, $I(t)$, definida como função crescente de $D(t)$:



$$I(t) \equiv I(D(t)), I'(D) > 0. \quad (2)$$

A hipótese ontológica distintiva é que, no domínio relevante da transformação digital, a interdependência cresce ao menos proporcionalmente e tipicamente de forma superlinear, refletindo o caráter combinatório do digital e a multiplicação de interfaces e integrações à medida que sistemas passam a operar em tempo real. Para fixar ideias sem perder a generalidade qualitativa do argumento, utiliza-se a parametrização:

$$I(D) = D^\phi, \phi > 1. \quad (3)$$

A interpretação econômica de $\phi > 1$ é direta: conforme o ambiente digital se intensifica, o número efetivo de dependências e interfaces entre decisões cresce mais do que proporcionalmente, pois cada integração cria novas condições de consistência, novas necessidades de reconciliação e novas externalidades internas. É essa expansão do “grau de acoplamento” decisório e, não apenas o acesso a um artefato tecnológico, que reorganiza o problema econômico da firma. Para tanto, considera-se um conjunto de firmas indexadas por $i \in [0,1]$. A unidade analítica é deliberadamente minimalista no que diz respeito à tecnologia produtiva, porque o objetivo é isolar o canal de coordenação sob interdependência. Cada firma possui dois estados endógenos estritamente positivos: $c_i(t) > 0$, interpretado como capacidade produtiva/industrial — conhecimentos, rotinas, competências técnicas e integração ao longo de cadeias; e $h_i(t) > 0$, interpretado como capacidade de coordenação organizacional — habilidade de integrar sistemas, governar dados, manter consistência decisória, traduzir sinais digitais em decisões e executar sob interdependência elevada. Essa distinção se alinha à evidência de que ganhos da digitalização são mediatos por reorganização e complementos organizacionais, frequentemente com defasagens (Brynjolfsson e Hitt, 2000; Brynjolfsson, Hitt e Yang,



2002; Brynjolfsson e Hitt, 2003; Brynjolfsson, Rock e Syverson, 2017; 2021), e também se conecta à ideia de capacidades de absorção, segundo a qual a exploração de novos conhecimentos depende do estoque prévio acumulado (Cohen e Levinthal, 1990).

Por parcimônia, a produção da firma é linear em capacidade produtiva:

$$y_i(t) = A c_i(t), A > 0. \quad (4)$$

A escolha de uma tecnologia produtiva linear não implica negar a existência de heterogeneidade de produtividade, inovação ou progresso técnico. Pelo contrário, ela reflete uma estratégia analítica deliberada: tratar c_i como um índice sintético de capacidades produtivas, rotinas e competências acumuladas, de modo que as principais não linearidades do modelo emergem não da função de produção, mas do processo de coordenação sob interdependência. Essa opção é coerente com a tradição evolucionária, na qual o desempenho econômico resulta da interação entre capacidades e seleção, e não apenas de propriedades técnicas da função de produção (Nelson e Winter, 1982). O produto agregado é $Y(t) = \int_0^1 y_i(t) di$, e a participação em atividade (equivalentemente, participação em capacidade efetiva) é:

$$s_i(t) \equiv \frac{y_i(t)}{Y(t)} = \frac{c_i(t)}{\int_0^1 c_j(t) dj}. \quad (5)$$

A razão de definir $s_i(t)$ dessa forma é tornar explícito um ponto central para uma leitura evolucionária do mercado: o que chamamos de “estrutura” — concentração, liderança, persistência de vantagens — pode ser representado como resultado de um processo de seleção no qual diferenças de crescimento relativo se traduzem, cumulativamente, em realocação de atividade. O próximo passo é ligar



a ontologia da interdependência à microeconomia da coordenação. A hipótese central é que a intensificação digital amplia a interdependência decisória e, com isso, eleva a carga de coordenação que precisa ser processada pela organização.

A carga enfrentada pela firma i é modelada como proporcional à interdependência agregada e à sua escala decisória, aproximada por sua escala produtiva no longo prazo:

$$\Lambda_i(t) = I(t) c_i(t) \quad (6)$$

A proporcionalidade entre interdependência sistêmica e escala produtiva captura a ideia de que, no longo prazo, expansão de capacidade implica expansão do conjunto de decisões, interfaces e processos que precisam ser coordenados. Em ambientes digitais integrados, crescimento de escala tende a aumentar a densidade de interações internas e externas, entre unidades, sistemas, fornecedores e clientes, de modo que c_i funciona como uma aproximação parsimoniosa da escala decisória relevante. Assim, Λ_i sintetiza o fato de que a digitalização não apenas amplia oportunidades, mas também multiplica os pontos de acoplamento organizacional.

Coordenação não é gratuita e apresenta congestionamento. A firma dispõe de $h_i(t)$ para governar $\Lambda_i(t)$. A forma reduzida que captura esse congestionamento é uma perda proporcional, representado por uma taxa de fricção, que cresce convexamente com a razão Λ_i/h_i :

$$\psi_i(t) = \xi \left(\frac{\Lambda_i(t)}{h_i(t)} \right)^{1+\nu} = \xi \left(\frac{I(t) c_i(t)}{h_i(t)} \right)^{1+\nu}, \quad \xi > 0, \nu > 0. \quad (7)$$

Economicamente, $\psi_i(t)$ pode ser interpretada como uma taxa de fricção organizacional que reduz a eficiência com que a capacidade produtiva é convertida em crescimento efetivo. Em vez de modelar explicitamente um custo em nível subtraído da produção, assume-se que essas fricções afetam diretamente a taxa de expansão de $c_i(t)$, capturando perdas associadas a inconsistências decisórias,



reconciliação de sistemas, falhas de integração e sobrecarga gerencial. Essa formulação reduzida permite incorporar o gargalo organizacional diretamente na dinâmica de crescimento, sem introduzir uma camada adicional de escolha ótima ou contabilidade de custos.

A dinâmica de crescimento de capacidade produtiva incorpora, então, uma tensão estrutural. Por um lado, a digitalização amplia o potencial de recombinação, integração e previsão, um canal compatível com a visão de tecnologias digitais como GPT e com a interpretação de IA como tecnologia que altera decisões ao reduzir custos de previsão (Bresnahan e Trajtenberg, 1995; Shapiro e Varian, 1999; Agrawal, Gans e Goldfarb, 2019). Por outro lado, esse potencial é erodido por fricções de coordenação que crescem com a interdependência relativa à capacidade organizacional. Essa tensão é representada por uma lei de movimento multiplicativa para $c_i(t)$:

$$\dot{c}_i(t) = g_i(t) c_i(t) \quad (8)$$

A taxa de crescimento é dada por:

$$g_i(t) = \rho D(t)^\omega - \delta - \xi \left(\frac{I(t) c_i(t)}{h_i(t)} \right)^{1+\nu}, \rho > 0, \omega > 0, \delta > 0 \quad (9)$$

Substituindo $I(t) = D(t)^\phi$, obtém-se:

$$g_i(t) = \rho D(t)^\omega - \delta - \xi \left(\frac{D(t)^\phi c_i(t)}{h_i(t)} \right)^{1+\nu} \quad (10)$$

A equação (10) é o núcleo do mecanismo: à medida que $D(t)$ cresce, o componente potencial pode elevar g_i , mas o mesmo crescimento eleva a interdependência D^ϕ e, portanto, amplifica a perda congestiva conforme c_i/h_i aumenta. Em linguagem empírica: o mesmo processo que torna a economia



mais “digital” aumenta as oportunidades de integração e eficiência, mas também intensifica o risco de sobrecarga organizacional e de falhas de coordenação, e isso se traduz em retornos condicionais e não linearidades — exatamente as regularidades sintetizadas pela productivity J-curve e pela distinção entre adoção e implementação (Brynjolfsson, Rock e Syverson, 2017; 2021).

Para que a distinção entre adoção e implementação não permaneça apenas retórica, $h_i(t)$ evolui como estado distinto. A coordenação organizacional acumula-se com aprendizagem, depende do esforço de implementação e, crucialmente, é complementar à base produtiva. Essa complementaridade conecta a dinâmica de coordenação à ideia de capacidade de absorção (Cohen e Levinthal, 1990): a habilidade de explorar novos conhecimentos e reorganizar rotinas depende do estoque de conhecimento prévio e da densidade de rotinas existentes. Formaliza-se:

$$\dot{h}_i(t) = \theta I_D(t)^\eta c_i(t)^\gamma - \kappa h_i(t), \theta > 0, \eta > 0, \gamma > 0, \kappa > 0. \quad (11)$$

Aqui, $I_D(t)$ representa a intensidade efetiva do esforço de implementação (treinamento, reengenharia, integração de sistemas, governança de dados). No caso-base, assume-se $I_D(t) = \bar{I}D(t)$, com $\bar{I} > 0$, refletindo que o ambiente digital sistêmico e institucional induz um esforço de implementação comum, hipótese que preserva a interpretação central do artigo: a heterogeneidade não é “escolha arbitrária de investimento”, mas consequência da conversão diferencial desse esforço em coordenação por meio de c_i^γ e da presença de obsolescência organizacional (κ). A equação (11), portanto, operacionaliza a dimensão empiricamente documentada segundo a qual adoção não implica ganhos imediatos: coordenação exige tempo, aprendizagem e complementos, e se acumula de forma dependente de trajetória no longo prazo.



A partir dessas dinâmicas, a estrutura de mercado emerge como resultado de seleção. Para evitar impor “superstars” exógenas e, ao mesmo tempo, capturar realocação cumulativa associada a diferenças persistentes de crescimento, utiliza-se uma dinâmica replicadora para participações:

$$\dot{s}_i(t) = s_i(t)(g_i(t) - \bar{g}(t)), \quad (12)$$

onde $\bar{g}(t) \equiv \int_0^1 s_j(t) g_j(t) dj$. Essa representação é particularmente adequada para o argumento do artigo porque conecta diretamente microdinâmicas de coordenação e implementação à macro-dinâmica de concentração: se certas firmas crescem persistentemente mais rápido, sua participação aumenta, realocando atividade e produzindo concentração endógena. O que importa, então, é identificar o estado econômico que governa essas diferenças de crescimento quando D é elevado. Esse estado é a razão entre escala e coordenação. Defina:

$$x_i(t) \equiv \frac{c_i(t)}{h_i(t)} \quad (13)$$

Essa variável sintetiza a hipótese ontológica central: no regime digital, o que diferencia firmas não é “ter ou não ter tecnologia”, mas o quão capaz a organização é de operar com consistência quando decisões se tornam interdependentes. Reescrevendo (10) em termos de x_i , obtém-se:

$$g_i(t) = \rho D(t)^\omega - \delta - \xi (D(t)^\phi x_i(t))^{1+\nu} \quad (14)$$



A interpretação é imediata e economicamente carregada: para $D(t) > 0$, $g_i(t)$ é estritamente decrescente em $x_i(t)$. Uma firma que “cresce demais” em escala relativa à sua coordenação (isto é, que eleva c_i sem elevar h_i proporcionalmente) entra em regime de sobrecarga organizacional; a perda congestiva cresce convexamente e comprime o crescimento líquido. Isso produz, de forma endógena, retornos condicionais da digitalização: em ambientes de alta intensidade digital, os ganhos potenciais podem existir, mas sua realização depende criticamente de manter x_i sob controle, isto é, de expandir coordenação à medida que a escala e a interdependência crescem. Esse mecanismo dá conteúdo formal ao que, na evidência, aparece como defasagem, J-curve e heterogeneidade de retornos verificado em distintos setores.

A condição que caracteriza o regime digital como aquele em que a interdependência cresce “mais rápido” do que o componente potencial relevante é a dominância assintótica do termo congestivo. Em (14), o termo congestivo escala em $D^{\phi(1+\nu)}$, enquanto o termo potencial escala em D^ω . Uma condição suficiente para que, em níveis suficientemente altos de D , o gargalo organizacional domine é:

$$\phi > \frac{\omega}{1 + \nu}. \quad (15)$$

Sob (15), o aumento de D tende, no domínio relevante, a amplificar desproporcionalmente o papel de x_i na determinação de g_i . Esse ponto é crucial porque conecta a ontologia à divergência: quando a economia entra em regimes de alta interdependência (alto ϕ) e alta convexidade de coordenação (alto ν), pequenas diferenças em coordenação relativa tornam-se decisivas. E como h_i acumula com defasagens e depende de c_i (equação (11)), a dinâmica torna-se dependente de trajetória: firmas que conseguem construir coordenação cedo sustentam crescimento e consolidam participação; firmas que



não conseguem entrar em regimes de sobrecarga, onde o crescimento líquido cai e a seleção se intensifica.

Para tornar explícito como essa variável de estado se move, deriva-se a dinâmica de x_i . Com (8) e (11), tem-se:

$$\frac{\dot{x}_i(t)}{x_i(t)} = \frac{\dot{c}_i(t)}{c_i(t)} - \frac{\dot{h}_i(t)}{h_i(t)} = g_i(t) - \frac{\theta I_D(t)^\eta c_i(t)^\gamma}{h_i(t)} + \kappa. \quad (16)$$

A equação (16) é importante por duas razões. Primeiro, ela mostra por que “coordenação” não pode ser tratada apenas como parâmetro fixo: x_i é endógeno, e sua trajetória depende tanto da pressão competitiva via $g_i(t)$ quanto da capacidade de transformar implementação em coordenação via $\theta I_D^\eta c_i^\gamma / h_i$. Além disso, a equação explicita uma característica central do regime digital: o mesmo processo de intensificação digital que aumenta o potencial de crescimento também pressiona a firma ao elevar interdependência. Portanto, a estabilidade de x_i e, logo, a sustentabilidade do crescimento requer que h_i acompanhe, ao longo do tempo, a expansão de c_i sob D elevado. É aqui que a distinção entre adoção e implementação se torna um mecanismo, pois uma firma pode aumentar c_i (escala, complexidade, integração) e ainda assim perder desempenho se h_i não cresce na mesma proporção.

4.2. Implicações dinâmicas da coordenação sob interdependência digital

A equação (14) torna explícito que, para um dado nível de intensidade digital $D(t) > 0$, a taxa de crescimento da firma é estritamente decrescente na razão entre escala produtiva e capacidade de coordenação, $x_i(t) = c_i(t)/h_i(t)$. Em termos econômicos, isso significa que, no regime digital, o desempenho não depende apenas do acesso à tecnologia, mas da capacidade organizacional de operar sob interdependência decisória crescente. Firms cuja expansão produtiva não é acompanhada por um



fortalecimento proporcional da coordenação enfrentam perdas congestivas crescentes, o que comprime o crescimento líquido. Por contraste, firmas que mantêm $x_i(t)$ relativamente baixo conseguem internalizar os ganhos potenciais da digitalização. Essa propriedade fornece uma microfundamentação direta para a evidência de retornos condicionais, em que a digitalização eleva produtividade apenas quando acompanhada por capacidades organizacionais adequadas inerente a dependência de trajetória da inovação.

Além disso, para qualquer nível dado de D , existe um limiar implícito $x^*(D)$ tal que o crescimento líquido é positivo apenas para firmas com $x_i < x^*(D)$. Quando a elasticidade da interdependência (ϕ) e a convexidade dos custos de coordenação (ν) tornam o termo congestivo dominante, esse limiar torna-se estritamente decrescente em D . Em outras palavras, quanto mais intensa a digitalização sistêmica, mais restrito se torna o conjunto de firmas capazes de crescer. Esse resultado implica que aumentos em D tendem a elevar a dispersão de desempenho, ao “apertar” espaço de viabilidade competitiva, mesmo sem mudanças exógenas de produtividade.

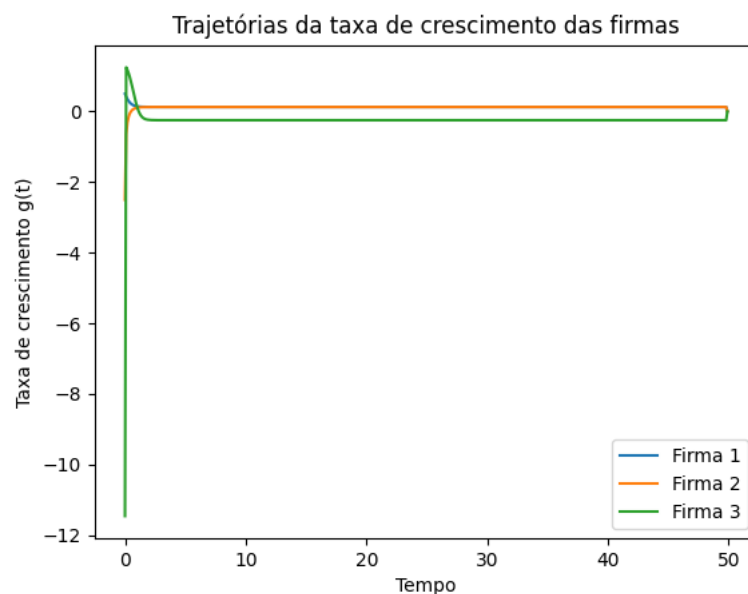


Figura 1(a) – Trajetórias da taxa de crescimento sob diferentes níveis de coordenação
 Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 1(a) ilustra o caráter condicional dos retornos à digitalização ao mostrar trajetórias diferenciadas da taxa de crescimento $g_i(t)$ para firmas com distintas razões escala–coordenação iniciais. Firms que operam com menor $x_i(0)$ apresentam crescimento persistentemente superior, enquanto firmas mais sobrecarregadas exibem crescimento reduzido ou mesmo negativo em fases iniciais. O resultado evidencia que, para um dado nível de intensidade digital D , os ganhos potenciais associados à digitalização só se materializam quando a capacidade organizacional acompanha a expansão da interdependência decisória. A digitalização, portanto, não atua como um choque homogêneo de produtividade, mas como um amplificador de diferenças organizacionais, gerando retornos assimétricos e dependentes da estrutura interna de coordenação das firmas, em consonância com a interpretação evolucionária.



A condição de regime expressa em (15), $\phi > \omega/(1 + \nu)$, reforça esse mecanismo. Sob níveis suficientemente elevados de interdependência, pequenas diferenças iniciais em coordenação relativa x_i passam a gerar diferenças desproporcionalmente grandes em crescimento. O ambiente digital deixa de ser apenas uma fonte de oportunidades e torna-se também um amplificador de assimetrias organizacionais. Esse resultado ajuda a explicar por que estimativas médias dos efeitos da digitalização frequentemente ocultam comportamentos por regimes, onde os retornos se tornam altamente não lineares e dependentes de coordenação.

Quando essas diferenças de crescimento persistem, a dinâmica replicadora (12) converte vantagens organizacionais em realocação cumulativa de participação de mercado. Firms com menor $x_i(t)$ expandem sua participação, enquanto firmas sobrecarregadas perdem espaço, gerando concentração endógena mesmo na ausência de heterogeneidade tecnológica exógena. Em setores nos quais a digitalização intensifica a integração de processos, a interoperabilidade de sistemas e o acoplamento decisório, esse mecanismo tende a ser particularmente forte, oferecendo uma interpretação estrutural para a emergência de firmas dominantes na era digital.

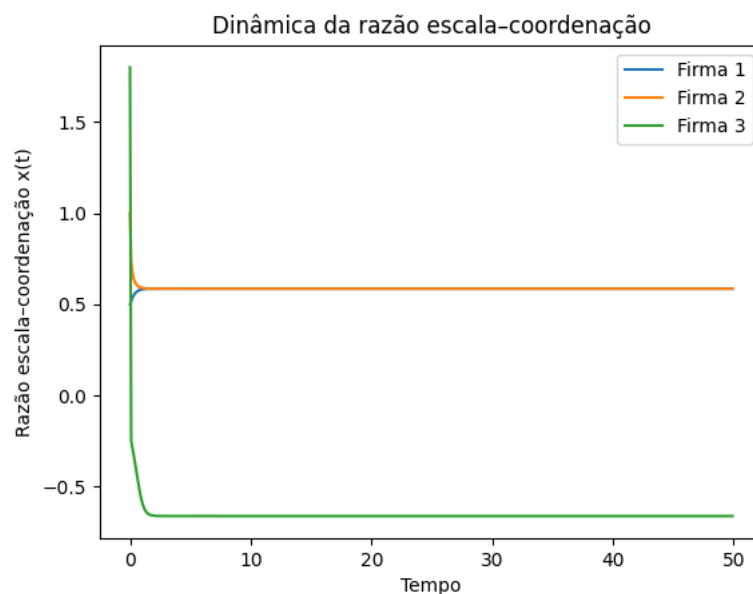


Figura 1(b) – Evolução das participações de mercado e concentração endógena
 Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 1(b) ilustra como diferenças persistentes nas taxas de crescimento entre firmas se convertem, ao longo do tempo, em realocação cumulativa de participação de mercado por meio da dinâmica replicadora. Firms que conseguem sustentar maior coordenação organizacional relativa expandem continuamente sua presença no mercado, enquanto firmas mais sobrecarregadas perdem participação. Esse processo gera concentração endógena mesmo na ausência de vantagens tecnológicas exógenas ou choques de produtividade. Em setores intensivos em integração digital, interoperabilidade e governança de dados, onde a interdependência decisória é elevada, a capacidade de coordenação torna-se um fator competitivo central. A concentração observada, nesse enquadramento, reflete um mecanismo seletivo baseado em capacidades organizacionais, e não apenas em superioridade tecnológica inicial:



vantagens de coordenação sustentadas traduzem-se em crescimento persistente e, consequentemente, em maior concentração de mercado.

Por fim, como a capacidade de coordenação $h_i(t)$ se acumula gradualmente segundo (11) e está sujeita à obsolescência organizacional, a resposta do crescimento a aumentos em D pode ser inicialmente negativa para firmas com elevada razão x_i . Antes que a coordenação se ajuste, a intensificação da interdependência amplia os custos congestivos, comprimindo o desempenho. Apenas após a acumulação de $h_i(t)$ os ganhos potenciais da digitalização se materializam. Esse mecanismo gera trajetórias compatíveis com padrões de defasagem e com a chamada productivity J-curve, reforçando a distinção entre adoção e implementação digital.

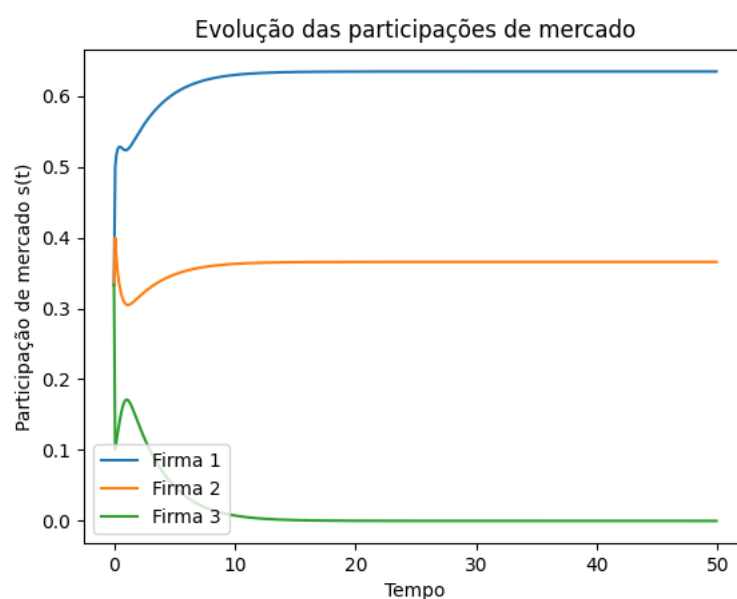


Figura 1(c) – Dinâmica da razão escala–coordenação e defasagens de implementação
 Fonte: Elaborado pelos autores.



A Figura 1(c) ilustra a dinâmica de ajuste da razão escala–coordenação $x_i(t)$, evidenciando que firmas inicialmente sobrecarregadas podem reduzir gradualmente essa razão por meio da acumulação de capacidade organizacional $h_i(t)$. Esse processo gera trajetórias compatíveis com padrões de defasagem e com a chamada productivity J-curve: aumentos na intensidade digital elevam inicialmente os custos congestivos de coordenação, comprimindo o crescimento, enquanto os ganhos potenciais só se materializam após o ajuste organizacional. O resultado reforça a distinção entre adoção e implementação digital, mostrando que a integração efetiva da tecnologia requer tempo, aprendizagem e recomposição das rotinas internas, em linha com a evidência empírica de que os efeitos da digitalização são mediatos e dependentes de trajetória.

A leitura econômica pode ser feita em termos de regimes. Em um regime de digitalização madura, em que $D(t)$ é alto e se move lentamente, o termo $(D^\phi x_i)^{1+\nu}$ intensifica a penalização de firmas com alta razão c_i/h_i . Nessa situação, a dinâmica replicadora (12) transforma diferenças em crescimento líquido em realocação cumulativa de participação, produzindo concentração endógena. Essa concentração não precisa ser atribuída a “produtividade exógena superior”; sob as condições caracterizadas por (15) e para níveis suficientemente elevados de D , ela pode emergir como resultado da seleção endógena de firmas capazes de operar sob alta interdependência, isto é, firmas que sustentam x_i relativamente baixo. Essa é uma microfundamentação alternativa para a coexistência observada de ganhos agregados, dispersão persistente e concentração (Autor et al., 2020; OECD, 2021), e também ajuda a interpretar por que políticas focadas apenas em reduzir custos de adoção ou ampliar acesso podem falhar em produzir convergência: se o gargalo relevante é coordenação sob interdependência, reduzir custo de adoção sem elevar capacidade de coordenação pode simplesmente deslocar a economia para um regime de maior D , maior $I(D)$ e, portanto, maior pressão seletiva, amplificando heterogeneidade estrutural ao invés de reduzi-la setorialmente.



Esse mesmo mecanismo também esclarece por que a relação entre digitalização e desempenho tende a ser não linear e, em muitos contextos, ambígua no nível microeconômico. Um aumento marginal em D eleva o componente potencial ρD^ω , mas também intensifica o termo congestivo associado à sobrecarga de coordenação; o efeito líquido depende, portanto, da capacidade organizacional x_i da firma. Em termos econômicos, a intensificação digital pode gerar ganhos líquidos para firmas cuja estrutura de coordenação acompanha o crescimento da interdependência decisória, enquanto, para outras, o mesmo processo comprime o desempenho, à medida que os custos organizacionais passam a dominar os retornos tecnológicos. Essa ambiguidade não constitui uma anomalia, mas uma restrição teórica coerente com os fatos estilizados da transformação digital: defasagens de implementação, retornos condicionais e ampliação da dispersão de desempenho entre firmas. A interpretação é consistente com evidências empíricas que mostram que a adoção isolada de tecnologias digitais explica pouco da variação observada de produtividade, ao passo que medidas de integração organizacional, qualidade gerencial e governança de dados exibem poder explicativo substancialmente maior.

De modo análogo, a associação entre digitalização e maior concentração produtiva em setores intensivos em plataformas e dados pode ser interpretada como a manifestação de um processo de seleção por coordenação relativa, no qual firmas capazes de internalizar os custos organizacionais da interdependência ampliam sua vantagem competitiva ao longo do tempo. Em síntese, ao tratar a transformação digital como crescimento endógeno da interdependência decisória e ao modelar coordenação como capacidade distinta sujeita a congestionamento e aprendizagem, esta seção estabelece o núcleo analítico que permite conectar, em um único arcabouço, complementaridades e defasagens, heterogeneidade persistente e concentração endógena. A formalização não é um “manual” de economia no sentido tradicional, porque cada variável foi introduzida como tradução disciplinada de uma tese ontológica: no regime digital, o problema econômico central desloca-se para a coordenação sob interdependência. Com isso, o modelo torna inteligível porque tecnologias amplamente difusíveis podem



coexistir com divergência persistente e porque, sob certas condições, a intensificação digital aumenta a força seletiva que reconfigura a estrutura de mercado, bem como o desempenho econômico industrial.

5. Conclusão

Este artigo propôs uma reinterpretação teórica da transformação digital baseada em um objeto econômico específico e ainda insuficientemente formalizado na literatura: o crescimento endógeno da interdependência decisória induzida pela digitalização e o descompasso entre a expansão dessa interdependência e a capacidade organizacional de oferecer coordenação. Ao deslocar o foco de uma leitura do digital como mero fator produtivo para uma leitura do digital como reconfiguração da topologia decisória, o modelo ofereceu um mecanismo unificado capaz de racionalizar três regularidades empíricas recorrentes: retornos condicionais e defasados, heterogeneidade persistente e tendência à concentração com emergência de firmas dominantes.

O ponto central da explicação está na explicitação de um estado econômico que governa o desempenho relativo no regime digital: a razão entre escala produtiva e coordenação organizacional. Quando a interdependência cresce com a intensidade digital e os custos de consistência organizacional aumentam convexamente com essa interdependência relativa, diferenças aparentemente pequenas em coordenação tornam-se decisivas, e o processo competitivo passa a operar como um mecanismo de seleção cumulativa que realoca atividade econômica na direção do subconjunto de firmas capaz de sustentar coordenação proporcional à escala sob alta integração. Do ponto de vista da economia industrial, a implicação principal é que a transformação digital não deve ser interpretada apenas como mudança técnica que reduz custos marginais ou amplia eficiência informacional, mas como uma mudança na tecnologia de coordenação e governança que altera a forma de competição por um canal distinto do usual.



Em regimes de intensidade digital elevada, a coordenação pode tornar-se o fator limitante do crescimento e, sob condições estruturais explícitas, a fonte de uma força seletiva que amplifica diferenças e reorganiza a estrutura de mercado. A condição de regime identificada no modelo, que compara a velocidade com que a interdependência cresce com a intensidade digital e a escala de convexidade dos custos de coordenação com a escala do ganho potencial associado à digitalização, delimita quando a economia tende a transitar para um ambiente no qual o gargalo relevante deixa de ser o acesso a tecnologia e passa a ser a capacidade de operar sob interdependência. Nessa leitura, plataformas, integração de cadeias, interoperabilidade e governança de dados aparecem não apenas como escolhas tecnológicas, mas como barreiras dinâmicas associadas à capacidade organizacional de gerir acoplamentos decisórios, com efeitos endógenos sobre persistência de liderança, concentração e dispersão de desempenho.

Para política industrial e de inovação, o resultado é igualmente direto: difusão tecnológica por si só não garante convergência. Se a transformação digital opera como aumento de interdependência decisória, políticas centradas exclusivamente em adoção tendem a falhar porque não atacam o gargalo central, que é a capacidade de coordenação organizacional. No modelo, esse gargalo está representado pela acumulação de $h_i(t)$ e por sua complementaridade com a base produtiva $c_i(t)$. Isso sugere que políticas digitais eficazes devem ser concebidas como políticas de capacidade, orientadas a ampliar competências de integração e governança de dados, difundir práticas gerenciais e padrões de interoperabilidade e reduzir custos convexos de coordenação por meio de infraestrutura institucional de segurança, compliance e padronização. Em economias emergentes, a implicação é particularmente relevante: tentar acelerar o desenvolvimento apenas por meio de digitalização, sem base produtiva e capacidade de coordenação correspondentes, pode deslocar firmas e setores para regimes de sobrecarga organizacional, intensificando divergência e seleção, em vez de produzir ganhos distribuídos.



Uma contribuição adicional do artigo é oferecer um conjunto de implicações empiricamente exploráveis que decorrem diretamente da estrutura do mecanismo. Em primeiro lugar, a mensuração da transformação digital deve distinguir intensidade sistêmica de digitalização do objeto interdependência decisória, evitando proxies que reduzam o fenômeno à adoção binária de ferramentas. A leitura proposta aponta para medidas que capturem integração e interconexão de processos, interoperabilidade e densidade de interfaces ao longo da firma e da cadeia. Em segundo lugar, o modelo exige que o canal de coordenação seja medido de forma direta, por indicadores de qualidade gerencial, maturidade de processos, governança de dados, segurança, padronização e capital organizacional. Em terceiro lugar, a identificação empírica deve ser alinhada ao caráter não linear do mecanismo: efeitos médios tendem a mascarar o fato de que aumentos em intensidade digital podem elevar desempenho para firmas com baixa razão c_i/h_i e reduzir desempenho para firmas com alta razão c_i/h_i , ao mesmo tempo em que aumentam dispersão e aceleram realocação de participação de mercado. Assim, desenhos empíricos baseados em heterogeneidade condicional, regimes e limiares são mais apropriados do que estimativas de efeito médio. Esse conjunto de implicações também fornece uma leitura estrutural para evidências de concentração: aumentos em concentração e na participação de líderes podem ser interpretados como manifestações de um regime em que o termo congestivo domina e seleciona firmas com maior capacidade de coordenação relativa.

As limitações do modelo delimitam seu escopo e apontam extensões naturais. Primeiro, a tecnologia produtiva foi propositalmente simples e o ambiente abstrai de demanda, formação endógena de preços, markups e conduta oligopolista; a estrutura de mercado emerge como resultado de seleção dinâmica e de congestionamento organizacional, não como equilíbrio estratégico. Uma extensão direta consiste em incorporar competição imperfeita e um lado de demanda, para avaliar como coordenação congestionada interage com diferenciação, estratégias de plataforma e dinâmica de markups. Segundo, parte da análise tratou a intensidade digital sistêmica como um regime elevado aproximadamente



constante para obter resultados limpos sobre seleção e concentração; endogenizar $D(t)$ por investimento, infraestrutura e difusão institucional permitiria estudar transições, trajetórias e efeitos de políticas sobre a dinâmica de digitalização e sobre os limiares que ativam regimes de maior força seletiva. Terceiro, embora a heterogeneidade relevante seja endógena via $h_i(t)$ e via seleção, o modelo não incorpora explicitamente entrada e saída, reestruturação interna de firmas, redes de fornecedores e mecanismos específicos de dominância associados a dados e efeitos de rede. Essas extensões são particularmente importantes para aproximar o mecanismo de objetos observáveis de mercado e para viabilizar estimação quantitativa em ambientes com dinâmica de firmas e dados.

Por fim, interdependência decisória é um objeto de mensuração intrinsecamente desafiador, e esse é um limite conceitual que precisa ser reconhecido. A contribuição do artigo, contudo, é fornecer disciplina para orientar essa mensuração: o que importa empiricamente não é apenas a presença de tecnologia, mas o grau em que decisões e processos tornam-se interligados e a capacidade organizacional de governar essas interdependências. Ao formalizar a digitalização como crescimento de interdependência sob coordenação congestionada, o artigo estabelece uma base teórica mínima, porém estruturalmente nova, para compreender por que a transformação digital pode produzir simultaneamente ganhos e divergência. A agenda de pesquisa que se abre é clara: construir medidas de interdependência e coordenação comparáveis ao longo do tempo e entre setores, testar previsões de não linearidade e seleção por regimes, e integrar o mecanismo a estruturas mais ricas de competição, dados, redes e dinâmica de firmas, de modo a aproximar a teoria das regularidades observadas e das necessidades de avaliação de políticas em economias em transformação, fortemente baseadas em automação e digitalização.

REFERÊNCIAS



ACEMOGLU, Daron. *Introduction to modern economic growth*. Princeton: Princeton University Press, 2009.

ACEMOGLU, Daron; RESTREPO, Pascual. Automation and new tasks: how technology displaces and reinstates labor. *Journal of Economic Perspectives*, v. 33, n. 2, p. 3–30, 2019.

ACEMOGLU, Daron; RESTREPO, Pascual. Robots and jobs: evidence from US labor markets. *American Economic Review*, 2020.

AGHION, Philippe; HOWITT, Peter. A model of growth through creative destruction. *Econometrica*, 1992.

AGHION, Philippe et al. *Competition and growth: reconciling theory and evidence*. Cambridge: MIT Press, 2005.

AGRAWAL, Ajay; GANS, Joshua; GOLDFARB, Avi. *Prediction machines: the simple economics of artificial intelligence*. Boston: Harvard Business Review Press, 2019.

ANDREWS, Dan; CRISCUOLO, Chiara; GAL, Peter N. The best versus the rest: the global productivity slowdown, divergence across firms and the role of public policy. Paris: OECD, 2016.

AUTOR, David et al. The fall of the labor share and the rise of superstar firms. *The Quarterly Journal of Economics*, v. 135, n. 2, p. 645–709, 2020.

BETTIOL, Marco et al. Is this time different? How Industry 4.0 affects firms' labor productivity. *Small Business Economics*, v. 62, n. 4, p. 1449-1467, 2024.

BLICHFELDT, Bodil Stilling; FAULLANT, Rita. Performance effects of digital technology adoption and product & service innovation – the role of technological turbulence. *Technovation*, v. 105, 2021.

BRESNAHAN, Timothy F.; TRAJTENBERG, Manuel. General purpose technologies: “Engines of growth”? *Journal of Econometrics*, v. 65, n. 1, p. 83–108, 1995. DOI:



BRYNJOLFSSON, Erik; HITT, Lorin M. Beyond computation: information technology, organizational transformation and business performance. *Journal of Economic Perspectives*, v. 14, n. 4, p. 23–48, 2000.

BRYNJOLFSSON, Erik; HITT, Lorin M. Computing productivity: firm-level evidence. *The Review of Economics and Statistics*, v. 85, n. 4, 2003.

BRYNJOLFSSON, Erik; HITT, Lorin M.; YANG, Shinkyu. Intangible assets: computers and organizational capital. 2002.

BRYNJOLFSSON, Erik; ROCK, Daniel; SYVERSON, Chad. **Artificial intelligence and the modern productivity paradox: A clash of expectations and statistics**. National Bureau of Economic Research, 2017.

BRYNJOLFSSON, Erik; ROCK, Daniel; SYVERSON, Chad. The productivity J-curve: How intangibles complement general purpose technologies. **American Economic Journal: Macroeconomics**, v. 13, n. 1, p. 333-372, 2021.

COHEN, Wesley M.; LEVINTHAL, Daniel A. Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, v. 35, n. 1, p. 128–152, 1990.

DOSI, Giovanni. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, v. 11, n. 3, p. 147–162, 1982.

HIDALGO, César A.; HAUSMANN, Ricardo. The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, v. 106, n. 26, p. 10570–10575, 2009.

KALDOR, Nicholas. *Causes of the slow rate of economic growth of the United Kingdom*. Cambridge: Cambridge University Press, 1966.

LALL, Sanjaya. Technological capabilities and industrialization. **World development**, v. 20, n. 2, p. 165-186, 1992.



LAMPERTI, Fabio; LAVORATORI, Katiuscia; CASTELLANI, Davide. The unequal implications of Industry 4.0 adoption: evidence on productivity growth and convergence across Europe. **Economics of Innovation and New Technology**, v. 33, n. 8, p. 1051-1075, 2024.

LI, S., GAOA, L., HANB, C., GUPTAC, B., ALHALABID, W., Almakdie, S., Exploring the effect of digital transformation on Firms' innovation performance. **Journal of Innovation & Knowledge**, 8, 2023.

LUCAS JR., Robert E. On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, v. 22, n. 1, p. 3–42, 1988. DOI: 10.1016/0304-3932(88)90168-7.

NELSON, Richard R.; WINTER, Sidney G. *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge: Harvard University Press, 1982. Sem DOI (livro).

OECD. *The future of productivity*. Paris: OECD Publishing, 2015. Sem DOI (relatório).

OECD. *SMEs Going Digital: Policy challenges and recommendations*. Paris: OECD Publishing, 2021.

PAVITT, Keith. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. *Research Policy*, 1984.

ROMER, Paul M. Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, v. 98, n. 5, p. S71–S102, 1990.

SHAPIRO, Carl; VARIAN, Hal R. *Information rules: a strategic guide to the network economy*. Boston: Harvard Business School Press, 1999.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. *Industrial Development Report 2020: industrializing in the digital age*. Vienna: UNIDO, 2019.

USAI, Andrea et al. Unveiling the impact of the adoption of digital technologies on innovation performance and its consequences for firm performance: an attention-based perspective. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 327–336, 2021.

ENEI 2026

sergipe

**X ENCONTRO
NACIONAL DE
ECONOMIA
INDUSTRIAL E
INOVAÇÃO**

Indústria, Sustentabilidade e os
Desafios Regionais



**19-22
MAIO DE 2026**



LOCAL: Universidade Federal
de Sergipe. Avenida Marcelo
Chagas, s/n. Jardim Rosa Elze.
São Cristóvão (SE).

Realização: **ABEIN**

Associação Brasileira de
Economia Industrial e Inovação



PPGE

Programa de Pós-Graduação em
Economia

PROPGE

Programa de Pós-Graduação em
Estatística

PROPEC

Programa de Pós-Graduação em
Econometria

Patrocínio: **CNPq**