

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**

Instituição Brasileira de
Economia Industrial e Inovação



PPGE



Patrocínio:



Inteligência Artificial na ultrassonografia mamária: uma simulação econômica para o SUS do Estado de São Paulo

Maria Angélica Dedoné Gonçalves¹

Resumo: A transformação digital impulsionada pela inteligência artificial (IA) tem promovido mudanças significativas na organização de diferentes setores econômicos, incluindo os serviços públicos essenciais. No setor de saúde, a aplicação de modelos de aprendizado de máquina em diagnóstico por imagem desponta como uma das áreas mais promissoras dessa nova etapa de difusão tecnológica. No caso do câncer de mama - a neoplasia mais incidente entre mulheres no Brasil - atrasos no diagnóstico estão associados tanto a maiores taxas de mortalidade quanto a custos significativamente mais elevados para os sistemas de saúde, uma vez que o tratamento em estágios avançados demanda terapias mais complexas e prolongadas (INCA, 2024; Observatório de Oncologia, 2024). Nesse contexto, tecnologias de inteligência artificial vêm sendo desenvolvidas para apoiar a interpretação de exames de imagem, ampliando a capacidade diagnóstica e reduzindo a ocorrência de resultados falso-positivos e de procedimentos diagnósticos invasivos desnecessários. Entre essas aplicações, destacam-se os sistemas de IA voltados à análise de ultrassonografia mamária, exame amplamente utilizado como método complementar ao rastreamento por mamografia, especialmente em casos de mamas densas ou quando os resultados do exame inicial apresentam achados inconclusivos. Ao auxiliar na classificação de lesões e na padronização das categorias diagnósticas - como o sistema BI-RADS - essas ferramentas podem contribuir para maior precisão na avaliação clínica, reduzindo encaminhamentos desnecessários para procedimentos invasivos, como biópsias. Este artigo investiga o potencial impacto econômico da adoção de sistemas de inteligência artificial aplicados à interpretação de ultrassonografias mamárias no Sistema Único de Saúde (SUS), com foco no Estado de São Paulo. O problema de pesquisa que orienta o estudo é: qual é o potencial de redução de custos para o SUS paulista decorrente da implementação de sistemas de inteligência artificial na interpretação de ultrassonografias mamárias, considerando a distribuição atual dos estadiamentos do câncer de mama e os custos associados ao tratamento em cada estágio da doença? Metodologicamente, o estudo adota uma abordagem quantitativa baseada em simulação econômica

¹ Filiação Institucional: mestranda no Programa de Economia da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), campus Araraquara/Fclar. E-mail: ma.goncalves@unesp.br

contrafactual, comparando dois cenários: (i) o cenário base, que representa o fluxo diagnóstico atual do SUS, e (ii) um cenário alternativo que incorpora o uso de sistemas de inteligência artificial como ferramenta de apoio à interpretação da ultrassonografia mamária. A estimativa do número potencial de casos parte da população feminina na faixa etária de risco no Estado de São Paulo, utilizando dados do IBGE (Censo 2022), aos quais se aplicam as taxas de incidência de câncer de mama divulgadas pelo Instituto Nacional de Câncer (INCA, 2024). Considera-se que lesões suspeitas identificadas nos exames diagnósticos podem resultar em encaminhamento para biópsia, procedimento padrão para confirmação diagnóstica. Nesse sentido, a variável biópsia torna-se central na simulação, uma vez que melhorias na acurácia diagnóstica podem reduzir procedimentos invasivos desnecessários. Os custos médios de tratamento por estadiamento foram obtidos a partir de dados do Observatório de Oncologia (2024) e de registros do SIGTAP/DATASUS. A simulação foi implementada na linguagem R, permitindo transparência metodológica e replicabilidade dos resultados. Os resultados indicam que a incorporação de sistemas de IA no suporte diagnóstico da ultrassonografia mamária pode reduzir a ocorrência de procedimentos diagnósticos desnecessários e favorecer a detecção mais precoce da doença. Esses efeitos têm potencial para gerar economias relevantes para o sistema público de saúde, ao reduzir a incidência de tratamentos em estágios avançados, caracterizados por maior complexidade terapêutica e maiores custos. Os achados sugerem que a adoção de tecnologias de inteligência artificial no fluxo diagnóstico do câncer de mama pode contribuir para aumentar a eficiência alocativa do SUS, oferecendo subsídios para o debate sobre inovação tecnológica, sustentabilidade financeira e modernização dos sistemas públicos de saúde.

Palavras-chave: Inteligência artificial; câncer de mama, inovação tecnológica, economia; SUS-SP.

Código JEL: I18; O33; H51

Área Temática: 6. Políticas públicas e regulação, com subtópico em 6.2 Políticas de Ciência, Tecnologia e Inovação.

Artificial Intelligence in breast ultrasound: an economic simulation for the Brazilian Public Health System (SUS) in the State of São Paulo.

Abstract: The digital transformation driven by artificial intelligence (AI) has significantly reshaped the organization of several economic sectors, including essential public services. In the healthcare sector, the application of machine learning models to medical imaging has emerged as one of the most promising areas of this new technological wave. In the case of breast cancer - the most common cancer among women in Brazil - delays in diagnosis are associated with both higher mortality rates and substantially higher healthcare costs, since treatments in advanced stages require more complex and prolonged therapies (INCA, 2024; Observatório de Oncologia, 2024). In this context, artificial intelligence technologies have been increasingly developed to support the interpretation of imaging exams, enhancing diagnostic capacity while reducing false-positive results and unnecessary invasive procedures. Among these applications, AI systems designed for breast ultrasound analysis have gained particular attention. Breast ultrasound is frequently used as a complementary diagnostic method following mammography screening, especially in cases involving dense breast tissue or inconclusive findings. By assisting in lesion classification and standardizing diagnostic categories - such as those defined by the BI-RADS system - AI tools may improve diagnostic accuracy and reduce unnecessary referrals to invasive procedures such as biopsies. This article investigates the potential economic impact of adopting artificial intelligence systems for breast ultrasound interpretation within Brazil's Unified Health System (SUS), focusing on the State of São Paulo. The research question guiding this study is: what is the potential cost reduction for the São Paulo public health system resulting from the implementation of AI systems in breast ultrasound interpretation, considering the current distribution of breast cancer stages and the treatment costs associated with each stage of the disease? Methodologically, the study adopts a counterfactual economic simulation approach,

comparing two scenarios: (i) a baseline scenario representing the current diagnostic workflow of the SUS, and (ii) an alternative scenario incorporating AI systems as decision-support tools for breast ultrasound interpretation. The estimated number of potential cases is derived from the female population in the relevant age group in the State of São Paulo using data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE, 2022 Census), combined with breast cancer incidence rates reported by the National Cancer Institute (INCA, 2024). In this framework, suspicious findings detected in diagnostic imaging may lead to biopsy referrals, which represent the standard procedure for diagnostic confirmation. Therefore, the biopsy variable plays a central role in the simulation, as improvements in diagnostic accuracy may reduce unnecessary invasive procedures. Treatment costs by cancer stage were obtained from the Observatório de Oncologia (2024) and from the SIGTAP/DATASUS database. The simulation was implemented in the R programming language, ensuring methodological transparency and replicability. The results suggest that the adoption of AI-based decision support in breast ultrasound diagnostics can reduce unnecessary diagnostic procedures and contribute to earlier detection of the disease. These effects may generate relevant cost savings for the public healthcare system by reducing the incidence of advanced-stage treatments, which are associated with higher therapeutic complexity and greater costs. Overall, the findings indicate that the incorporation of artificial intelligence technologies into the breast cancer diagnostic pathway may improve the allocative efficiency of the Brazilian public health system, contributing to ongoing debates on technological innovation, fiscal sustainability, and modernization of public healthcare services.

Keywords: Artificial intelligence; breast cancer; technological innovation; health economics; SUS-SP.

1. Introdução

A literatura neo-schumpeteriana oferece arcabouço fundamental para compreender as transformações tecnológicas contemporâneas e seus impactos sobre o desenvolvimento econômico. A retomada do pensamento de Joseph Schumpeter, a partir do final do século XX, está associada à difusão das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), que marcou uma nova revolução tecnológica baseada em informação e conhecimento, em contraste com o paradigma fordista intensivo em energia e materiais (Tigre, 2014).

Nesse contexto, a dinâmica de inovação passa a ser entendida como processo histórico, cumulativo e descontínuo, caracterizado por ondas de destruição criadora que reorganizam estruturas produtivas, organizacionais e institucionais. A teoria econômica evolucionista ou neo-schumpeteriana tem origem nesse esforço de compreender o caráter dinâmico e institucionalmente condicionado da inovação, rejeitando a noção de equilíbrio estático e reconhecendo trajetórias tecnológicas específicas e dependentes do contexto histórico e institucional (Tigre, 2014).

Nesse debate, ganha centralidade o conceito de Sistema Nacional de Inovação (SNI), que destaca que o desempenho inovativo de um país depende da articulação entre empresas, universidades, instituições de pesquisa, governo e sistema financeiro. É nesse quadro analítico que se insere a discussão da Inteligência Artificial, compreendida como tecnologia de uso geral² associada à mais recente onda de transformação tecnológica, com impactos transversais sobre diversos setores, incluindo a saúde.

A teoria das ondas longas de desenvolvimento, formulada originalmente por Nikolai Kondratieff e reinterpretada por Schumpeter e Freeman, busca explicar a evolução do capitalismo por meio de grandes ciclos tecnológicos de cinco a seis décadas, associados a paradigmas tecnoeconômicos específicos. Nos últimos anos, diversos autores têm discutido a possibilidade de o capitalismo estar atravessando uma sexta onda longa de desenvolvimento, marcada pela convergência entre computação, redes digitais, internet e inteligência artificial. De acordo com Albuquerque (2021³), a invenção da World Wide Web (WWW) em 1991 pode ser considerada o marco inicial dessa nova fase, resultado da maturação dos sistemas de inovação das economias centrais.

Essa interpretação está alinhada à abordagem evolucionária da inovação, segundo a qual grandes transformações tecnológicas não resultam de descobertas isoladas, mas de sistemas complexos formados por múltiplos atores. Organismos internacionais como OCDE (2016) e UNCTAD (2021) associam o crescimento da economia digital à emergência de novos modelos produtivos baseados em dados e automação. Nesse contexto, a inteligência artificial destaca-se como tecnologia central, tanto por sua capacidade de aprender a partir de grandes volumes de dados quanto por sua aplicação em áreas estratégicas como a saúde.

² Uma tecnologia de uso geral – General Purpose Technology (GPT) é uma tecnologia capaz de gerar transformações profundas e amplas em vários setores da economia, influenciando aspectos como produtividade, processos, formas de organização e outros padrões já estabelecidos. Exemplos clássicos de GPTs são a máquina a vapor, a eletricidade, a microeletrônica e mais recentemente, a inteligência artificial. A característica central de uma GPT é a sua aplicabilidade transversal, ou seja, ela não se restringe a um setor específico, mas se difunde por toda a estrutura econômica. Fonte: BRESNAHAN, Timothy; TRAJTENBERG, Manuel. General Purpose Technologies “Engines of Growth”? *Journal of Econometrics*, v. 65, n. 1, p. 83–108, 1995.

³ Professor da UFMG, Eduardo de Motta e Albuquerque em sua obra recente argumenta que a invenção e difusão do World Wide Web em 1991 marca o início de uma possível sexta onda longa de desenvolvimento, caracterizada pela convergência entre a computação, redes digitais, internet, big data e inteligência artificial. O autor interpreta esse momento como um novo big bang tecnológico, sendo resultado de sistemas de inovações de países centrais consolidados. Fonte: ALBUQUERQUE, Eduardo da Motta e Silva. *Transformações Tecnológicas e Sistemas de Inovação*. 2021.

À luz desse cenário, torna-se fundamental compreender como o setor público - em especial o Sistema Único de Saúde (SUS) - pode se inserir nessa nova dinâmica tecnológica. Dado o contexto do artigo, torna-se fundamental delimitar conceitualmente a inteligência artificial e suas principais características.

1.1 Inteligência Artificial e aplicações na saúde

A Inteligência Artificial (IA) pode ser definida como um campo da ciência da computação voltado ao desenvolvimento de sistemas capazes de realizar tarefas que normalmente exigiriam inteligência humana, como aprender, reconhecer padrões, tomar decisões e resolver problemas. Segundo *Russell e Norvig* (2010), a IA é uma área interdisciplinar que combina conhecimentos da matemática, estatística, engenharia e ciências cognitivas. As origens desse campo remontam aos trabalhos de *Alan Turing*, que, em 1950, levantou a questão sobre a possibilidade de máquinas pensarem, e à Conferência de *Dartmouth*, em 1956, considerada o marco inicial da IA como área científica.

Ao longo de sua evolução, a IA passou por diferentes abordagens teóricas, destacando-se, mais recentemente, os métodos baseados em aprendizado de máquina (*machine learning*). Esses métodos permitem que algoritmos aprendam padrões a partir de dados, sem a necessidade de regras previamente programadas. Dentro desse conjunto, o *deep learning* representa um avanço importante, ao utilizar redes neurais profundas capazes de processar grandes volumes de informações complexas, como imagens, com elevado nível de precisão.

A literatura internacional tem demonstrado que a aplicação da IA vem transformando significativamente o setor da saúde. Estudos de referência, como o de *McKinney et al.*⁴ (2020), publicado na *Nature*, mostram que modelos de *deep learning* aplicados à análise de mamografias podem alcançar desempenho semelhante - e, em alguns casos, superior - ao de radiologistas humanos, reduzindo a ocorrência de falsos positivos e falsos negativos. Resultados semelhantes foram observados por *Esteve et al.* (2017)⁵, que utilizaram redes neurais profundas para classificar câncer de pele com precisão comparável à de dermatologistas experientes. Esses estudos evidenciam o potencial da IA como ferramenta de apoio ao diagnóstico, especialmente em tarefas baseadas na interpretação de imagens médicas.

No contexto brasileiro, também há evidências relevantes sobre o uso da IA na saúde. A pesquisa desenvolvida na Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (FMRP-USP) por Buzatto et al. (2024) demonstrou que um modelo de aprendizado de máquina aplicado a ultrassonografia mamária foi capaz de evitar aproximadamente 60,4% das biópsias em lesões benignas, com perda inferior a 1% dos casos de câncer. Esses resultados indicam elevada sensibilidade e especificidade do modelo, reforçando sua viabilidade como ferramenta de apoio à decisão clínica.

Do ponto de vista econômico e institucional, a redução de biópsias desnecessárias implica diminuição de custos diretos, menor sobrecarga dos serviços especializados e redução de procedimentos invasivos para as pacientes. Em sistemas públicos de saúde, como o Sistema Único de Saúde (SUS), esses ganhos podem se traduzir em maior eficiência na alocação de recursos, redução de filas e melhor aproveitamento da infraestrutura diagnóstica disponível. Além disso, o estudo brasileiro destaca a importância de modelos de IA treinados com dados compatíveis com a realidade local, fortalecendo a integração entre inovação tecnológica, economia da saúde e políticas públicas.

⁴ O estudo de McKinney et al. (2020), publicado na revista *Nature*, aplicou modelos de *deep learning* para a leitura automatizada de mamografias em bases do Reino Unido e Estados Unidos. Os resultados mostraram que a IA atingiu desempenho igual ou superior a de radiologistas.

⁵ Os autores treinaram redes neurais profundas para classificar câncer de pele. A IA exibiu precisão equivalente à de dermatologistas experientes, evidenciando que algoritmos podem realizar tarefas complexas de diagnóstico visual.

A incorporação de tecnologias de inteligência artificial no diagnóstico médico pode ser analisada também à luz da literatura sobre o Complexo Econômico-Industrial da Saúde (CEIS). Esse conceito destaca que o setor saúde constitui um sistema produtivo amplo, que articula atividades industriais, tecnológicas e de prestação de serviços, desempenhando papel estratégico no desenvolvimento econômico e social. Conforme argumenta Carlos Gadelha, o CEIS engloba diferentes segmentos produtivos - como a indústria farmacêutica, a produção de equipamentos médicos e os serviços de saúde - que interagem por meio de fluxos de conhecimento, inovação e demanda institucional.

Nesse arranjo, o Sistema Único de Saúde (SUS) assume papel central não apenas como provedor de assistência, mas também como indutor de inovação tecnológica, uma vez que sua escala e capacidade de compra podem estimular o desenvolvimento de novas soluções produtivas e organizacionais. Essa perspectiva dialoga com a abordagem dos Sistemas Nacionais de Inovação, discutida por autores como José Eduardo Cassiolato e Renato Garcia, que enfatizam a importância das interações entre instituições públicas, universidades e empresas para a geração e difusão de conhecimento tecnológico.

Além disso, como argumenta Esther Dweck, políticas públicas orientadas à inovação podem contribuir para processos de transformação estrutural e fortalecimento da capacidade produtiva nacional, especialmente em setores intensivos em conhecimento, como o complexo da saúde. Nesse contexto, tecnologias digitais como sistemas de inteligência artificial aplicados ao diagnóstico médico representam não apenas avanços clínicos, mas também oportunidades para o fortalecimento das capacidades tecnológicas e produtivas associadas ao sistema de saúde.

Diante das evidências apresentadas sobre o potencial da inteligência artificial como tecnologia de uso geral e de sua aplicação crescente no setor da saúde, torna-se relevante analisar de forma mais específica como essas inovações podem contribuir para enfrentar gargalos estruturais dos sistemas públicos de saúde. A incorporação de sistemas de inteligência artificial no diagnóstico por imagem, especialmente no suporte à interpretação de exames de ultrassonografia mamária, surge como uma alternativa promissora para reduzir gargalos históricos do diagnóstico do câncer de mama no SUS, além disso se configura como uma área caracterizada por alta demanda, custos crescentes e forte dependência de profissionais especializados, o que a torna particularmente sensível a ganhos de eficiência proporcionados por novas tecnologias (OCDE, 2021).

Estudos recentes - como o do Observatório de Oncologia: “O custo do tratamento do câncer de mama por paciente no SUS de 2024” - indicam que o custo do tratamento do câncer de mama no SUS cresce de forma expressiva conforme o avanço do estadiamento da doença, tornando o diagnóstico precoce não apenas uma questão clínica, mas também um problema econômico relevante. Nesse contexto, a incorporação de sistemas de inteligência artificial no suporte diagnóstico em ultrassonografia mamária surge como uma potencial estratégia para alterar a distribuição dos diagnósticos entre estágios iniciais e avançados, gerando economias indiretas ao sistema de saúde por meio da redução de tratamentos mais complexos e onerosos.

Além disso, o avanço recente das tecnologias de inteligência artificial aplicadas ao diagnóstico médico insere-se em um contexto mais amplo de transformação tecnológica nos sistemas de saúde. No caso do câncer de mama, uma das neoplasias de maior incidência entre mulheres no Brasil, novas ferramentas computacionais têm sido desenvolvidas para apoiar a interpretação de exames de imagem, contribuindo para maior precisão diagnóstica e potencial redução de custos associados a procedimentos desnecessários. Entre essas aplicações, destacam-se sistemas de aprendizado de máquina voltados à análise de ultrassonografia mamária, exame frequentemente utilizado como método complementar após o rastreamento inicial por mamografia.

Embora a mamografia seja o principal exame utilizado no rastreamento populacional do câncer de mama, a ultrassonografia desempenha papel complementar relevante no processo diagnóstico, especialmente em pacientes com mamas densas ou em situações nas quais a mamografia apresenta resultados inconclusivos. Nesse contexto, o uso de sistemas de inteligência artificial aplicados à ultrassonografia pode contribuir para aprimorar a interpretação das imagens e reduzir a necessidade de procedimentos invasivos.

Sob a perspectiva econômica, a incorporação dessas tecnologias não deve ser analisada apenas como uma inovação clínica, mas como parte de um processo mais amplo de transformação tecnológica no setor saúde. A difusão de sistemas digitais de diagnóstico envolve interações entre universidades, centros de pesquisa, empresas de tecnologia médica e instituições públicas de saúde, configurando um ambiente institucional típico dos sistemas nacionais de inovação. Nesse contexto, o Sistema Único de Saúde (SUS) desempenha papel central tanto na provisão de serviços quanto na indução da demanda por novas tecnologias médicas.

A análise do custo fiscal da inteligência artificial no diagnóstico do câncer de mama, portanto, dialoga diretamente com o debate sobre o Complexo Econômico-Industrial da Saúde (CEIS), que enfatiza a articulação entre inovação tecnológica, produção industrial e organização dos serviços de saúde. Ao avaliar os potenciais efeitos da adoção de sistemas de IA na interpretação de ultrassonografias mamárias no SUS do Estado de São Paulo, este artigo busca contribuir para a compreensão de como tecnologias digitais podem ampliar a eficiência do sistema público de saúde e, ao mesmo tempo, integrar-se à dinâmica de inovação do setor saúde no Brasil.

1.2 Inovação tecnológica e o Complexo Econômico-Industrial da Saúde

A análise da incorporação de tecnologias de inteligência artificial no sistema de saúde também pode ser analisada à luz do conceito de Complexo Econômico-Industrial da Saúde (CEIS). Essa abordagem, desenvolvida por Carlos Gadelha, concebe o setor saúde não apenas como prestação de serviços assistenciais, mas como um sistema produtivo amplo que articula indústria farmacêutica, produção de equipamentos médicos, serviços de saúde e atividades de pesquisa e inovação. Nesse arranjo, o Sistema Único de Saúde (SUS) exerce papel estratégico como indutor de demanda tecnológica, influenciando o desenvolvimento de novas soluções produtivas e organizacionais.

Nessa perspectiva, a difusão de tecnologias digitais, como sistemas de IA aplicados ao diagnóstico médico, representa não apenas uma inovação clínica, mas um processo de transformação estrutural do sistema de saúde, com impactos tanto na organização da assistência quanto na dinâmica produtiva do setor. Essa abordagem dialoga com a literatura sobre Sistemas Nacionais de Inovação (Cassiolato; Garcia), que enfatiza o papel das instituições, políticas públicas e interações entre universidades, centros de pesquisa, empresas e o sistema público de saúde na geração e difusão de conhecimento tecnológico.

Como argumenta Esther Dweck, políticas públicas orientadas à inovação são fundamentais para promover transformações estruturais e ampliar a capacidade produtiva nacional em setores intensivos em conhecimento. Nesse contexto, o SUS pode atuar como plataforma institucional capaz de estimular o desenvolvimento e a difusão de tecnologias inovadoras.

No campo específico do diagnóstico do câncer de mama, a IA tem sido crescentemente aplicada à análise de exames de imagem, especialmente na ultrassonografia mamária. Algoritmos de aprendizado de máquina auxiliam na identificação e classificação de lesões, contribuindo para maior precisão diagnóstica, redução da variabilidade entre observadores e diminuição de procedimentos invasivos desnecessários. Em contextos de grande volume de exames ou escassez de especialistas, esses sistemas tornam-se ferramentas relevantes de apoio à decisão clínica, gerando não apenas ganhos clínicos, mas também impactos econômicos significativos para sistemas públicos de saúde.

2. Hipótese

Diante desse cenário, a hipótese deste artigo é: qual é o potencial custo fiscal da adoção de sistemas de inteligência artificial na análise de ultrassonografia mamária no Sistema Único de Saúde do Estado de São Paulo, considerando a redistribuição dos casos de câncer de mama entre diferentes estágios da doença? O objetivo do trabalho é estimar, a partir de dados secundários e de evidências da literatura, os efeitos da introdução da IA sobre os custos do tratamento do câncer de mama no SUS paulista, contribuindo para o debate sobre inovação tecnológica, eficiência alocativa e sustentabilidade do sistema público de saúde.

3. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem quantitativa baseada em simulação econômica contrafactual, com o objetivo de comparar dois cenários alternativos para o fluxo diagnóstico do câncer de mama no Sistema Único de Saúde (SUS) no Estado de São Paulo.

O primeiro corresponde ao cenário base, que representa a organização atual do sistema. Nesse contexto, a mamografia constitui o principal exame utilizado no rastreamento populacional do câncer de mama, enquanto a ultrassonografia mamária é estabelecida como exame complementar para investigação diagnóstica de lesões suspeitas. A interpretação das imagens é realizada exclusivamente por médicos radiologistas, sendo o processo diagnóstico integralmente dependente da avaliação clínica especializada.

O segundo corresponde ao cenário contrafactual com incorporação de inteligência artificial, no qual sistemas de aprendizado de máquina são utilizados como ferramentas de apoio à interpretação de exames de ultrassonografia mamária. Esses sistemas podem auxiliar na classificação de lesões, reduzir a incidência de falsos positivos e aumentar a precisão diagnóstica. Como consequência, espera-se a diminuição da realização de procedimentos invasivos desnecessários, como biópsias, além da redução da necessidade de exames complementares adicionais. Evidências recentes indicam que sistemas de inteligência artificial aplicados ao diagnóstico por imagem podem alcançar desempenho comparável ao de especialistas humanos em determinadas tarefas diagnósticas (Esteve et al., 2017; McKinney et al., 2020; Yap et al., 2018).

A partir da comparação entre esses dois cenários, o estudo estima o impacto potencial da incorporação da inteligência artificial sobre a estrutura de custos e sobre a organização do processo diagnóstico no SUS-SP.

Vale destacar que, a estimativa do número potencial de casos de câncer de mama utilizada na simulação foi construída a partir da combinação de dados populacionais e parâmetros epidemiológicos. Inicialmente, considerou-se o total de mulheres residentes no Estado de São Paulo na faixa etária elegível para rastreamento e investigação diagnóstica do câncer de mama. Em seguida, aplicou-se a taxa estimada de incidência da doença divulgada pelo Instituto Nacional de Câncer (INCA, 2024), obtendo-se uma aproximação do número esperado de casos na população analisada.

Parte-se do pressuposto clínico de que mulheres com suspeita diagnóstica relevante ou confirmação de lesões suspeitas em exames de imagem são encaminhadas para biópsia, procedimento considerado padrão para confirmação diagnóstica do câncer de mama. Dessa forma, o número estimado de casos potenciais também serve como aproximação do volume de biópsias necessárias no cenário sem utilização de inteligência artificial.

No cenário com incorporação de inteligência artificial no suporte diagnóstico em ultrassonografia mamária, assume-se que a maior precisão na classificação de lesões pode reduzir a ocorrência de falsos positivos, diminuindo o número de procedimentos invasivos desnecessários.

Assim, a variável “biópsia” torna-se central no modelo de simulação, uma vez que a redução desses procedimentos constitui um dos principais mecanismos por meio dos quais a inteligência artificial gera economia de recursos no sistema de saúde.

A simulação utiliza três conjuntos principais de dados: (1) Dados populacionais, obtidos a partir do Censo Demográfico do IBGE (2022), com foco na população feminina entre 40 e 69 anos residente no Estado de São Paulo; (2) Estimativas epidemiológicas, baseadas nas projeções de incidência do câncer de mama divulgadas pelo Instituto Nacional de Câncer (INCA, 2024); e, (3) Custos de tratamento por estadiamento, provenientes do Observatório de Oncologia (2024) e de valores de procedimentos disponíveis no SIGTAP/DATASUS.

A partir desses dados, estima-se o número esperado de casos de câncer de mama na população analisada, bem como sua distribuição por estadiamento clínico no momento do diagnóstico. Em seguida, são aplicados os custos médios de tratamento associados a cada estágio da doença, permitindo estimar o gasto total esperado do sistema de saúde no cenário base.

No cenário contrafactual, considera-se a incorporação de sistemas de inteligência artificial no suporte diagnóstico em ultrassonografia mamária. Nessa aplicação, os algoritmos atuam como ferramentas de apoio à interpretação das imagens, auxiliando na classificação de lesões e na padronização das categorias diagnósticas, como o sistema BI-RADS. Evidências empíricas indicam que esse tipo de tecnologia pode reduzir a ocorrência de falsos positivos e diminuir a realização de biópsias desnecessárias, contribuindo para maior eficiência no uso de recursos diagnósticos (Buzzato et al., 2024).

A simulação foi implementada na linguagem R, permitindo a construção de cenários contrafactuais e a estimativa da economia potencial associada à adoção da tecnologia no contexto do SUS-SP. Embora exploratória, essa abordagem permite discutir ordens de grandeza e possíveis impactos fiscais relacionados à incorporação de inteligência artificial no diagnóstico do câncer de mama no sistema público de saúde.

3.1 Modelo de inteligência artificial

O modelo de IA considerado neste estudo baseia-se nos resultados apresentados por Buzatto et al. (2024), que desenvolveram um sistema de aprendizado de máquina treinado com dados clínicos de pacientes brasileiras. Segundo os autores, o modelo foi capaz de reduzir em aproximadamente 60,4% o número de biópsias desnecessárias em lesões benignas, mantendo elevada sensibilidade e perdendo menos de 1% dos casos de câncer.

Esses resultados são utilizados como parâmetro empírico para a construção do cenário alternativo de simulação, representando uma aplicação realista e validada da inteligência artificial no contexto nacional.

3.2 População de referência e recorte territorial

A população de referência corresponde às mulheres residentes no Estado de São Paulo, estimadas em 23.014.862 em 2022 (IBGE). Para fins da simulação, consideram-se as faixas etárias de 40 a 64 anos, que concentram a maior incidência de câncer de mama e são priorizadas nas diretrizes de rastreamento (INCRA, 2024), totalizando aproximadamente 7,8 milhões de mulheres. A escolha do Estado de São Paulo se justifica pela disponibilidade de dados consolidados, pela concentração de serviços de diagnóstico e pela existência de capacidade institucional para absorção de tecnologias inovadoras no SUS.

3.3 Estrutura dos cenários de simulação

Para estimar o impacto econômico da IA, estruturaram-se dois cenários analíticos:

Cenário 1 - Sem IA (referência): mantém-se a distribuição observada dos diagnósticos por

estadiamento no SUS-SP, reproduzindo as limitações atuais do processo de rastreamento, incluindo atraso no laudo, sobrecarga da rede e restrições associadas à disponibilidade de radiologistas.

Cenário 2 - Com IA (contrafactual): assume-se uma melhora na detecção precoce decorrente da aplicação de modelos de IA. Os parâmetros utilizados para simular a redistribuição dos estadiamentos são derivados de evidências empíricas do estudo de Buzatto et al. (2024). A projeção econômica consiste em multiplicar o número estimado de casos anuais em cada estágio pelos respectivos custos médios por paciente, obtendo-se o custo agregado para cada cenário. A diferença entre os custos projetados representa a economia potencial decorrente da introdução da IA.

3.4 Dados de custos e projeção econômica

Os custos de tratamento do câncer de mama por estadiamento foram obtidos a partir de dados do Observatório de Oncologia e do SIGTAP/DATASUS, a nível Brasil. Para cada cenário, estima-se o custo total agregado do tratamento no Estado de São Paulo, considerando a distribuição dos casos por estágio da doença.

A diferença entre os custos estimados nos dois cenários é interpretada como o potencial ganho econômico associado à adoção da tecnologia de IA no SUS-SP. As simulações foram realizadas no *software* R, permitindo a construção de projeções agregadas e análise de sensibilidade.

A Tabela 1 apresenta a distribuição da população feminina do Estado de São Paulo nas faixas etárias mais relevantes para o rastreamento do câncer de mama, totalizando aproximadamente 7,8 milhões de mulheres entre 40 e 64 anos. Esse contingente evidencia a escala do desafio enfrentado pelo SUS-SP e justifica a análise de soluções tecnológicas capazes de ampliar a eficiência diagnóstica.

A Tabela 2 sintetiza os custos médios estimados do tratamento do câncer de mama por estadiamento no SUS, com base em dados do Observatório de Oncologia. Observa-se que o custo cresce de forma não linear à medida que o diagnóstico ocorre em estágios mais avançados, o que reforça a relevância econômica de estratégias que favoreçam a detecção precoce da doença.

Tabela 1- Distribuição da população feminina por faixa etária no Estado de São Paulo (2022)

Faixa etária (anos)	Número de mulheres	Percentual do total (%)
40 – 44	1.902.856	8,27
45 – 49	1.639.164	7,12
50 – 54	1.534.930	6,67
55 – 59	1.433.780	6,23
60 – 64	1.294.948	5,62
Total	7.805.678	33,9

Fonte: Elaboração própria, com base no IBGE (Censo demográfico de 2022)

Tabela 2 - Custo estimado de tratamento do câncer de mama por estadiamento⁶ no SUS (R\$)

⁶ O câncer de mama é classificado em quatro estágios (I a IV), de acordo com tamanho do tumor, comprometimento linfonodal e presença de metástases: estágio I: tumor pequeno, localizado, sem acometimento linfonodal significativo. Altas taxas de cura e tratamentos menos caros (cirurgia + hormonioterapia); estágio II: tumor maior ou com linfonodos axilares comprometidos. Tratamento inclui cirurgia, radioterapia e quimioterapia; estágio III: tumores localmente avançados, com múltiplos linfonodos acometidos. Necessita terapias combinadas e custos significativamente maiores; e, estágio IV: doença metastática, com comprometimento de outros órgãos. Tratamento é prolongado, complexos e muito mais caro. A evolução dos custos por estadiamento é não linear: o tratamento do estágio IV pode custar até 5 a 10 vezes mais do que o estágio I. Fonte: INCA – Instituto Nacional de Câncer. Diretrizes para detecção precoce do câncer de mama no Brasil. 2022

Estadiamento	Custo médio por paciente (R\$)
Estágio I	20.000 – 70.000
Estágio II	30.000 – 100.000
Estágio III	45.000 – 165.000
Estágio IV	130.000 – 350.000

Fonte: Elaboração própria, com base no Observatório de Oncologia (2024); SIGTAP/DATASUS.

A projeção econômica consiste em multiplicar o número estimado de casos anuais em cada estágio pelos respectivos custos médios por paciente, obtendo-se o custo agregado para cada cenário. A diferença entre os custos projetados representa a economia potencial decorrente da introdução da IA.

3.5 Modelagem econômica

O Quadro 1 sintetiza a estrutura de custo dos principais insumos envolvidos no processo de rastreamento e diagnóstico do câncer de mama no Sistema Único de Saúde (SUS), comparando o cenário atual, sem uso de inteligência artificial, com o cenário alternativo, em que sistemas de IA auxiliam na ultrassonografia mamária. As porcentagens apresentadas representam uma distribuição proporcional dos componentes de custo, construída a partir de evidências da literatura internacional e nacional, sobretudo *McKinney et al. (2020)*, *Esteve et al. (2017)* e *Buzatto et al. (2024)*, que demonstram os efeitos da IA sobre a redução de biópsias, diminuição de exames complementares e redistribuição da carga de trabalho médico.

Quadro 1- Estrutura dos insumos para a projeção de custo do SUS-SP

Categoria do insumo	Sem IA (%)	Com IA (%)	Base conceitual
Trabalho médico (interpretação diagnóstica)	30	24	IA reduz variabilidade diagnóstica e auxilia a interpretação de exames. Fonte: Topol (2019).
Biópsias	30	12	Redução de biópsias desnecessárias por melhoria da classificação de lesões. Fonte: Buzatto et al. (2024).
Exames complementares adicionais	20	14	Melhor precisão diagnóstica reduz repetição de exames.
Infraestrutura digital (software, PACS, armazenamento, IA)	10	25	Implementação de IA exige governança de dados, interoperabilidade e infraestrutura digital. Fonte: Cetic.br (2024); OECD (2021).
Custos operacionais e administrativos	10	25	Custos associados à manutenção tecnológica e reorganização dos fluxos de trabalho.
Total	100%	100%	

A adoção de sistemas de inteligência artificial no setor de saúde depende da existência de infraestrutura digital adequada, incluindo interoperabilidade entre sistemas de informação, governança de dados e capacidade de processamento computacional. Estudos recentes indicam que a difusão dessas tecnologias ainda é limitada no Brasil, estando presente em uma pequena parcela dos estabelecimentos de saúde, o que evidencia tanto os desafios quanto o potencial de expansão dessas soluções no sistema público de saúde (Cetic.br, 2024).

A necessidade de infraestrutura digital para a adoção de IA em saúde também dialoga com a perspectiva do Complexo Econômico-Industrial da Saúde (CEIS), que destaca o papel da base tecnológica e produtiva no fortalecimento dos sistemas públicos de saúde.

Os percentuais apresentados no Quadro 1 devem ser interpretados como parâmetros analíticos utilizados para estruturar a simulação econômica. Esses valores não correspondem a microdados administrativos específicos do SUS, mas representam aproximações baseadas em evidências da literatura sobre o impacto da inteligência artificial no diagnóstico por imagem. A finalidade dessa estrutura é permitir a construção de cenários comparativos entre a situação atual e um cenário hipotético de incorporação tecnológica

Após a definição da estrutura de custos e as proporções apresentadas no Quadro 1 representam uma distribuição aproximada dos principais componentes de custo associados ao processo diagnóstico do câncer de mama no SUS. Esses valores não correspondem a microdados administrativos específicos, mas constituem uma estrutura analítica baseada em evidências da literatura sobre inteligência artificial aplicada ao diagnóstico por imagem. Estudos indicam que a adoção de sistemas de IA pode reduzir biópsias desnecessárias e exames complementares, ao mesmo tempo em que aumenta os custos relacionados à infraestrutura digital e ao processamento de dados (Buzatto et al., 2024; OECD, 2021).

A simulação foi implementada no software R, por meio da construção de um *script* que organiza os vetores de custos, as hipóteses de redistribuição dos diagnósticos entre os diferentes estágios da doença e a geração de gráficos comparativos entre os cenários analisados. O código utilizado permite reproduzir os cálculos realizados e encontra-se disponibilizado nos anexos do trabalho, garantindo transparência e replicabilidade do modelo.

Do ponto de vista analítico, foram considerados dois cenários. O primeiro corresponde ao cenário base, que representa o fluxo diagnóstico atualmente observado no sistema público de saúde, no qual a interpretação de exames de imagem e a decisão clínica dependem exclusivamente da avaliação realizada por profissionais especializados. O segundo corresponde ao cenário com incorporação de inteligência artificial, no qual algoritmos de apoio à decisão são utilizados na análise de exames de ultrassonografia mamária, auxiliando na classificação de lesões e na identificação de achados suspeitos.

A literatura recente indica que sistemas de inteligência artificial aplicados ao diagnóstico por imagem podem contribuir para maior precisão na identificação de lesões benignas e malignas, reduzindo a ocorrência de falsos positivos e, conseqüentemente, a realização de procedimentos invasivos desnecessários, como biópsias. Além disso, esses sistemas podem auxiliar na padronização da interpretação das imagens, diminuindo a variabilidade diagnóstica entre observadores e aumentando a eficiência do fluxo de atendimento.

Ressalta-se que o presente estudo não constitui uma análise de custo-efetividade completa nem uma avaliação tecnológica formal, mas sim uma projeção exploratória destinada a estimar ordens de grandeza e tendências potenciais associadas à incorporação de tecnologias digitais no sistema público de saúde. O objetivo central é discutir o custo fiscal e o impacto econômico da inovação tecnológica

em termos agregados, considerando as limitações inerentes ao uso de dados secundários.

Entre as principais limitações do estudo destacam-se a dependência de bases de dados agregadas, a ausência de microdados individualizados sobre trajetórias clínicas e a necessidade de assumir parâmetros de redistribuição derivados da literatura especializada. Ainda assim, o exercício de simulação permite explorar cenários plausíveis de reorganização do fluxo diagnóstico e seus possíveis efeitos sobre os custos do tratamento do câncer de mama no SUS.

A simulação realizada neste estudo não tem como objetivo estimar a incidência da doença, mas sim avaliar como mudanças na eficiência diagnóstica podem influenciar a distribuição dos casos entre os diferentes estágios clínicos do câncer de mama. Os percentuais utilizados representam hipóteses estruturais do modelo e refletem cenários alternativos de diagnóstico mais precoce associados ao uso de ferramentas de apoio baseadas em inteligência artificial.

Os resultados da simulação são expressos em valores monetários correspondentes ao custo total anual estimado para o tratamento do câncer de mama no SUS no Estado de São Paulo em cada cenário analisado. A diferença entre os custos totais estimados nos dois cenários é interpretada como economia potencial associada à adoção de sistemas de inteligência artificial no suporte diagnóstico por ultrassonografia mamária.

O modelo adotado possui natureza estática e não incorpora mudanças na incidência da doença ou no comportamento epidemiológico da população. A simulação concentra-se exclusivamente na estimativa dos impactos econômicos decorrentes da redistribuição dos diagnósticos entre os diferentes estágios clínicos da doença.

4 Resultados e discussões

Os resultados da simulação indicam que a adoção de sistemas de inteligência artificial no exame de ultrassonografia do SUS paulista pode gerar uma economia substancial nos custos de tratamento do câncer de mama. No cenário atual (sem IA), o custo total anual estimado é de R\$ 499,9 milhões. Com a incorporação da IA, esse valor reduz-se para R\$ 431,1 milhões, representando uma economia potencial de R\$ 68,8 milhões por ano - equivalente a uma redução de 13,8% nos gastos totais com tratamento.

Esse resultado consolida a hipótese central do estudo: a IA, ao possibilitar diagnósticos mais precoces e precisos, reconfigura a distribuição dos casos por estadiamento, deslocando pacientes dos estágios mais avançados (e mais caros) para os estágios iniciais (menos onerosos), gerando ganhos de eficiência alocativa para o sistema público de saúde. Para compreender essa dinâmica em profundidade, é necessário examinar o comportamento de cada estágio individualmente e como eles contribuem para o resultado agregado, dado que o custo médio por paciente cresce de forma não linear com o avanço do estadiamento.

4.2 Análise detalhada por estadiamento

A Tabela 4, abaixo, apresenta a decomposição dos custos por estágio da doença, revelando padrões importantes que merecem análise.

Tabela 4 - Projeção econômica do custo total do câncer de mama no Estado de São Paulo (SUS-SP), antes e após a implementação da I.A.

Estadiamento	Nº estimado de casos por ano	Custo médio por paciente (R\$)	Custo total sem IA (R\$)	Custo total com IA (R\$)
Estágio I	11.641	17.009,30	198.011.409	243.634.800

Estágio II	9.996	37.981,42	379.737.248	274.747.080
Estágio III	7.169	96.205,12	689.815.220	413.458.080
Estágio IV	3.249	56.664,00	184.151.136	104.253.600
Total (R\$)	-	-	499.912.696	431.093.546

Fonte: Elaboração própria com base no Observatório de Oncologia (2024), SIGTAP/DATASUS, IBGE (2022) e parâmetros de redistribuição inspirados em McKinney et al. (2020) e Buzatto et al. (2024).

Agora, irei apresentar uma análise detalhada de cada estágio e os respectivos comportamento de acordo com o custo:

Estágio I: Com a IA, o número de casos diagnosticados precocemente salta de 11.641 para 23.302 - um aumento expressivo de 100,2%. O custo total neste estágio aumenta de R\$ 198 milhões para R\$ 243,6 milhões. Esse acréscimo, longe de representar uma ineficiência, deve ser interpretado como um “investimento” que evita gastos muito maiores nas fases seguintes da doença.

Estágio II: A detecção precoce também eleva os diagnósticos neste estágio, de 9.996 para 16.043 casos (+60,5%). O custo total, apresenta uma redução de R\$ 379,7 milhões para R\$ 274,7 milhões. Esse dado, aparentemente contraditório, indica que a composição interna do estágio II provavelmente está mudando, com predominância de subestágios mais iniciais dentro da categoria, que exigem tratamentos menos complexos.

Estágio III: Aqui se observa o principal ganho proporcionado pela IA. O número de casos cai drasticamente de 7.169 para 3.534 - uma redução de 50,7% -, fazendo com que o custo total despencasse de R\$ 689,8 milhões para R\$ 413,5 milhões. Trata-se de uma economia expressiva de R\$ 276,3 milhões apenas neste estágio.

Estágio IV: Os casos com metástase também diminuem, passando de 3.249 para 2.234 (-31,3%), com redução de custo de R\$ 184,1 milhões para R\$ 104,3 milhões - economia adicional de R\$ 79,8 milhões.

Em síntese, a dinâmica observada é clara: a IA promove uma migração de casos dos estágios III e IV (caros) para os estágios I e II (mais baratos). O custo incremental de tratar mais pacientes nos estágios iniciais - cerca de R\$ 120 milhões adicionais somando I e II - é mais do que compensado pela redução de gastos nos estágios avançados - aproximadamente R\$ 356 milhões economizados entre III e IV -, resultando na economia líquida de R\$ 68,8 milhões.

Essa migração de casos entre estágios, no entanto, não se limita a reduzir o custo agregado. Ela também reorganiza a estrutura produtiva do serviço de diagnóstico, alterando profundamente a composição dos insumos utilizados ao longo da cadeia assistencial.

4.3 Reorganização da estrutura de insumos

Para além da economia agregada estimada, a introdução de sistemas de inteligência artificial promove uma transformação qualitativa na composição dos custos do sistema de saúde. Conforme apresentado no Quadro 1, a adoção dessa tecnologia altera a estrutura de insumos utilizada no diagnóstico do câncer de mama, deslocando recursos de procedimentos clínicos tradicionais para infraestrutura tecnológica e sistemas digitais. Essa reconfiguração pode ser analisada em três dimensões principais.

(i) Redução de procedimentos desnecessários: a participação das biópsias nos custos totais do sistema reduz-se significativamente no cenário com inteligência artificial. No modelo de simulação adotado neste estudo, essa participação diminui de aproximadamente 25% para 10%. Esse resultado é consistente com evidências empíricas recentes. O estudo de Buzatto et al. (2024) demonstrou que sistemas de inteligência artificial aplicados à ultrassonografia mamária podem reduzir em até 60,4% a realização de biópsias em lesões benignas.

Essa redução representa não apenas economia financeira para o sistema público de saúde, mas também menor exposição das pacientes a procedimentos invasivos desnecessários, reduzindo riscos clínicos e efeitos adversos associados a complicações causadas por procedimentos médicos (dor e inflamação após uma biópsia, por exemplo). De forma semelhante, a participação dos exames complementares adicionais diminui de 20% para 12% no cenário com IA, refletindo o aumento da precisão diagnóstica e a consequente redução na necessidade de repetição de exames ou utilização de métodos complementares.

(ii) Redistribuição do trabalho médico: outro efeito relevante diz respeito à reorganização do trabalho médico. No modelo proposto, a participação do trabalho de radiologistas na estrutura total de custos reduz-se de 35% para 28%. Mais importante que a redução percentual, contudo, é a transformação qualitativa na natureza dessas atividades.

Com a incorporação da inteligência artificial em tarefas repetitivas associadas à triagem inicial de exames normais podem ajudar na confirmação diagnóstica. Essa mudança representa uma reconfiguração das competências profissionais no campo da radiologia, potencialmente associada a ganhos de produtividade e melhoria na qualidade do trabalho médico.

(iii) Intensificação tecnológica: em contrapartida à redução de alguns procedimentos clínicos, observa-se aumento significativo na participação dos custos associados à infraestrutura tecnológica. No cenário com IA, os gastos com equipamentos digitais, sistemas de processamento de imagens e manutenção tecnológica aumentam de 10% para aproximadamente 25% do custo total.

Esse crescimento reflete a necessidade de investimentos em infraestrutura digital, incluindo servidores para processamento de imagens médicas, sistemas de arquivamento e comunicação de imagens (PACS), armazenamento em nuvem, licenciamento de softwares especializados e atualização contínua de modelos de aprendizado de máquina. Além disso, os custos operacionais relacionados à manutenção desses sistemas, consumo energético, conectividade e gestão de dados também se ampliam, indicando a necessidade de adaptação organizacional dos serviços de saúde a um ambiente progressivamente digitalizado.

Essa reconfiguração evidencia que a inteligência artificial não deve ser interpretada como uma simples tecnologia redutora de custos. Trata-se, antes, de uma tecnologia reorganizadora da estrutura produtiva dos serviços de saúde, que altera profundamente a composição dos insumos utilizados no processo diagnóstico. Nesse sentido, a transformação observada na estrutura de custos aproxima o setor saúde do paradigma tecnológico digital associado à chamada sexta onda longa de desenvolvimento, caracterizada pela convergência entre tecnologias de informação, inteligência artificial e análise massiva de dados.

4.4 Discussão à Luz da Teoria Neo-Schumpeteriana

Os resultados obtidos nesta simulação dialogam diretamente com o referencial teórico adotado neste estudo. A inteligência artificial pode ser compreendida como uma tecnologia de uso geral (General Purpose Technology – GPT), nos termos de Bresnahan e Trajtenberg (1995), caracterizada por sua capacidade de gerar transformações sistêmicas em múltiplos setores da economia.

No caso do setor saúde, essa tecnologia atua como um vetor de reorganização dos processos produtivos associados ao diagnóstico médico. O conceito schumpeteriano de destruição criadora torna-se particularmente evidente na substituição parcial de rotinas diagnósticas tradicionais – baseadas exclusivamente na interpretação humana – por sistemas híbridos de interação entre médicos e algoritmos.

Nesse processo, práticas ineficientes são gradualmente substituídas por novos padrões

organizacionais. Procedimentos redundantes, como biópsias desnecessárias, repetição de exames ou retrabalho diagnóstico, tendem a ser reduzidos, enquanto recursos humanos e financeiros são realocados para atividades de maior valor agregado. Essa dinâmica é compatível com a lógica schumpeteriana de inovação, na qual novas tecnologias reconfiguram setores inteiros da economia.

Sob a perspectiva das ondas longas de Kondratiev, esse movimento também pode ser interpretado como parte da transição para um novo paradigma tecnoeconômico. A chamada sexta onda longa de desenvolvimento, caracterizada pela convergência entre digitalização, inteligência artificial e big data, encontra no setor saúde um campo particularmente fértil de aplicação.

O Quadro 1 ilustra precisamente essa transição: o sistema de saúde desloca-se de um padrão produtivo intensivo em trabalho e procedimentos clínicos para um padrão intensivo em informação, tecnologia digital e análise de dados.

Além disso, o fato de o modelo de inteligência artificial utilizado como referência ter sido desenvolvido no contexto da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (USP) evidencia a importância das interações entre universidades, sistema público de saúde e infraestrutura científica nacional. A existência de capacidades tecnológicas instaladas no país para desenvolver soluções adaptadas às especificidades do SUS constitui um ativo estratégico, fortalecendo o Sistema Nacional de Inovação em Saúde.

4.5 Implicações para Políticas Públicas

Os resultados desta simulação oferecem subsídios relevantes para o debate sobre políticas de inovação em saúde no âmbito do Sistema Único de Saúde (SUS). A incorporação de sistemas de inteligência artificial no suporte diagnóstico pode gerar impactos que vão além da dimensão tecnológica, afetando a eficiência do sistema, a sustentabilidade fiscal e a organização territorial da oferta de serviços de saúde. Nesse contexto, destacam-se quatro eixos principais.

(i) Eficiência alocativa: a economia estimada de aproximadamente R\$ 69 milhões anuais poderia ser reinvestida no próprio sistema de saúde, ampliando a capacidade de atendimento do SUS. Esses recursos poderiam financiar a expansão do rastreamento, a aquisição de equipamentos de diagnóstico por imagem ou o fortalecimento da atenção primária; (ii) Sustentabilidade financeira: em um contexto de restrições fiscais e envelhecimento populacional - fatores que tendem a ampliar a demanda por serviços oncológicos - tecnologias capazes de aumentar a eficiência diagnóstica tornam-se relevantes para a sustentabilidade de longo prazo do sistema público de saúde (OECD, 2021);

(iii) Redução de desigualdades regionais: apesar da maior capacidade instalada em saúde no Estado de São Paulo, persistem desigualdades na distribuição de especialistas e serviços diagnósticos (INCA, 2024). Sistemas de inteligência artificial podem atuar como ferramentas de apoio clínico em regiões com menor disponibilidade de radiologistas, contribuindo para reduzir assimetrias na qualidade diagnóstica; e, (iv) Estímulo à inovação nacional: a adoção de tecnologias desenvolvidas em instituições brasileiras, como o modelo criado na Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, pode fortalecer o Sistema Nacional de Inovação em Saúde e reduzir a dependência de soluções tecnológicas importadas.

Apesar do potencial identificado, é fundamental reconhecer as limitações do exercício e considerar os custos adicionais envolvidos em uma eventual implementação em larga escala da tecnologia.

4.6 Limitações e custos de implementação

A economia estimada de aproximadamente R\$ 69 milhões refere-se exclusivamente à redução dos custos de tratamento associada ao diagnóstico mais precoce do câncer de mama. Uma avaliação

fiscal mais abrangente da incorporação de sistemas de inteligência artificial no SUS-SP exigiria a consideração dos custos de implementação e operação da tecnologia, bem como maior detalhamento do perfil das mulheres que efetivamente realizaram exames de ultrassonografia mamária.

Esses custos podem ser agrupados em três categorias principais. A primeira refere-se aos custos diretos de tecnologia, que incluem aquisição ou licenciamento de softwares de IA, infraestrutura computacional para processamento de imagens médicas, armazenamento de dados, soluções de segurança da informação e integração com sistemas existentes, como plataformas PACS e prontuários eletrônicos.

A segunda categoria corresponde aos custos de capacitação, relacionados ao treinamento de profissionais de saúde e equipes técnicas para utilização adequada das novas ferramentas, além da adaptação de fluxos de trabalho e protocolos clínicos (Dourado, 2023). Por fim, destacam-se os custos recorrentes de operação, que envolvem manutenção dos sistemas, atualização dos modelos de aprendizado de máquina, monitoramento de desempenho e suporte técnico especializado. A consideração desses elementos é fundamental para uma avaliação completa do impacto econômico da tecnologia no sistema público de saúde.

Como referência ilustrativa da magnitude dos investimentos envolvidos em processos de digitalização hospitalar, o Hospital das Clínicas da Universidade de São Paulo anunciou recentemente investimentos da ordem de R\$ 1,7 bilhão para a implementação de um projeto de “hospital inteligente”. Evidentemente, a adoção específica de sistemas de inteligência artificial aplicados ao diagnóstico por imagem exigiria investimentos substancialmente menores, concentrados principalmente em infraestrutura digital e integração de sistemas.

À luz dessas considerações, é possível sintetizar os principais resultados desta simulação e suas implicações para o sistema de saúde paulista. Os resultados obtidos indicam que: (i) a adoção de sistemas de inteligência artificial no suporte diagnóstico em ultrassonografia mamária no SUS-SP pode gerar uma economia anual estimada de aproximadamente R\$ 68,8 milhões, equivalente a uma redução de 13,8% nos custos associados ao tratamento do câncer de mama; (ii) essa economia decorre principalmente da migração de casos diagnosticados em estágios avançados (III e IV), caracterizados por maior custo terapêutico, para estágios iniciais (I e II), nos quais o tratamento tende a ser menos complexo e menos oneroso; e, (iii) a incorporação da inteligência artificial promove uma reconfiguração da estrutura de insumos do sistema, reduzindo procedimentos desnecessários - como biópsias e exames complementares redundantes - e ampliando a participação de investimentos em infraestrutura tecnológica. Esses resultados são consistentes com evidências observadas na literatura internacional e encontram respaldo na perspectiva teórica neo-schumpeteriana, que compreende a inteligência artificial como uma tecnologia de uso geral capaz de reorganizar setores inteiros da economia.

Cabe destacar, contudo, que a economia estimada neste estudo provavelmente subestima os benefícios totais da tecnologia, uma vez que não incorpora ganhos intangíveis importantes, como melhoria da qualidade de vida das pacientes, redução da mortalidade associada ao câncer de mama, ampliação da equidade no acesso a serviços diagnósticos e melhorias nas condições de trabalho dos profissionais de saúde.

Dessa forma, conclui-se que a incorporação de sistemas de inteligência artificial no suporte diagnóstico por imagem no SUS-SP possui potencial significativo para ampliar a eficiência alocativa do sistema, reduzir custos associados ao tratamento de estágios avançados da doença e apoiar políticas públicas voltadas à inovação no setor saúde. Esses resultados sugerem que a adoção dessa tecnologia merece atenção por parte de gestores públicos e formuladores de políticas.

Referências bibliográficas

ALBUQUERQUE, Eduardo da Motta e. **Revoluções tecnológicas e general purpose technologies: mudança técnica, dinâmica e transformações do capitalismo**. In: RAPINI, M. S.; SILVA, J. R. L. A.; ALBUQUERQUE, E. M. **Economia da ciência, tecnologia e inovação: fundamentos teóricos e a economia global**. Belo Horizonte: Cedeplar/UFMG, 2021. p. 123-156.

BRESNAHAN, Timothy; TRAJTENBERG, Manuel. **General purpose technologies ‘engines of growth’?** Journal of Econometrics, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 83-108, jan. 1995.

BUZATTO I. P. C., S. A. Recife, L. Miguel, R. M. Bonini, N. Onari, A. L. P. A. Faim, L. Silvestre, D. P. Carlotti, A. Fröhlich, D. G. Tiezzi. **Machine learning can reliably predict malignancy of breast lesions based on clinical and ultrasonographic features**. 2024

CASSIOLATO, José Eduardo; LASTRES, Helena Maria Martins. **Sistemas de inovação e desenvolvimento: as implicações de política**. São Paulo em Perspectiva, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 34-45, jan./mar. 2005.

CETIC.BR. **Estudos setoriais: inteligência artificial na saúde**. São Paulo: NIC.br, 2024. Disponível em: <https://cetic.br/pt/publicacao/estudos-setoriais-inteligencia-artificial-na-saude/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

DOURADO, Daniel de Araújo. **Regulação da inteligência artificial na saúde**. 2023. Tese (Doutorado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6135/tde-15032024-123456/>. Acesso em: 7 fev. 2025.

DWECK, Esther; ROSSI, Pedro; OLIVEIRA, Ana Luíza Matos de. **Economia pós-pandemia: desmontando os mitos da austeridade fiscal e construindo um novo paradigma para o Brasil**. São Paulo: Autonomia Literária, 2021. 320 p.

ESTEVA, Andre; KUPREL, Brett; NOVOA, Roberto A.; et al. **Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks**. Nature, London, v. 542, n. 7639, p. 115-118, fev. 2017. DOI: 10.1038/nature21056.

GADELHA, Carlos Augusto Grabois. **Desenvolvimento, complexo industrial da saúde e política industrial**. Revista de Saúde Pública, São Paulo, v. 40, n. spe, p. 11-23, dez. 2006.

GARCIA, Renato. **Economia industrial e desenvolvimento regional**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2014. 280 p.

GREENSTEIN, Shane. **How the internet became commercial: innovation, privatization, and the birth of a new network**. Princeton: Princeton University Press, 2015. 512 p.

INCA – Instituto Nacional de Câncer (Brasil). **Controle do câncer de mama no Brasil: dados e números** 2024. Rio de Janeiro: INCA, 2024. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/publicacoes/relatorios/controlado-cancer-de-mama-no-brasil-dados-e-numeros-2024>. Acesso em: 10 jan. 2025.

INCA – Instituto Nacional de Câncer (Brasil). **Diretrizes para a detecção precoce do câncer de mama no Brasil**. Rio de Janeiro: INCA, 2022. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/publicacoes/livros/diretrizes-para-deteccao-precoce-do-cancer-de-mama-no-brasil>. Acesso em: 10 jan. 2025.

- KONDRATIEFF, Nikolai Dmitrievich. **The major economic cycles**. Tradução de Guy Daniels. New York: Richardson & Snyder, 1984. 160 p. (Original publicado em 1925).
- McCARTHY, John. **Programs with common sense**. In: MECHANISATION OF THOUGHT PROCESSES: SYMPOSIUM, 1959, London. Proceedings... London: Her Majesty's Stationery Office, 1959. p. 77-84. Disponível em: <http://jmc.stanford.edu/articles/mcc59.html>. Acesso em: 20 out. 2025.
- McCARTHY, John. **What is artificial intelligence?** Stanford: Stanford University, 2007. Disponível em: <http://jmc.stanford.edu/articles/whatisai.html>. Acesso em: 20 out. 2025.4
- McCARTHY, John; MINSKY, Marvin; ROCHESTER, Nathaniel; SHANNON, Claude E. **A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence**. AI Magazine, La Canada, v. 27, n. 4, p. 12-14, dez. 2006. (Original de 1955). Disponível em: <http://jmc.stanford.edu/articles/dartmouth.html>. Acesso em: 20 out. 2025.
- McKINNEY, Scott Mayer; SIENIEK, Marcin; GODBOLE, Varun; et al. **International evaluation of an AI system for breast cancer screening**. Nature, London, v. 577, n. 7788, p. 89-94, jan. 2020. DOI: 10.1038/s41586-019-1799-6.
- NEWELL, Allen; SIMON, Herbert Alexander. **Computer science as empirical inquiry: symbols and search**. Communications of the ACM, New York, v. 19, n. 3, p. 113-126, mar. 1976.
- OBSERVATÓRIO DE ONCOLOGIA. **O custo do tratamento do câncer de mama por paciente no SUS: relatório 2024**. São Paulo: Observatório de Oncologia, 2024. Disponível em: <https://observatoriodeoncologia.com.br/estudos/custo-tratamento-cancer-mama-sus-2024>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD digital economy outlook 2021**. Paris: OECD Publishing, 2021. Disponível em: <https://www.oecd.org/digital/oecd-digital-economy-outlook-2021-4a3c6b5a-en.htm>. Acesso em: 20 out. 2025.
- OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD science, technology and industry outlook 2016**. Paris: OECD Publishing, 2016. Disponível em: <https://www.oecd.org/science/oecd-science-technology-and-industry-outlook-19991428.htm>. Acesso em: 20 out. 2025.
- OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Health at a glance 2021: OECD indicators**. Paris: OECD Publishing, 2021. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/health-at-a-glance-2021_ae3016b9-en.html. Acesso em: 20 out. 2025.
- RUSSELL, Stuart Jonathan; NORVIG, Peter. **Artificial intelligence: a modern approach**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. 1132 p.
- TIGRE, Paulo Bastos. **Gestão da inovação: a economia da tecnologia no Brasil**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 320 p.
- TOMAZELLI, Jeane Glaucia; SILVA, Gulnar Azevedo e. **Rastreamento do câncer de mama no Brasil: uma avaliação da oferta e utilização da rede assistencial do Sistema Único de Saúde no período 2010-2012**. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 33, n. 7, e00116416, jul. 2017. DOI: 10.1590/0102-311X00116416.

TOPOL, Eric. **Deep medicine**. New York: Basic Books, 2019. 400 p.

TURING, Alan Mathison. **Computing machinery and intelligence**. Mind, Oxford, v. 59, n. 236, p. 433-460, out. 1950. DOI: 10.1093/mind/LIX.236.433.

UNCTAD – UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. **Digital economy report 2019: value creation and capture – implications for developing countries**. Geneva: United Nations, 2019. Disponível em: <https://unctad.org/publication/digital-economy-report-2019>. Acesso em: 20 out. 2025.

VELDKAMP, Laura; CHUNG, Cindy. **Data and the aggregate economy**. Journal of Economic Literature, Nashville, v. 57, n. 3, p. 590-632, set. 2019.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Global strategy on digital health 2020-2025**. Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240020924>. Acesso em: 20 out. 2025.

YAP, Moi Hoon; PONS, Gerard; MARTÍ, Joan; et al. **Automated breast ultrasound lesions detection using convolutional neural networks**. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, Piscataway, v. 22, n. 4, p. 1218-1226, jul. 2018. DOI: 10.1109/JBHI.2017.2731873.