

Indústria 4.0: revolução ou modernização? Um estudo a partir da contribuição de Carlota Perez

Guilherme Jorge da Silva

Analista Jr. do IBGE e doutorando da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE/PPGE)

RESUMO: O conceito "Indústria 4.0" é utilizado para identificar um conjunto de características tecnológicas onde via de regra o físico se encontra com o não físico, agilizando processamentos, cadeias produtivas e comunicação entre diversos dispositivos e setores da economia. Termo que nos remete a um novo momento da indústria mundial, com mudanças implementadas nas manufaturas ao redor do mundo em países como Estados Unidos e Alemanha através de políticas públicas para a manutenção da dianteira inovativa via digitalização produtiva, é controverso e com denominações que muitas vezes superestimam o momento tecnológico que vivemos. Esse trabalho procura colaborar com o debate partindo de um arcabouço neoschumpeteriano com a contribuição de Carlota Perez sobre as revoluções tecnológicas, defendendo que o termo "Indústria 4.0" não marca uma nova onda da revolução industrial e sim um período de modernização na já conhecida onda das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs).

Palavras-chave: Indústria 4.0, revoluções tecnológicas, modernização produtiva, ciclos econômicos, tecnologia da informação e comunicação.

Área Anpec: Economia industrial e da tecnologia

JEL: O14, O3.

ABSTRACT: The concept "Industry 4.0" is used to identify a set of technological characteristics where, as a rule, the physical meets the non-physical, streamlining processing, production chains and communication between various devices and sectors of the economy. A term that takes us to a new moment in the world industry, with changes implemented in manufacturing around the world in countries such as the United States and Germany through public policies to maintain the innovative front via productive digitization, it is controversial and with denominations that often overestimate the technological moment we live in. This work seeks to collaborate with the debate starting from a neoschumpeterian framework with Carlota Perez's contribution on technological revolutions, arguing that the term "Industry 4.0" does not mark a new wave of the industrial revolution, but a period of modernization in the already known wave of Information and Communication Technologies (ICTs).

Keywords: Industry 4.0, technological revolutions, productive modernization, economic cycles, information and communication technology.

1. Introdução

O termo "*Industrie 4.0*" foi utilizado pela primeira vez em 2011 na feira de Hannover, para sintetizar e promover o processo de mudança na manufatura através da informatização (ARBIX, MIRANDA, TOLEDO E ZANCUL, 2018), em um pacto entre empresas, governos, universidades e setores privados da Alemanha, como uma nova estratégia industrial que garantiria sua posição de liderança na produção de alta qualidade tecnológica.

Semelhantemente, os Estados Unidos lança no mesmo ano a "*Advanced Manufacturing Partnership*" e, guardadas as devidas diferenças, tem como principal objetivo promover projetos que garantam uma posição destacada no esforço de desenvolvimento tecnológico de ponta (ARBIX, MIRANDA, TOLEDO E ZANCUL, 2018). Entre o termo anglófono e o Germânico, o segundo se fez mais popular e vendável nas rodas empreendedoras e empresariais.

O componente “4.0”, por sua vez, faz referência a quatro estágios da evolução manufatureira no sistema capitalista (BALASINGHAM, 2016), iniciando no século XVIII com a revolução industrial britânica, na transição das sociedades primordialmente rurais para núcleos urbanos. A “primeira” revolução introduz a máquina a vapor como forma de geração de energia, promovendo a produção de bens têxteis até a reformulação do complexo de transportes - tanto ferroviário quanto náutico. Como aponta Kagermann (2011), a escala e o escopo da produção fabril se modificam significativamente, bem como a organização¹ social. Novos meios de transportes e novas técnicas e ferramentas de produção abriram caminho para a “segunda” revolução industrial, com a substituição da máquina a vapor, petróleo e carvão como fontes primárias de energia para a energia elétrica, possibilitando novos meios de transporte, comunicação e o desenvolvimento da produção em massa via linha de montagem, com novos padrões de emprego e consumo remodelando o bem estar econômico da classe média - momento histórico da *Belle Époque*².

Figura 1: As etapas da revolução industrial



Fonte: elaboração própria a partir de Balasingham (2016)

¹ Adam Smith na Riqueza das Nações (1983), observa a modificação produtiva através da divisão do trabalho, onde os operários realizavam tarefas em âmbitos mais específicos, voltados para o “particular produtivo” que aprofundava habilidades, qualificações e produtividade.

² Eric Hobsbawn (1988, p. 47) é crítico à imagem romântica do período, onde a prosperidade das classes elevadas e mesmo da classe média transferia os custos de vida para a classe operária. Apesar de observar a fragilidade democrática e institucional que antecederia os conflitos do século XX, afirma-se que “Na verdade, o contraste entre a Grande Depressão e o boom secular posterior motivou as primeiras especulações sobre aquelas “ondas longas” no desenvolvimento do capitalismo mundial, mais tarde associadas ao nome do economista russo Kondratiev. Nesse ínterim, de qualquer maneira tornou-se evidente que aqueles que haviam feito previsões sombrias acerca do futuro do capitalismo, ou mesmo acerca de seu colapso iminente, haviam errado. Entre os marxistas ocorreram discussões acaloradas sobre o que isso implicava para o futuro de seus movimentos e se a doutrina de Marx teria de ser “revista””

Uma "terceira" revolução no século XX se apresentaria, onde microeletrônica e computadores seriam essenciais para a transição conhecida como revolução digital, que começou nos anos 1970, com a adoção de tecnologias que permitiram a automação de processos e também modificaram o controle e coordenação do fluxo de informações. Como podemos ver na figura 1, os desdobramentos das três revoluções industriais aconteceram em séculos distintos - a primeira no seio inglês do século XVIII com a energia a vapor; a segunda no final do século vitoriano com a participação de outros grandes países, como Estados Unidos e Alemanha, no advento da energia elétrica; a terceira com a microeletrônica e o surgimento de computadores, e também com outros países, sobretudo do leste asiático. Essa divisão apresenta alguns problemas quando parte-se da defesa de uma "quarta" revolução industrial. A primeira delas é o espaçamento das profundas modificações econômicas e sociais, com um século de diferença, e onde a indústria 4.0 é demarcada em menos de meio século com a terceira revolução.

Um segundo fator, muito mais latente e que será observado nas próximas seções, é a semelhança entre a terceira revolução e quarta revolução. A automação, mudanças na comunicação e na organização de informações e de logística estão dentro dos marcos da "terceira" revolução industrial, não havendo registro de uma ruptura marcante entre o que se observa nos anos 1970 e 1980 com os dias de hoje, não justificando a adoção de um novo termo. Ao contrário, a ruptura em si ainda é a microeletrônica da terceira onda industrial.

Em outras palavras, ao que tudo indica, ainda estamos na terceira revolução industrial. Não há justificativas históricas satisfatórias onde as características de uma quarta etapa no processo evolutivo do capitalismo moderno se apresentem. Supor uma modernização de meios e instrumentos, como o aparecimento da internet e processos de automação que vão desde a montagem de carros até o funcionamento dos mesmos, é mais coerente. Até Balasingham (2016, p. 4, grifo meu) afirma que "*The third industrial revolution, also known as the digital revolution started in the early 1970s and has continued till the present day.*", não sendo possível duas revoluções industriais em um mesmo período histórico.

O trabalho parte da visão sistêmica de Carlota Perez (2004) para apontar o atual momento como um modernização das tecnologias desenvolvidas durante a onda revolucionária das TICs. A próxima seção contempla as características da indústria 4.0 e suas definições; na terceira seção apresenta-se o corpo teórico das mudanças tecnológicas em grandes ondas revolucionárias; a quarta seção retoma as características da indústria 4.0 sob o arcabouço teórico exposto; por fim, na seção cinco apresentam-se as conclusões.

2. As características da indústria 4.0

A indústria 4.0 é notadamente conhecida pela *digitalização* da manufatura, sobretudo o que limita componentes físicos e virtuais e as possibilidades de automação de processos - que não poderiam ser realizados sem a capacidade computacional cada vez mais elevada e os dados disponíveis (UNIDO, 2016). Como afirma Schwab (2016, p. 19, grifo meu): "*Gene sequencing, for example, could not happen without progress in computing power and data analytics. Similarly, advanced robots would not exist without artificial intelligence, which itself, largely depends on computing power.*"

Como explicitado, os avanços da indústria 4.0 dependem, quase que integralmente, das melhorias realizadas nos componentes microeletrônicos e da computação, característicos da terceira revolução industrial. Ademais, Schwab (2016) aponta 3 principais condutores (*drivers*) que se beneficiam do progresso tecnológico de forma mútua:

1. Físicos: essas tendências são fáceis de identificar por serem tangíveis.

- a) Veículos autônomos: automotivos sem a intervenção direta do motorista³, que incluem drones, barcos, aviões e aeronaves - destinados tanto para o usuário final como também para fins militares, logísticos e de pesquisas;
- b) Impressão 3D: também denominada de manufatura aditiva, é impressa por camadas a partir de um desenho em 3D. A tecnologia está sendo usada em algumas aplicações, mais notadamente na medicina humana e veterinária, que exigem um alto grau de precisão e detalhismo em determinados componentes⁴;
- c) Novos materiais: mais leves, resistentes, recicláveis e adaptativos, os novos materiais compõem uma gama de insumos importantes - como o caso dos nanomateriais como o grafeno, mais forte que o aço e um ótimo condutor de calor e eletricidade, ou inovações em materiais termofixos que até então eram considerados inaproveitáveis.
- d) Robótica: inicialmente utilizada em tarefas específicas de fabricação, a colaboração homem-máquina vem se tornando cada vez maior e mais adaptativa e flexível. Desde agricultura até tarefas de extrema precisão, as contínuas melhorias permitem uma compreensão maior por parte das máquinas em respostas satisfatórias. Com a internet em nuvem, os mesmos podem acessar informações remotamente sem necessitar de uma rígida programação pré-estabelecida.

2. Digitais: relacionadas com a chamada *Internet das Coisas (IoT)*, o mundo físico se unindo ao digital - destacadamente na relação entre coisas (bens, serviços, dispositivos, etc) e pessoas. A proliferação ocorre em velocidade surpreendente e depende não apenas da circulação de informações como também da *latência*⁵ possibilitada pela internet.

3. Biológicos: os avanços são enormes, e se deparam com questões éticas, morais e de regulação. Nos últimos anos alcançamos um elevado nível de sequenciamento e manipulação do genoma humano. A composição de tecidos celulares, juntamente com a capacidade de produção das impressoras 3D, estão sendo largamente pesquisadas. O impacto desse *drive* abrange setores como agricultura, com a manipulação farmacêutica de plantas, e a própria medicina, com instrumentos de precisão, sequenciamento genético⁶ e tratamentos específicos, conforme o histórico genético de cada paciente.

A implementação da indústria 4.0, baseada nesses 3 *drivers* apresentados, acontece evolutivamente e em diferentes taxas em empresas e setores individuais, enfrentando três desafios: (i) padronização; (ii) organização do trabalho; (iii) disponibilidades de bens (ACATECH, 2013). Portanto, é fundamental uma comunicação entre os agentes envolvidos - governo, comunidade civil, academia e grandes empresas - para sua real viabilidade.

³ Segundo a NHTSA (2019), a automação é definida em cinco níveis para orientar a implementação de políticas públicas e regulação. A escala é do nível 0, onde o motorista tem controle de todos os dispositivos do veículo, até o nível 5, onde o automotivo foi projetado para realizar todas as tarefas.

⁴ Próteses de pele, de carapaças e bicos são os casos mais notórios. No Brasil, uma das primeiras restituições completas de casco de jabuti impresso em 3D foi realizada em SINOP, interior de Mato Grosso, em 2016, após o animal perder sua cobertura devido um incêndio florestal (DUEÑAS, RODRIGUES E ORSINI, 2019).

⁵ Um dos grandes fatores que envolvem a internet 5G é justamente sua latência (*Ping*), isto é, o tempo gasto (medido em milissegundos, ou ms) para um dispositivo obter uma resposta da torre de celular ou do link de rádio da conexão. A baixa latência otimiza a comunicação entre dispositivos autônomos, os serviços de inteligência artificial e nuvem. (ITU, 2018)

⁶ O caso mais notável em tempos de pandemia, é o da SARS-CoV-2. Em média, os países conseguiram realizar o sequenciamento em 15 dias. O Instituto Adolfo Lutz (IAL) e o Instituto de Medicina Tropical da Universidade de São Paulo (IMT - USP) fizeram em 48 horas, como o Instituto Pasteur na França. Além do tempo recorde, os novos métodos permitem respostas mais eficientes e um acompanhamento em tempo real da pandemia (FAPESP, 2020)

Até aqui tratei sobre alguns aspectos históricos das *Revoluções industriais* e das características da indústria 4.0. O equívoco sobre a terminologia - uma nova etapa na revolução industrial - será tratado com maior atenção nas próximas seções, onde mostrarei que a indústria 4.0 está inserida em um momento revolucionário específico das tecnologias da informação e comunicação, centrando-se na contribuição de Carlota Perez e em outros aspectos da economia evolucionária neoschumpeteriana.

3. As revoluções tecnológicas

Dosi (1982) propõe o conceito de paradigmas tecnológicos baseando-se no paradigma científico de Thomas Kuhn, mas aplicado para a tecnologia. O autor apresenta a mudança tecnológica como resultante de um processo evolucionário derivado de um amplo conjunto de esforços, não sendo aleatórios, ao contrário: o conhecimento que conduz ao avanço técnico é originário da busca por soluções de problemas baseados na operacionalização e manipulação de tecnologias já existentes. As firmas partem de um conjunto de práticas, rotinas e procedimentos possíveis em determinado momento. As mudanças exógenas estão relacionadas aos novos desafios e emergências de novos padrões (paradigmas), enquanto que mudanças endógenas estão relacionadas ao progresso técnico ao longo de trajetórias já estabelecidas por esses padrões.

Partindo dos paradigmas tecnológicos de Dosi (1982), Perez (1983) descreve um conjunto de instituições necessárias para o emprego, exploração e desenvolvimento de novas tecnologias dentro do que se denomina paradigma tecnoeconômico. A autora utiliza-se dos mecanismos de ciclos de Kondratiev e de sua elaboração estatística dos anos 1920 para atender ao desafio proposto por Nathan Rosenberg (1982, p.3) em compreender “as condições que precisariam ser atendidas para que a inovação tecnológica gerasse longos ciclos no crescimento econômico. . .”. O diferencial da abordagem está nas ondas não como um reflexo puro e exclusivamente econômico, e sim o corpo de um todo - harmonioso ou desarmonioso - socioeconômico e institucional em nível nacional e internacional.

Ao considerar esse todo institucional, Carlota Perez aborda questões do que posteriormente se denominaria *Sistema Nacional de Inovação (SNI)*, com contribuições seminais de Lundvall (1992) e Freeman (1995) e notória influência de Friedrich List, onde as formas institucionais e organizacionais, suas ligações e interações, colocam a inovação como um objeto sistêmico e não pontual dentro de um arcabouço socioeconômico. As inovações seguem um padrão de evolução no qual a inovação radical se torna o ponto nervoso para o desenvolvimento de diversas inovações incrementais que conduzem para uma padronização no tempo. Como bem observam Conceição e Faria (2003), a trajetória inovativa envolve espaço e direção dentro de um campo de possibilidades que depende dos agentes envolvidos, da padronização e do estabelecimento de hábitos de pesquisa sobre o que é considerado uma melhoria ou uma versão superior de determinado produto ou processo. O paradigma em si mostra a importância das inovações incrementais em um horizonte de mudança tecnológica que não ocorre de forma regular, porém tão pouco aleatoriamente.

O desenvolvimento econômico em mais de duzentos anos apresentou 5 grandes revoluções tecnológicas, em formas de ondas, onde a faixa ascendente redefine as firmas e as estruturas socioeconômicas, seguida de um declínio (faixa descendente) com crise econômica e reordenação institucional. Segundo Perez (2004), uma onda é composta das seguintes fases:

Fase 1: marca a entrada de novos produtos e indústrias, com um crescimento explosivo de inovações;

Fase 2: formação de uma constelação completa, com novas indústrias, sistemas tecnológicos e infraestrutura;

Fase 3: expansão das inovações e do potencial de mercado;

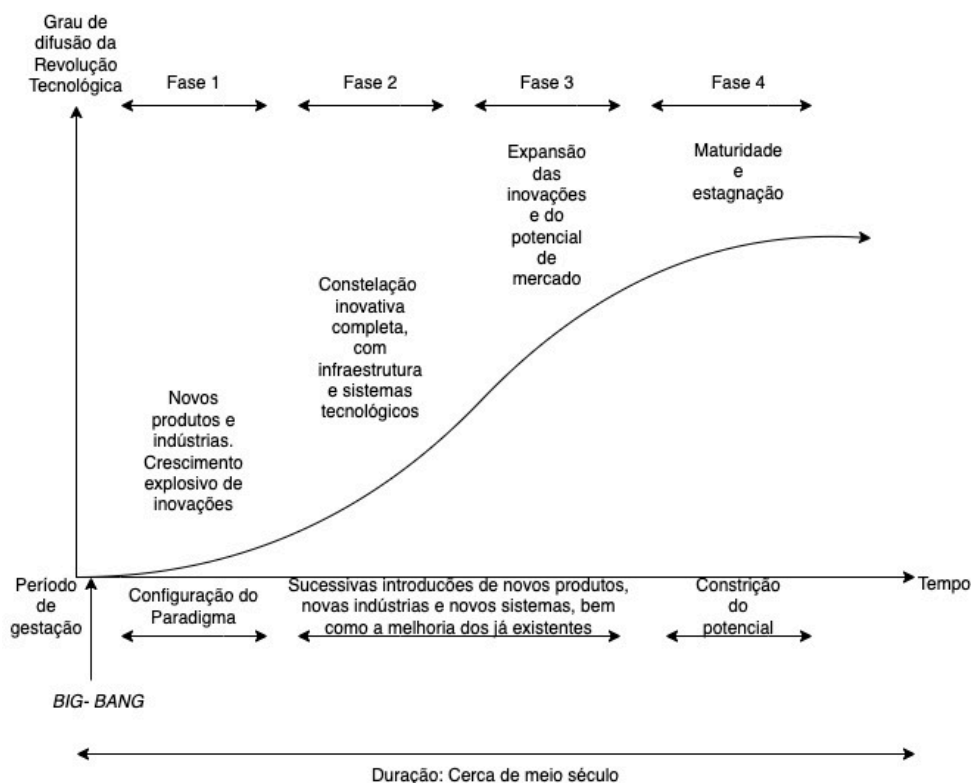
Fase 4: aproximação da maturidade e saturação;

As quatro fases duram cerca de meio século, mesmo que não exista um exatidão crucial para a sua formação. Quando consideramos o carácter cíclico da proposta, bem como a dinâmica evolucionária durante o processo do capitalismo moderno, dependendo das características de irradiação das inovações incrementais, podemos ter um período superior ao de meio século.

Ainda, o modelo histórico-analítico proposto apresenta dois momentos distintos em sua evolução, que englobam as quatro fases supracitadas:

1. Período de instalação: corresponde aos primeiros trinta anos, em um momento de sobreposição entre as revoluções, onde a anterior apresenta sua maturidade em forma de poucas oportunidades de investimento de baixo risco, mercado saturado e crescente capital ocioso. O período se subdivide em:

Figura 2: Fases das Revoluções Tecnológicas



Fonte: Elaboração própria a partir de Perez (2004)

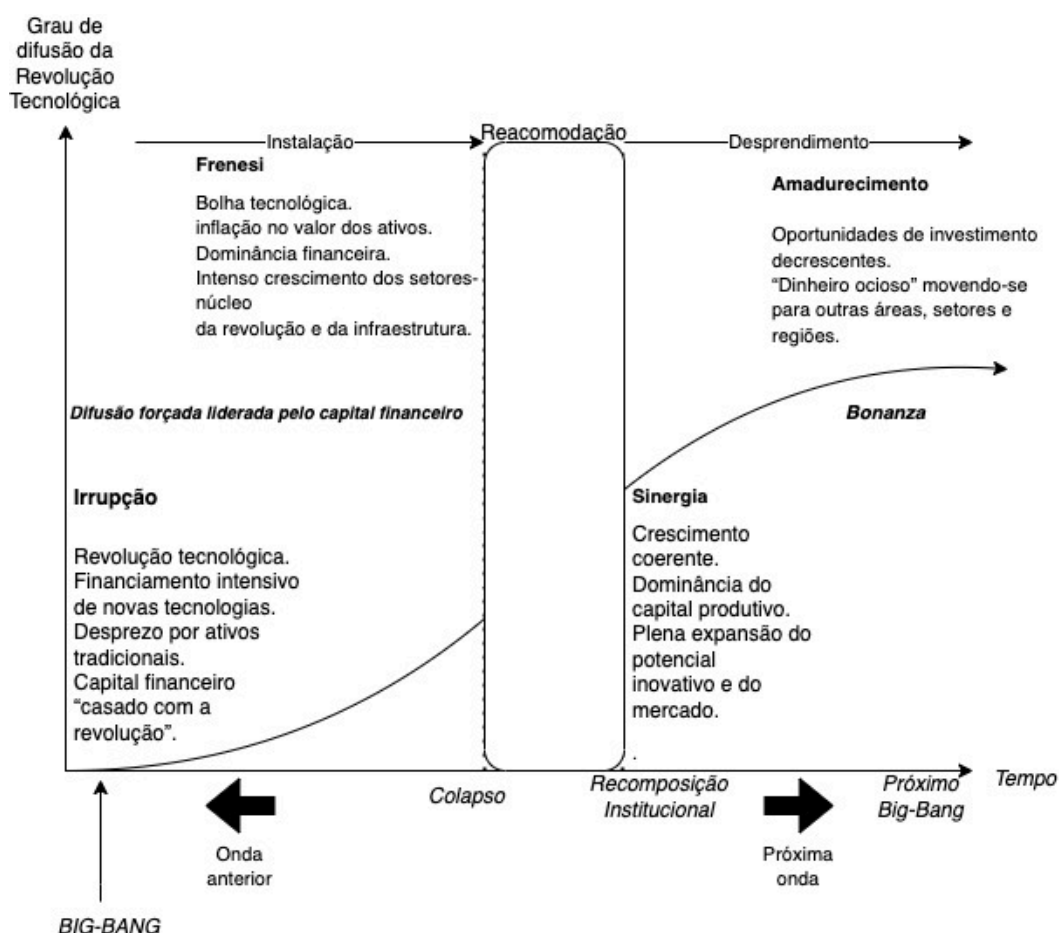
1.1 Irrupção: capital ocioso que possibilitará o rompimento de meios produtivos rotineiros para usos alternativos em novas direções que possibilitem maiores lucros. Apresenta-se a nova irrupção tecnológica, viabilizada pelo casamento entre o setor financeiro e produtivo - uma vez que as novas técnicas superam o potencial de riqueza das formas produtivas já estabelecidas.

1.2 Frenesi: momento frenético do mercado financeiro, interessado nos lucros gerados pelas novas tecnologias, com um aquecimento do mercado verificado pela alta generalizada dos preços dos ativos, conduzindo geralmente ao colapso financeiro.

Irrupção e frenesi estão dentro da fase 1 e 2, onde as forças das ideias liberais são mais notadas. Tanto do lado produtivo quanto do lado financeiro, os agentes econômicos acreditam controlar a nova

tecnologia e suas constelações geradas. Do lado financeiro temos um comportamento de cassino, onde as apostas se elevam em tal ordem que formam bolhas que irão romper ainda nos primeiros trinta anos da onda. A associação financeira e produtiva nos permite uma observação cíclica, onde as bolhas e pequenos distúrbios financeiros são acompanhados de momentos de grande crise. Essa dinâmica de ondas não estabelece o momento exato da sua origem ou sua duração e impacto socioeconômico, mas apresenta características importantes - como a subida generalizada do preço dos ativos voltados para as novas tecnologias geradas (AREND, 2012).

Figura 3: Fases das Revoluções Tecnológicas - da instalação ao desprendimento



Fonte: Elaboração própria a partir de Perez (2004)

Já o segundo período da onda longa é de retomada e amadurecimento, com a regulação do mercado financeiro e a fortificação institucional com participação do estado (PEREZ, 2004). Esse movimento deriva-se dos impactos e resultados da crise, e é importante ter ciência da adaptação e reformulação do aparato institucional aos novos desafios financeiros e produtivos. Temos:

2. Período de desprendimento: maior intervenção estatal com planejamento produtivo de longo prazo em detrimento às movimentações financeiras de curto prazo.

2.1 Sinergia: coerência institucional e predominância do capital produtivo. Máxima expansão do mercado consumidor com crescimento coerente de longo prazo.

2.2 Maturidade: oportunidades de investimento começam a decrescer, com o capital financeiro ocioso movendo-se para outros setores. O fechamento do ciclo se dá no encontro de uma próxima revolução.

Se na primeira metade da onda longa temos um salto e explosão com mercado financeiro e produtivo eufóricos, na segunda metade apresenta-se um crescimento com melhor base estrutural, consolidado por mudanças políticas e institucionais necessárias para a reorientação dentro das características do novo paradigma, em contexto de crescimento mais compassado. Nos primeiros 20-30 anos, como as principais firmas emblemáticas da nova revolução tecnológica se concentram nos países desenvolvidos, torna-se difícil o aproveitamento de oportunidade produtiva pelos países periféricos nos momentos que englobam irrupção e frenesi (ARENDE, 2012,; PEREZ, 2004).

Da contribuição proposta destaca-se a periodização cíclica do desenvolvimento do capitalismo moderno em ondas produtivas e financeiras que caracterizam o comportamento de grandes ondas de revoluções tecnológicas com fases específicas dentro de um intervalo de cinquenta anos. Esse intervalo não é absoluto - bem como as demarcações dentro de uma onda - uma vez que dependem das características e peculiaridades das novas formas tecnológicas apresentadas.

Outra questão fundamental tratada por Perez (1983) e que norteia o mapeamento das revoluções é a taxa de resposta e de modificação nos dois subsistemas principais do capitalismo moderno: o técnico-econômico e o social-institucional. O primeiro tem uma taxa de resposta muito mais rápida que o segundo, e de verificação mais conclusiva - como dados relativos a produtividade, capacidade ociosa e ativos financeiros; já o segundo carrega consigo uma série de signos e composições particulares e muitas vezes fora da esfera econômica que envolvem questões políticas, sociais e locais. Não obstante, é a dinâmica desses dois subsistemas que traduzem as transformações das estruturas produtivas.

Tabela 1: As Revoluções tecnológicas ao longo da história

Revoluções Tecnológicas	Fase 1	Fase 2	Reacomodação	Fase 3	Fase 4
	Período de Instalação			Período de desprendimento	
	Big-Bag/Irrupção	Frenesi	Crise	Sinergia	Maturidade
1ª A Revolução industrial	Cerca de 1771/1780	Mania dos canais (1793)	Pânico financeiro (1797)	O avanço inglês (1798-1812)	1810-1829/Crises financeiras(1819-1825)
2ª Era do vapor e das ferrovias	Cerca de 1829/1840	Mania das ferrovias (1836)	Revoluções sociais (1848-1850)	Boom vitoriano (1850-1860)	1857-1873/ Crises financeiras (1866-1873)
3ª Era do aço e da eletricidade	Cerca de 1875/1885	Países do Hemisfério sul (1890-1893)	Pânico dos ricos (1893-1903)	<i>Belle époque</i> (1895-1910)	1908-1918/ Crises financeiras (1920)
4ª Era do Petróleo, automóvel e produção em massa	Cerca de 1908/1920	Os loucos anos 1920	A grande crise (1929-1933)	A Era de Ouro (1945-1970)	1960-1974/ Crise do Petróleo (1973)
5ª Era da informação e das telecomunicações	Cerca de 1971	Mania da internet (1987-1998)	Subprime (2008)	????	????

Fonte: Elaboração própria a partir de Perez (2004), Kindleberger (1992) e Arend (2012)

Da tabela 1 pode-se auferir que as mudanças econômicas de mais fácil percepção - como o fluxo de financiamento no período de instalação, as novas empresas e mercados e todo o aparato de infraestrutura e sistemas tecnológicos, culminando em uma reacomodação derivada do colapso do capital

financeiro desordenado - estão concentradas nas fases 1 e 2, bem como no intervalo de crise. Em conjunto, o período de instalação engloba o surgimento de uma inovação radical com impactos em toda a economia de tal ordem que gera um aquecimento financeiro e um frenesi que é refletido em termos como “Manias”, até atingindo o ponto máximo de inflação dos preços dos ativos relacionados ao paradigma da onda e, assim, seu estouro e crise (PEREZ, 2004; AREND, 2012).

Por sua vez, a fase 3, especificamente a sinergia, reúne mudanças notáveis em termos socioeconômicos. Essas mudanças, graduais ao longo da onda, refletem novas formas de agir e organizar da sociedade, como o caso do Boom Vitoriano (1850-1860) ou mesmo a Belle époque (1895-1910) e a Era de ouro (1945-1975). Esses períodos, quando tirada toda a aura romântica e idealista que os envolve (HOBSBAWN, 1988), são de importância ímpar para o conjunto da sociedade: inicia-se um crescimento produtivo orientado e canalizado mediante as novas tecnologias apresentadas, mas diferentemente do frenesi, de maneira ordenada e coerente, com a participação do Estado, das firmas privadas e dos demais agentes institucionais que compõe toda a economia. A prosperidade do boom vitoriano aconteceu duas décadas depois que a máquina a vapor *Roket* mostrou pleno potencial de mover uma locomotiva de Liverpool a Manchester. Após o pânico da “Mania das ferrovias”, a prosperidade foi reflexo de uma série de instituições que regularam e orientaram os mercados nacionais, permitindo uma plena expansão sinérgica das linhas férreas (AREND, 2012).

O mesmo movimento ocorre ao final do século XIX na *Belle Époque*, com a disseminação do terceiro paradigma - e uma ordem considerável de invenções e inovações que podem ser exemplificadas nas exposições universais que iniciaram na metade do século XIX em Londres e tiveram ponto alto ao final do século na exposição de Paris, reunindo parte da elite global em apresentações científicas, tecnológicas e empresariais (HOBSBAWN, 1989). Dentre as mudanças no momento sinérgico, temos a adoção do padrão ouro e acordos universais de medidas, patentes, comunicações, acordos navais, dentre outros (AREND, 2012).

Ao chegar no século XX, com o petróleo e a produção em massa, a acomodação acontece com o estouro da bolsa de Nova York em 1929. A reordenação que culminaria na sinergia aconteceria com a participação dos Estados na recuperação econômica, com destaque ao *New Deal*. Após a segunda-guerra mundial temos a reestruturação global com uma série de acordos econômicos e sociais - como o de Bretton Woods para a regulação do capital financeiro - e a polarização de poder entre EUA e URSS que geraria corridas espaciais e armamentistas com avanços científicos e tecnológicos (HOBSBAWN, 1995; PEREZ, 2004; AREND, 2012).

As fases de composição da quinta revolução tecnológica ainda são incertas, sobretudo devido sua aproximação histórica. Mas pelas observações das ondas anteriores, o período de instalação se caracteriza pela participação do capital financeiro no frenesi da difusão tecnológica, com surgimento de diversas firmas, mercados, tecnologias e inovações, enquanto que em um segundo momento da onda (de Bonanza, ver figura 4) temos a participação de orientação, dentro das tecnologias do paradigma, por parte de instituições que canalizam o potencial inovativo. A seção que segue irá abordar a quinta era, tentando compreender a indústria 4.0 ou manufatura avançada dentro dessas características, se existem sinais de uma sexta onda e em que momento entre acomodação e fase 3 nos encontramos.

4. A indústria 4.0 como modernização produtiva

O *Big-Bang* da quinta revolução tecnológica acontece com o desenvolvimento dos componentes microeletrônicos em circuitos integrados, destacando-se os semicondutores. Curiosamente, a intermediação entre componentes físicos e a utilização humana antecede em ao menos um século as TICs, especificamente no pioneirismo de Ada Lovelace em criar uma linguagem de programação⁷ que

⁷ Ada Lovelace (1815-1852) descreveu o primeiro algoritmo para ser processado por uma máquina, a máquina analítica de Babbage, na década de 1840, permitindo computar valores de funções matemáticas. Por suas notas em seus estudos, é notoriamente conhecida como a primeira programadora da história (FUEGI e FRANCIS, 2003).

possibilitasse calcular os números de Bernoulli através da máquina analítica de Charles Babbage⁸ (FUEGI e FRANCIS, 2003).

Tabela 2: Principais inovações das TICs

Inovações	Hardware	Software	Breve descrição
Semicondutores	x		O grande avanço da eletrônica de semicondutores foi o circuito integrado, combinando transistores em um único chip de silício. A demanda pelo setor militar norte americano garantiram a primeira oportunidade de aplicação.
O computador	x	x	O ENIAC (1946), considerado o primeiro computador, foi financiado pelo exército para calcular tiros da artilharia. O EDVAC seria o primeiro computador a usar código binário, sendo o pioneiro na ligação entre software e hardware. Por sua vez, o UNIVAC (1953) seria o primeiro grande computador comercial, fazendo parte do departamento de Censo dos EUA. Apenas nos anos 1970, com a evolução dos semicondutores e da microeletrônica, que surgiriam os primeiros <i>Personal Computers</i> (PCs), ou microcomputadores.
O microprocessador	x		O lançamento do Intel 4004 em 1971 transformaria a indústria americana nos 25 anos posteriores, resultando em circuitos com uma ampla e diversificada gama de aplicações, quebrando o gargalo que limitava as possibilidades tecnológicas de difusão dos computadores e resultando em novas empresas como Compaq (1982) e Dell (1984), com estações de <i>desktop</i> e, posteriormente, <i>notebooks</i> .
O Sistema Operacional (SO)		X	Com a popularização dos PCs, o desenvolvimento de SOs complexos e pouco interativos deu lugar ao desenvolvimento de produtos padronizados para computadores e <i>desktops</i> . O que anteriormente se baseava em linguagem COBOL para a manipulação de informações em mainframe, começa a se desenvolver a partir do UNIX (1969) para uma série de plataformas, como os computadores da Apple, e até hoje para os sistemas Android, MacOS e IOS presentes em <i>notebooks</i> e smartphones. Contudo, o SO popularizado na base MS/DOS, da microsoft, para computadores da IBM, ganharam enorme popularidade nos anos 1980 e resultaria no notório Windows
A internet	X	X	As primeiras redes de computadores surgiram no departamento de defesa norte americano, com a iniciativa ARPAnet (1969) e a padronização dos protocolos TCP/IP - de domínio público. Até 1985 a internet era usada apenas por pesquisadores e cientistas, sendo popularizada nos anos 1990 com a <i>World Wide Web (WWW)</i> , do CERN, incorporando recursos gráficos e textos com determinações de palavras e <i>links</i> . A proliferação de navegadores em meados dos anos 1990 já estabelecia um contexto de uso em massa da tecnologia.

Fonte: Elaboração própria a partir de Mowery e Rosenberg (1998), Mowery e Simcoe (2001) e Tigre e Noronha (2013)

Os avanços na eletrônica (tabela 2) criaram ao menos três novas indústrias, segundo Mowery e Rosenberg (1998): computadores eletrônicos, software de computador e semicondutores. Essas três indústrias estavam ligadas em duas principais inovações: a dos transistores e do computador. E, no caso americano, a participação dos setores militares como demandantes das novas tecnologias e financiadores

⁸ A máquina analítica de Charles Babbage (1791-1871) foi descrita pela primeira vez em 1837, com estrutura lógica muito semelhante aos computadores modernos. Contudo, seus esforços nunca foram inteiramente finalizados (FUEGI e FRANCIS, 2003).

de P&D explicaria em alguma medida o pioneirismo e sucesso dos EUA nessas tecnologias e inovações (MOWERY E SIMCOE, 2001)

Um dos resultados da participação em nível federal do governo norte americano como financiador de P&D e demandante dos novos produtos, sobretudo dos semicondutores, foi o surgimento de uma estrutura para o processo de inovação e comercialização de novas tecnologias. Essa nova estruturação, quando comparada com os anos 1940 e 1950, seria refletida no papel de pequenas firmas⁹ na introdução de novos produtos - alimentando um espaço concorrencial dinâmico em um impiedoso ambiente de competição.

Um movimento semelhante ao dos semicondutores aconteceu com o desenvolvimento do computador. Originalmente preocupados com as questões da Segunda Guerra Mundial e com a Guerra Fria, o governo americano começou a financiar projetos para calculadoras com alta capacidade de resolução de problemas militares, com participação das universidades no desenvolvimento dessas tecnologias (MOWERY e ROSENBERG, 1998). Durante as primeiras duas décadas da história da computação, a IBM detinha cerca de 70% do mercado mundial devido exigências de escala em sistemas de grande porte a partir de componentes eletrônicos (TIGRE E NORONHA, 2013). De uso comercial e com pequena concorrência, os mainframes dominariam a computação de grande volume de dados com soluções exclusivas em termos de *software* e *hardware*, e seriam usados por técnicos, engenheiros e cientistas.

A introdução do que depois se denominou minicomputador, ou *Personal Computer* (PC), dependeria dos avanços na década de 1970 dos microprocessadores. A chamada lei Monroe de 1975, que estima que o número de transistores em cada chip dobraria em cerca de 18 meses mantendo o mesmo custo, é referência para os demais dispositivos eletrônicos e forma a base das mudanças tecnológicas sentidas na quinta onda (TIGRE E NORONHA, 2013).

Novas firmas entrantes, como o caso da Microsoft e Apple, superavam as empresas líderes já estabelecidas por não estarem atreladas a determinadas rotas tecnológicas (*path dependence*), tendo maior liberdade para inovar e criar novos mercados (TIGRE E NORONHA, 2013). Por exemplo, a Apple lançaria o primeiro PC, o Apple I, em 1976, precisando acrescentar apenas um teclado e um monitor. Por sua vez, o Apple II de 1977 mostrou que as novas tecnologias simplificavam o processo de financiamento, montagem e desenvolvimento desses produtos, em um sistema que apresentava apenas uma fração do que era fabricado em termos de mainframes (TIGRE E NORONHA, 2013). A IBM, por sua vez, entrou tarde nesse segmento, com seu aparelho de 1982 que popularizou o termo *PC* e utilizava *chip* intel 8088 e software MS/DOS da então nascente Microsoft.

A informática se popularizaria e seria massificada nos anos 1980. Muito diferente do que observava-se nas décadas de 1950 e 1960, os computadores passaram a ser utilizados não apenas por cientistas, engenheiros e grandes repartições públicas, mas por empresas e indivíduos no seu dia a dia. Para que isso fosse viável, houve um momento de gestação das principais tecnologias antes dos semicondutores em 1970. O *Big-bang* de Perez (2004), alicerçado numa forte participação do estado americano como demandante inicial de novas tecnologias - sobretudo o departamento militar - e como financiador de P&D preparou um cenário concorrencial e demandante propício ao surgimento de novas empresas que fossem intensamente dinâmicas e competitivas na criação de novos processos, produtos e mercados.

A ligação do que era até então um emaranhado de dispositivos eletrônicos com indivíduos comuns necessitava de Sistemas Operacionais (SOs) com interfaces simplificadas e amigáveis. O primeiro SO moderno da computação foi criado por desenvolvedores da AT&T para tornar o seu contato e manipulação de informações com mainframes mais fácil e ágil. Surgia em 1969 o UNIX, um sistema

⁹ Firms que trabalhavam com máquinas e equipamentos para escritório, como IBM, ou telefonia, no caso da AT&T, tiveram participação relevante nos avanços dos semicondutores. Porém, o surgimento de outras empresas, como a Intel (1969), ampliaria o espaço competitivo e as trajetórias tecnológicas (Mowery e Rosenberg, 1998).

multitarefa capaz de executar dezenas de processos de forma simples e rápida, se tornando o sistema base de SOs modernos como o MacOS da apple e as aplicações em Linux.

Entre os anos 1970 e 1980 seriam viabilizados comercialmente jogos eletrônicos, consoles, walkmans e videocassetes. A indústria de games deixaria o fliperama e entraria nos lares americanos, asiáticos e europeus, numa nova forma de entretenimento (AMORIN, 2006). O *Walkman* e o videocassete encurtaram distâncias entre a indústria fonográfica e cinematográfica com o ouvinte e o espectador. Começava-se a ouvir música nas ruas e assistir filmes em casa através de locadoras que forneciam os principais lançamentos do cinema. No final dos anos 1970 e início dos anos 1980, o próprio cinema passava por uma revolução de efeitos especiais, com animatrônicos e a recente *Computer Graphic Imagery (CGI)* em filmes como *Star Wars: Uma nova esperança* (1977) e *Tron* (1982), que curiosamente se passa em um mundo digital.

Por fim, não se pode esquecer aquela que, para alguns, pode se constituir numa nova revolução radical: a popularização da internet (ALBUQUERQUE, 2021). A conexão de computadores em redes de comunicação interna com protocolos claros que simplificavam o roteamento de dados tem início no final dos anos 1960 com a DARPA e a primeira rede de computadores, a ARPAnet - precursora dos dados em pacote e do primeiro correio eletrônico em 1972 (MOWERY E SIMCOE, 2001).

Mais uma vez a participação do departamento de defesa norte americano seria importante para o estabelecimento de uma inovação, padronizando protocolos como TCP/IP colocando-o em domínio público e sendo o padrão base do Sistema Operacional UNIX (MOWERY E SIMCOE, 2001). Como os mainframes, a internet nos anos 1970 e 1980 foi utilizada rudimentarmente por cientistas, pesquisadores e engenheiros. O avanço para a comercialização e massificação do uso aconteceria nos anos 1990, com o lançamento da *World Wide Web (WWW)*. Os cientistas do CERN Tim Berners-lee e Robert Calillau realizaram, no final daquele ano, uma comunicação bem sucedida entre um cliente e um servidor através da internet. Essa comunicação mostrava um documento em HTML que acompanhava um protocolo de recuperação HTTP. O diferencial do documento HTML era a incorporação de uma série de recursos multimídias de imagem e de texto, tornando a interação mais dinâmica (MOWERY E SIMCOE; ALBUQUERQUE, 2021).

A popularização e comercialização da internet aconteceria durante todo os anos 1990, com uma infinidade de novas empresas relacionadas com o novo mecanismo eletrônico - sendo a Netscape a primeira a lançar um *Browser*¹⁰ que permitia a navegação na internet e que logo foi seguida e superada por Microsoft - na integração do então nascente *internet explorer* com o SO da empresa, o Windows (TIGRE E NORONHA, 2013; GREENSTEIN, 2015).

O surgimento da internet abriu um enorme leque de possibilidades no comércio eletrônico, com empresas como a *Amazon* realizando entregas cada vez mais rápidas, aplicativos de compartilhamento de caronas facilitando a circulação de indivíduos e até mesmo novos meios de locação de imóveis. Isso, aliado com tecnologias móveis e inteligentes como o *smartphone* e a contínua necessidade da utilização de *notebooks* e *desktops* para trabalhos empresariais, comerciais e até mesmo em casa com o *home-office*, colocaram a internet numa posição central e singular no desenvolvimento de novas tecnologias, baseada menos na venda de *hardwares* e no licenciamento de *softwares* e mais na interconexão entre eles.

As décadas de 1970 e 1980 parecem se adequar ao que Carlota Perez (2004) denomina de irrupção: uma gama considerável de inovações, com um grau elevado de investimentos no novo paradigma e a ascensão de novas indústrias e novos mercados. Entre 1980 e 1990 temos a constelação inovativa completa, com uma nova infra-estrutura e instituições em conformidade com as características dos novos paradigmas. Apesar da importância da internet e suas características como possível inovação radical e um novo *Big-Bang*, quando alinhamos as características inovativas que partem da segunda

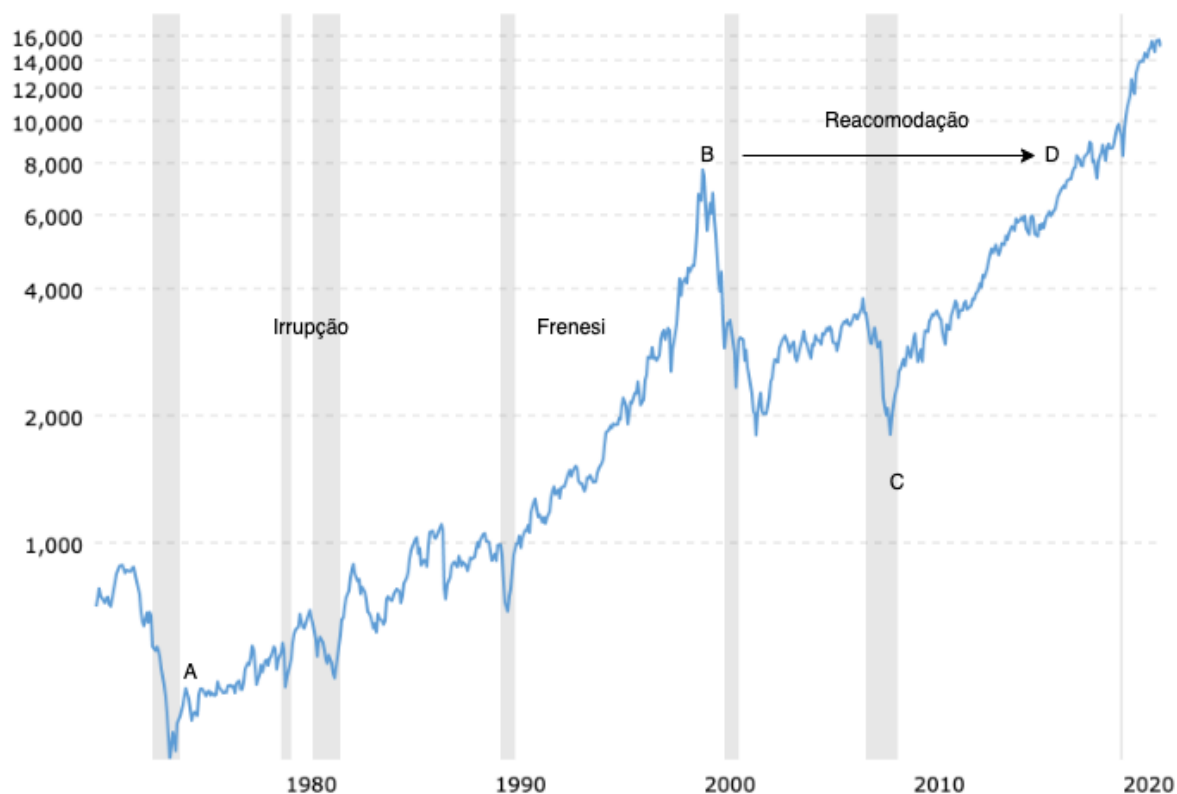
¹⁰ Popularmente conhecido como navegador

metade do século passado aos dias de hoje, tudo indica que permanecemos na quinta onda das TICs, e não numa possível sexta onda.

Ao menos três argumentos contrários a idéia apresentada podem ser levantados: (i) o curto intervalo entre o surgimento da microeletrônica e do microprocessador com o surgimento da internet, cerca de apenas quinze anos - nem um terço do tempo de duração de uma revolução tecnológica. E mesmo assim, a internet tem raízes ainda nos anos 1970, dentro das TICs; (ii) A trajetória dos ativos financeiros justifica, em partes, o atual paradigma tecnoeconômico dos semicondutores; (iii) a internet, como inovação, tem posição central na segunda metade da onda das TICs e no desenvolvimento das tecnologias da indústria 4.0 na interligação do físico com o não físico.

Vejam os que mostram os ativos financeiros (gráfico 1). A irrupção se concentra entre 1970 e meados dos anos 1980 (ponto A), numa ascensão no valor de fechamento do índice. O frenesi se situa nos anos 1990, no advento das empresas .com¹¹ e elevação nos preços dos ativos - com auge na virada do milênio (ponto B). A emergência de diversas empresas relacionadas com sites e com a tecnologia da internet gerou uma ansiedade no mercado que culminou na bolha da internet, na virada do milênio (ponto B), ultrapassando os 5 mil pontos no seu pico máximo.

Gráfico 1: Série histórica do Nasdaq¹² Composite



Fonte: Elaboração própria a partir do Nasdaq Composite (2022)

¹¹ As ditas empresas .com (ou *dot.com*) são aquelas relacionadas com a internet, mais especificamente sites e plataformas de serviço que surgiram com o advento da *World Wide Web*. Das sobreviventes da bolha do início dos anos 2000, temos Google, Amazon, eBay, dentre outras. Casos notórios de falência são os da freeinternet.com e WorldCom.

¹² Os dados estão ajustados pela inflação conforme o CPI. Cada ponto representa o valor de fechamento mensal. O índice foi escolhido devido as características desde sua fundação, nos anos 1970: empresas do setor de eletrônica, informática, telecomunicações, etc (NASDAQ COMPOSITE, 2022).

O término da crise das *.com* não garantiria um intervalo significativo de estabilidade no mercado financeiro, e teria ligação com a crise de 2008. Com o estouro da bolha especulativa das firmas da internet, muitos investidores reorientaram as suas aplicações para investimentos mais seguros, sendo os imóveis um dos principais destinos. A recomposição de portfólios, aliada a redução da taxa de juros para amortecer o impacto das perdas da bolha da internet, dentre outros fatores, desdobrou-se em alta histórica do mercado imobiliário americano. Como a maior parte das hipotecas que sustentavam a bolha tinham o risco do tipo *subprime*, temos a crise de 2008 - um segundo momento de retração no período de acomodação (ponto C) (TORRES FILHO, 2015). O momento de acomodação para a sinergia ainda é incerto, mas em termos de indicadores financeiros, seria o ponto D, na década das tecnologias 4.0.

Segundo Brixner *et al* (2019), as principais tecnologias que compõe a Indústria 4.0 são, fundamentalmente, de melhoria contínua de componentes em simbiose entre *software* e *hardware*, e boa parte dessas tecnologias foram desenvolvidas e gestadas nos anos 1990 e 2000. Com a interrupção do período de acomodação (intervalo entre B e D), essas tecnologias retornam com orientação do estado e dos agentes privados, em maior coordenação e sinergia do que observado nos anos 1990, o que é refletido em programas como “*Industrie 4.0*” e “*Advanced Manufacturing Partnership*”.

Tabela 3: As principais tecnologias 4.0

Tecnologia	Componentes/dispositivos	Hardware	Software	Surgimento
Internet das coisas	Sensores, redes, sistemas, codificadores e decodificadores	X	X	Dispositivos existentes desde os anos 1990
Sistemas ciberfísicos	Sistemas de controle em rede, sistemas operacionais, Middleware	X	X	Nível industrial a partir de 2008
Inteligência Artificial	Algoritmos, modelos matemáticos, software		X	Com raízes antigas, remonta os anos 1950
Realidade virtual	Dispositivos para captura de movimento em um espaço tridimensional	X	X	Como conceito, anos 1940. Como tecnologia, anos 1970 e 1980
Realidade aumentada	Dispositivos para localizar objetos tridimensionais usando o espaço real como referência		X	Em paralelo com a realidade virtual, mas como termo foi utilizado pela <i>Boeing</i> nos anos 1990 para uma ferramenta de processo de fabricação
Manufatura digital aditiva	Impressoras e desenhos digitais	X	X	Anos 1980
Manufatura digital subtrativa	Maquinas de controle numérico(cortador a laser, tornos, etc) e projeto de software	X	X	O controle numérico surge nos anos 1950. Por computador, final dos anos 1970
Gêmeo digital	Software de simulação, instrumentos de reconhecimento de dados baseados na internet das coisas	X	X	Anos 1990
Realidade mista	Hardware de realidade aumentada e virtual combinados		X	Anos 1990
Computação em nuvem	Servidores	X		Final dos anos 1960 e anos 1970, com desenvolvimento tardio nos anos 2000 com as empresas <i>.com</i> (Amazon, Google, etc)
Big Data	Base de dados não relacionais e não estruturados	X	X	As primeiras minerações e análises de dados foram realizadas nos anos 2000
Robótica	Robôs, sistemas embarcados, algoritmos e inteligência artificial	X	X	Década de 1970
Blockchain	Bases de dados distribuídas e cifradas		X	Anos 2000

Fonte: Elaboração própria a partir de Brixner *et al* (2019).

Ao que tudo indica, estamos passando por um momento de Sinergia ou ainda estamos no momento de acomodação - datado após os anos 2010 com indefinições oriundas, dentre outros pontos, da crise do subprime e seus desdobramentos na década de 2010. Pode-se defender a sinergia em dois pontos: i. Os dados verificados do índice Nasdaq recuperaram e ultrapassam o valor do momento de pico da bolha da internet em meados de 2015 e 2016; ii. entre essas duas décadas, há um fortalecimento nas tecnologias de informação e comunicação que alteraram de forma substantiva a maneira como a sociedade se comporta - bem como as instituições econômicas - em um mundo muito mais interconectado e interativo. Sobre o primeiro ponto, pode-se argumentar que ainda estamos no período de acomodação, o que até o momento não estaria de acordo com a trajetória dos ativos e nem com a evolução tecnológica exposta até aqui. Outra questão importante a se levantar é o contexto conjuntural. A sinergia - localizada logo após a acomodação - marca momentos de prosperidade econômica e social, o que não se verifica ao longo dos anos 2010 e principalmente na sua virada, com a crise da covid-19 e questões de diplomacia global como o enfrentamento bélico entre Rússia e Ucrânia. Ao considerar tudo isso, podemos estar ainda no momento de acomodação - mas isso dependerá essencialmente da precificação tecnológica futura e do seu comportamento ao longo dos próximos anos.

O segundo ponto permite razoáveis considerações, como mostra a tabela 3. Algumas dessas tecnologias estão em pleno desenvolvimento nos últimos trinta anos. A computação em nuvem é o fornecimento de serviços que incluem armazenamento de informações, banco de dados e até mesmo softwares. Esse tipo de serviço depende de servidores de alta velocidade, operando em escala global e com baixo custo. A denominada *Big data* tem uma certa relação com servidores de alta velocidade, uma vez que são dados em volumes e velocidades tão elevadas que não são suportados por *softwares* corriqueiros de processamento (DIEBOLD, 2003; RATNER, 2003).

É a partir dos anos 1990 que a elaboração de novas linguagens de programação, novos softwares e componentes físicos cada vez mais robustos e com maior capacidade de armazenamento - mais baratos e menores, em termos de produção - permitem o que se denomina de sistemas ciberfísicos, central para a indústria 4.0. A definição de sistemas ciberfísicos não é consolidada na literatura, com diversas interpretações (LEE, 2008; BAHETI e GIL, 2011, ZAMIFRESCU *et al*, 2013, LASI *et al*, 2014b). Para esse trabalho, considera-se como sistemas ciberfísicos aqueles construídos dependentes da integração de algoritmos computacionais e componentes físicos, permitindo a interação entre sistemas embarcados baseados em softwares de alto desempenho e sistemas dedicados a interface de usuários integradas em redes digitais, demandando uma estrutura específica de redes, com ou sem fio (UNIDO, 2016). A robótica, por sua vez, envolve aprendizado na automação de dispositivos - com a imitação das ações e da inteligência humana, convergindo com o próprio desenvolvimento da inteligência artificial. Como essas funções cognitivas operam ainda é fonte de amplo debate, mas a inteligência artificial em si já é percebida na precificação de determinados setores da economia¹³. Cabe uma ressalva sobre duas tecnologias postas na tabela 3: tanto a *Big data* como a computação em nuvem potencializam o acesso de informações e, apesar da inteligência artificial necessitar de algum grau de controle programacional, a potência de replicação e automação de determinados algoritmos nesse panorama é singular, uma vez que nunca tivemos disponível em nuvem um volume tão grande de informações.

Já os gêmeos digitais, conforme Glaessgen e Stargel (2012), oferecem simulações sincronizando o sistema virtual e real para realizar diagnósticos ou prognósticos sem incorrer em um processo real, podendo otimizar a operação de sistemas produtivos, pesquisas médicas e aeroespaciais. Em alguma medida os gêmeos virtuais estão vinculados com as realidades virtuais e mistas, e atualmente o denominado metaverso mescla realidade aumentada e virtual em um mundo de completa imersão no qual o comportamento individual em um mundo virtual pode ser executado para além de jogos eletrônicos, com a realização de compras e interações em shows.

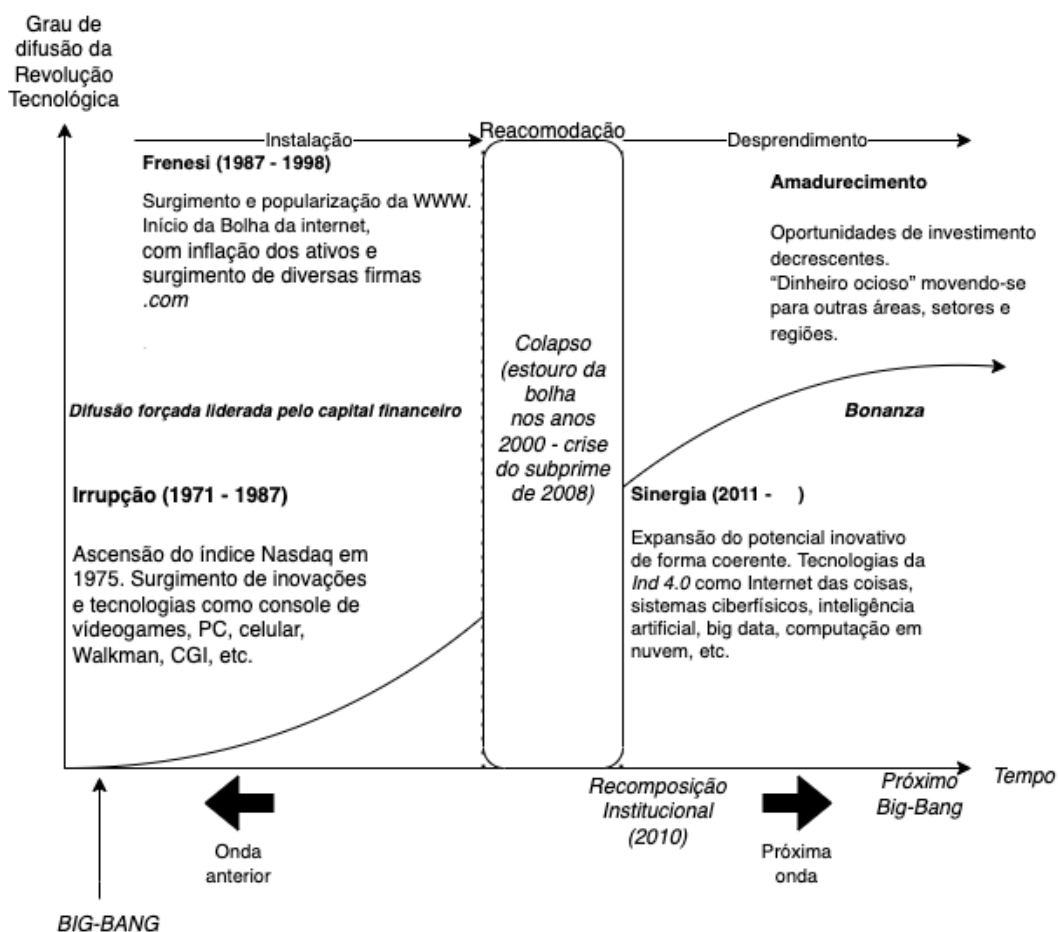
¹³ Para mais informações sobre precificação algorítmica e concorrência na era digital, ver OECD 2017.

Dois conceitos mais antigos, realidade virtual e realidade aumentada, remontam de antes dos anos 1980 e o primeiro se refere ao uso de determinados dispositivos físicos para a visualização e interação em um ambiente virtual (WRIGHT, 1987), enquanto que o segundo se refere a representações tridimensionais no mundo real a partir de alguns dispositivos. A realidade virtual tem uso desde os anos 1980 em algumas indústrias (automotiva, militar e pesquisa médica), e o mesmo pode-se dizer da realidade aumentada, como por exemplo em algumas simulações militares do campo naval e em consoles de videogame

A prototipagem rápida e a manufatura aditiva ganharam amplo destaque ainda no começo da década passada, como uma possibilidade - sobretudo com a impressora 3D - de se produzir bens com alta precisão, customizados e de forma automática. A manufatura digital envolve uma série de dispositivos instrumentais desenvolvidos e utilizados desde os anos 1950 (PEASE, 1952) que incluem maquinário controlado numericamente - seja do tipo aditivo ou do tipo subtrativo. A tecnologia 3D apresenta uma série de obstáculos em relação aos custos, e apesar do seu desenvolvimento da última década, é utilizada apenas em componentes específicos das áreas aeroespacial, de construção e de medicina.

Encerrando as listas de tecnologias, o *Blockchain* é costumeiramente lembrado nos debates sobre o papel das criptomoedas nos últimos anos, mas a tecnologia em si é muito mais do que isso. Como estrutura de dados descentralizados, criptografados e distribuídos, permite transações em rede auto-organizadas onde a modificação de qualquer nó depende da validação dos demais usuários (NAKAMOTO, 2008).

Figura 5: Retomando a quinta onda revolucionária das TICs



Fonte: Elaboração própria a partir de Perez (2004)

Agora podemos refazer a onda de revolução tecnológica. Como podemos ver, a irrupção das TICs acontece entre 1970 e 1980, com o surgimento dos semicondutores e, posteriormente, do *Personal Computer*. Essas duas inovações, aliadas com a introdução popular da *internet* nos anos 1990, marcam o momento de estouro onde diversas empresas surgem, compondo uma constelação institucional no momento do Frenesi (1990-2000), que tem seu auge na bolha da internet na virada do milênio. O intervalo de acomodação ocorre após a crise da internet e a crise de 2008, que apesar de não estar diretamente ligada aos ativos das firmas de tecnologia da informação e da comunicação, marca uma readequação de portfólios para ativos mais tradicionais devido o rompimento da bolha de internet no início do século XXI.

Na década passada surge o termo *Indústria 4.0*, com o objetivo de marcar uma nova etapa na revolução industrial. Utilizando o arcabouço de paradigmas tecnológicos e das revoluções tecnológicas, percebemos que não temos uma nova onda, tão pouco um novo momento na revolução industrial, mas sim o desenvolvimento de tecnologias dentro dos paradigmas das TICs, com um maior dinamismo e integração entre *software* e *hardware*, deixando de lado apenas a venda de componentes físicos e o licenciamento de *softwares* para privilegiar a interatividade e conexão entre esses dispositivos. Temos uma modernização do aparato produtivo, ainda que exista indefinição se estamos num momento sinérgico ou se ainda estamos no período de acomodação de ativos - podendo ser o início do primeiro ou o fim do último, quando consideramos questões exógenas incompatíveis com um momento de Bonanza.

Ainda há uma série de questões que devem ser observadas com maior cuidado, como por exemplo a financeirização dos ativos que podem colocar em dúvida o direcionamento do capital produtivo, ou até mesmo a duração da quinta onda como um todo - já ultrapassando o meio século estimado e proposto pela literatura. Mesmo considerando o atual momento como de “sinergia”, estaríamos apenas no seu início incipiente. Essas questões motivam um debate mais franco sobre as características da manufatura avançada nesse século.

5. Conclusões

Em certa feita, Schumpeter afirmou que “A nova revolução industrial tornou-se uma frase muito comum” (SCHUMPETER, 1989, p. 247, tradução livre). Esse trabalho partiu da pertinência real em denominar a digitalização da manufatura e a fusão de componentes físicos e não físicos como uma nova etapa do processo industrial global. O conjunto das tecnologias baseadas em três drives - físicos, digitais e biológicos - interligados que ultrapassam a venda usual de componentes de *hardware* e os licenciamentos costumeiros de *software* dos anos 1990 e 2000 abrem um leque de interação, comunicabilidade e interconexão entre diversas tecnologias. Contudo, chamar o atual processo tecnológico e inovativo que estamos passando - baseado nas políticas lançadas pela Alemanha e pelos EUA ainda no início da década, em 2011 - de uma *quarta* revolução industrial, se mostra uma contemplação limitada e insatisfatória dos processos tecnoeconômicos observados na metade do século passado e início do século XXI.

Coloca-se de lado, portanto, a abordagem de autores como Balasingham (2016) e utiliza-se o conceito sistêmico de inovação, numa perspectiva histórica, dentro de características econômicas, institucionais e tecnocientíficas para compreender o conjunto de tecnologias digitais que se tornou notório na última década mas, como foi apresentado, estão em gestação no mínimo nos últimos trinta anos (1990-2020) e compreendem-se na quinta onda de Revolução tecnológica, caracterizados por Carlota Perez (2004) como TICs e com ponto inicial na década de 1970.

De 1970 até o final dos anos 1990, novas firmas, tecnologias, inovações e infraestrutura se manifestaram na economia e na sociedade - por meio da microeletrônica, do computador no lar de cada pessoa, na capacidade de armazenamento de dados derivados dos microprocessadores ou até mesmo jogos eletrônicos. A popularidade e comercialização da internet nos anos 1990, e seu potencial comercial e conectivo, fez surgir uma enormidade de firmas, empresas e novas estruturas. Apesar de apresentar características radicais, a internet foi gestada no final dos anos 1960 com a primeira rede de computadores

(ARPAnet) e apenas se tornou viável devido uma longa trajetória de massificação dos semicondutores, computadores e sistemas operacionais - que se apresentavam cada vez mais potentes, com custo menores e com alta capacidade informacional e de comunicação entre usuário e empresa, viabilizando a *www*.

O estouro da bolha das *.com* nos anos 2000, em conjunto com a crise do subprime em 2008, delimita a participação frenética do capital privado na exploração desordenada das tecnologias TICs - ao menos ao que sabemos até agora pelo Nasdaq composite, que aponta uma superação da marca máxima da bolha *.com* apenas em meados dos anos 2010. Esse fator, entretanto, não descarta a permanência na acomodação, uma vez que o conjunto social e econômico não apresentam estabilidade nem prosperidade como em outros períodos da história - marcando a superação da crise para o momento de sinergia e bonança, como a *Belle Époque* e a era vitoriana.

O que se verifica ao considerarmos as tecnologias postas como características da indústria 4.0 é uma modernização do que já tínhamos, onde *software* e *hardware* são comercializados e utilizados em conjunto para a automação, transmissão de alto volume de dados e desenvolvimento de inteligência artificial, tudo isso abraçado com a capacidade cada vez maior de conexão e de possibilidades da internet - e quando colocado em perspectiva histórica e inovativa, o possível fim da acomodação e o início da fase de desprendimento das TICs, ou seja, a Bonanza com o capital financeiro orientado e máxima expansão das possibilidades técnicas do atual paradigma.

A importância da investigação do tema sob a luz do arcabouço teórico evolucionário abre uma enormidade de possibilidades interpretativas, sejam aquelas que defendem a internet como revolução radical iniciando uma sexta onda, ou mesmo o ceticismo do final do período de acomodação e início da sinergia, uma vez que a composição da economia como um todo não se mostra tão animadora para uma defesa de um momento sinérgico. Ainda assim, se torna legítima dentro do arcabouço teórico exposto. Mais que isso, exclui-se o conceito de uma quarta revolução industrial para uma visão mais profunda e abrangente da coevolução tecnológica que vivemos - e que, não como revolução, coloca-se como uma nova modernização promissora, tanto do ponto de vista produtivo como teórico.

6. Bibliografia

- ACATECH (National Academy of Science and Engineering). Securing the future of Germany manufacturing industry – Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 – Final report, 2013.
- ALBUQUERQUE, E.M. Revoluções tecnológicas e general purpose technologies: Mudança técnica, dinâmica e transformações do capitalismo. In: RAPINI, M. S. (Org.) ; RUFFONI, J. (Org.) ; SILVA, L. A. (Org.) ; ALBUQUERQUE, E. M. Economia da ciência, tecnologia e inovação. Fundamentos teóricos e a economia global. 2. ed. Belo Horizonte: Cedeplar-UFMG, 2021. v. 1. 711p .
- AMORIN, A. A origem dos jogos eletrônicos. USP, 2006.
- ARBIX, G.; MIRANDA, Z.; TOLEDO, D. C. de; ZANCUL, E. de S. Made in China 2025 e Industrie 4.0: a difícil transição chinesa do catching up à economia puxada pela inovação. Tempo Social, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 143-170, 2018. DOI: 10.11606/0103-2070.ts.2018.144303. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/ts/article/view/144303>>. Acesso em: 18 nov. 2021.
- AREND, Marcelo. Revoluções tecnológicas, finanças internacionais e estratégias de desenvolvimento: um approach neo-schumpeteriano . Ensaios FEE (Impresso). 33. 363-396, 2012.
- BALASINGHAM, K. Industry 4.0: Securing the Future for German Manufacturing Companies. 16 p. Dissertação (Mestrado), University of Twente. Twente, 2016.
- BAHETI, R; Gill, H. “Cyber-physical systems”, The Impact of Control Technology, vol. 12, Nº 1, pp. 161-166, 2011.
- BRIXNER, C. et al. Industria 4.0: ¿intensificación del paradigma TIC o nuevo paradigma tecnoorganizacional? Centro Interdisciplinario de Estudios en Ciencia, Tecnología e Innovación (CIECTI). 2019.

CONCEIÇÃO, C.S.; FARIA, L.A. Padrões históricos da mudança tecnológica e ondas longas do desenvolvimento capitalista. In: DATHEIN, R., org. Desenvolvimentismo: o conceito, as bases teóricas e as políticas. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2003.

DIEBOLD, F. “Big data dynamic factor models for macroeconomic measurement and forecasting”, en Dewatripont, M., Hansen, L. P. y Turnovsky, S. (eds.), *Advances in Economics and Econometrics: Theory and Applications*, Eighth World Congress of the Econometric Society, Cambridge University Press, pp. 115-122, 2003.

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

DUEÑAS, E.; RODRIGUES, I.; ORSINI, H. Impressão 3D de próteses externas para a reabilitação de animais silvestres mutilados - revisão de literatura. O local frente ao global: pesquisa, ciência e os povos indígenas do Brasil. XXIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XIX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e IX Encontro de Iniciação à Docência - Universidade do Vale do Paraíba, 2019.

FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo). Tecnologia que sequenciou coronavírus em 48 horas permitirá monitorar epidemia em tempo real. Disponível em: < <https://agencia.fapesp.br/tecnologia-que-sequenciou-coronavirus-em-48-horas-permitira-monitorar-epidemia-em-tempo-real/32637/>>, consultado em 30/11/2021. Agência FAPESP, 2020.

FREEMAN, C. The National System of Innovation in historical perspective. *Cambridge Journal of Economics*, v. 19, p. 5-24, 1995.

FUEGI, J; FRANCIS, J. "Lovelace & Babbage and the creation of the 1843 'notes'," in *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 25, no. 4, pp. 16-26, Oct.-Dec. 2003.

GLAESSGEN, E; STARGEL, D. “The digital twin paradigm for future nasa and us Air Force vehicles”, *Adaptive Structures Conference 14th aiaa*, p. 1818, 2012.

GREENSTEIN, S. M. *How the Internet Became Commercial: Innovation, Privatization, and the Birth of a New Network*. 2015

HOBSBAWM, E. J. *A era dos impérios – 1875-1914*. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1988.

HOBSBAWM, E.J. *A Era dos Extremos – O Breve Século XX (1914-1991)*. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

ITU (Telecommunication Standardization Sector). *Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges*. Published in Switzerland Geneva, 2018.

KAGERMANN, H. et al. (2011), “Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4 industriellen Revolution”. *vdi nachrichten*, 13 (2). Disponível em <<https://www.bmwi.de/Redaktion/de/Publikationen/Digitale-Welt/digitale-strategie-2025.html>>, consultado em 28/11/2021.

KINDLEBERGER, C. P. *Manias, pânico e crashes: um histórico das crises financeiras*. Porto Alegre: Ortiz, 1992.

LASI, H. Et al. “Industry 4.0”, *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6. Nº 4, pp. 239-242, 2014b

LEE, E. “Cyber physical systems: Design challenges”, trabalho presentado en el 11th ieeee Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (isorc), pp. 363-369, 2008.

LUNDVALL, B.A. *National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*, London, 1992.

MOWERY, D.C.; ROSENBERG, N. *Paths of Innovation: Technological Change in 20th Century America*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1998.

MOWERY, D.C.; SIMCOE, T. Is the Internet a US invention?—An economic and technological history of computer networking. *Research Policy* 31, 1369–1387, 2002.

NAKAMOTO, S. “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System”, 2008.

NASDAQ COMPOSITE. Nasdaq Composite Index. Disponível em <<https://www.nasdaq.com/market-activity/index/comp>>. Acesso em novembro de 2021.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). U.S. Department of transportation releases policy on automated vehicle development. 2013. Acesso em Nov, 2021, disponível em: <<https://www.transportation.gov/briefing-room/us-department-transportation-releases-policy-automated-vehicle-development>>.

OECD. Algorithms and Collusion: Competition Policy in the Digital Age. 2017.

PEASE, W. “An automatic machine tool”, Scientific American, vol. 187, Nº 3, pp. 101-115, 1952.

PEREZ, C. Structural change and assimilation of new technologies in the economic and social systems. Futures, v. 15, n.5, p. 357-375, out. 1983.

PEREZ, C. Revoluciones tecnológicas e capital financeiro: la dinámica grandes burbujas financieras y las épocas de bonanza. México: Siglo XXI, 2004.

RABELLO, R.; RABELLO, M.; FECCHIO, R.S.; MORAES, C.; DIAS, P.E.M.; PALMA, B.; DAVANCO, R.R. Utilização de Tecnologia 3D Para Reconstituição Protética de Carapaça de Jabuti (*Chelonoidis carbonaria*) - Relato de Caso. In: Congresso da Sociedade de Zoológicos e Aquários do Brasil-SZB, 40., 2016, João Pessoa. Anais. João Pessoa: MED Design, 2016.

RATNER, B. Statistical Modeling and Analysis for Database Marketing: Effective Techniques for Mining Big Data. Chapman & Hall/crc, 2003.

ROSENBERG, N.; FRISCHTAK, C. R. Technological Innovation and Long Waves (Stanford University, January 1983).

SCHUMPETER, J. A. Business cycles: a theoretical, historical and statistical analysis of the capitalist process. Philadelphia: Porcupine, 1989 [1939].

SCHWAB, Klaus. The Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum, 2016.

SMITH, Adam. A riqueza das nações: investigação sobre sua natureza e suas causas. São Paulo (Col. “Os economistas”): Abril Cultural, 1983.

TIGRE, P. B.; NORONHA, V. B. Do mainframe à nuvem: inovações, estrutura industrial e modelos de negócios nas tecnologias da informação e da comunicação. Revista de Administração, [S. l.], v. 48, n. 1, p. 114-127, 2013. DOI: 10.5700/rausp1077. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rausp/article/view/55835>. Acesso em: 4 fev. 2022.

TORRES FILHO, Ernani Teixeira. O estouro de bolhas especulativas recentes: os casos dos Estados Unidos e do Japão. Texto para discussão 2096. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília: Rio de Janeiro: Ipea. Maio, 2015. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/4409/1/td_2096.pdf. Acesso em 15. dez.2021.

UNIDO. Industry 4.0: Opportunities and Challenges of the New Industrial Revolution for Developing Countries and Economies in Transition. Panel Discussion. United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria, 2016.

WRIGHT, R. (1987). “Virtual reality”, The Sciences, vol. 27, Nº 6, pp. 8-10, 1987.

ZAMIFRESCU, C. *Et al* (2013). “Preliminary insides for an anthropocentric cyber-physical reference architecture of the smart factory”, Studies in Informatics and Control, vol. 22, Nº 3, pp. 269-278.