

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO
PUC-SP

Milton Miranda Filho

**As Tecnologias Digitais e a Transformação Verde: um estudo com base
no modelo teórico de Carlota Perez**

MESTRADO EM ECONOMIA

São Paulo
2025

Milton Miranda Filho

**As Tecnologias Digitais e a Transformação Verde: um estudo com base
no modelo teórico de Carlota Perez**

MESTRADO EM ECONOMIA

Dissertação apresentada à Banca
Examinadora da Pontifícia
Universidade Católica de São
Paulo, como exigência parcial para
obtenção do título de Mestre em
Economia, sob a orientação do
Prof. Dr. João Batista Pamplona.

São Paulo

2025

M672

Miranda Filho, Milton

As tecnologias digitais e a transformação verde: um estudo com base no modelo de Carlota Perez. – São Paulo: [s.n.], 2025.

103 p.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Economia) -- Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Economia da PUC-SP, 2025.

Orientador: Prof. Doutor João Batista Pamplona.

1. Teoria de Carlota Perez. 2. Tecnologias digitais. 3. Transformação verde. I. Pamplona, João Batista. II. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Economia da PUC-SP. III. Título.

CDD 330

Milton Miranda Filho

**As Tecnologias Digitais e a Transformação Verde: um estudo com base
no modelo teórico de Carlota Perez**

Dissertação apresentada à Banca
Examinadora da Pontifícia
Universidade Católica de São
Paulo, como exigência parcial para
obtenção do título de Mestre em
Economia, sob a orientação do
Prof. Dr. João Batista Pamplona.

Aprovado em: __de ____de 2025.

BANCA EXAMINADORA

**O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento
Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Processo número 88887.805543/2023-00**

AGRADECIMENTOS

Durante esses dois anos de dedicação, minha vida passou por grandes desafios e mudanças. Perdi meu alicerce, minha querida mãe, Rogéria Fernandes Miranda, e esse momento foi de imensa dor. No entanto, a fé foi fundamental para que eu conseguisse me dedicar ao que era necessário, mesmo em meio à perda. Antes de qualquer agradecimento, preciso, primeiramente, agradecer a Deus por me dar força e coragem para seguir adiante.

Em seguida, quero expressar minha eterna gratidão ao meu pai, Milton Miranda, que é a minha maior inspiração. Tenho como objetivo em minha vida proporcionar a ele o orgulho que ele merece.

Agradeço também ao meu orientador, João Batista Pamplona, pela orientação constante, pelas mudanças e ajustes na dissertação, sempre me guiando para que eu seguisse o caminho certo. Sua ajuda foi fundamental ao longo de todo esse processo.

Aos professores Ladislau Dawbor, Mariana Jansen Ferreira e Rosa Maria Marques, minha profunda gratidão pelo apoio e auxílios prestados durante o mestrado. Tenho enorme admiração por todos vocês.

Aos meus familiares, especialmente a Aline Akemi Mourão Nakata, por sua compreensão e parceria incondicional nos momentos difíceis. Agradeço por estar ao meu lado enquanto eu construía este trabalho.

Também sou imensamente grato aos meus amigos, em especial a Marcel T. Mori, pela amizade, momentos de descontração e por sempre estar presente nos momentos difíceis.

Agradeço novamente à CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Economia, que me proporcionaram a realização desse sonho.

Por fim, todo o esforço valeu a pena, e hoje, com muito orgulho, posso dizer que sou grato por todo o processo vivido. Agradeço a todos que contribuíram para a realização desse sonho.

Miranda Filho, Milton. *As tecnologias digitais e a transformação verde*: um estudo com base no modelo teórico de Carlota Perez. 2025. 103 p. Dissertação (Mestrado em Economia) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP), São Paulo, 2025.

RESUMO

Ao pensarmos no capitalismo, durante anos o ser humano degradou a natureza com o objetivo de atingir a lucratividade. Com o passar do tempo, outras preocupações surgiram e, com as crescentes quedas de temperatura da Terra, uma grande preocupação quanto ao futuro da humanidade se tornou evidente. É preciso refletir sobre os impactos de vivermos no planeta em meio a uma temperatura extrema. Este trabalho explora como as tecnologias digitais, alinhadas com uma mudança institucional, podem ser o caminho para mitigar esses impactos. Não se trata de uma tarefa fácil, mas é possível e necessária. Assim como acredita Carlota Pérez, podemos encontrar um caminho para a transformação verde. É importante conhecer toda a sua teoria, entender o papel da inovação na economia e na sociedade, compreender as revoluções tecnológicas e analisar as barreiras e oportunidades para que seja possível sonharmos em chegar à sexta revolução tecnológica, onde a economia verde seja uma realidade, com práticas de industrialização com carbono zero, sistemas circulares totalmente desenvolvidos, promovendo reciclagem ou reuso, e onde a cultura do "desperdício zero" seja uma realidade.

Palavras-chave: Carlota Perez, inovações, tecnologias digitais, transformação verde, necessidade de mudanças estruturais, aquecimento global, sexta revolução tecnológica.

Miranda Filho, Milton. *Digital technologies and green transformation: a study based on Carlota Perez's theoretical model*. 2025. 103 p. Dissertação (Mestrado em Economia) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP), São Paulo, 2025.

ABSTRACT

When we think about capitalism, over the years human beings have degraded nature with the aim of achieving profitability. As time passed, other concerns arose and, with the increasing drops in Earth's temperature, a great concern about the future of humanity became evident. We need to reflect on the impacts of living on the planet amidst extreme temperatures. This work explores how digital technologies, aligned with institutional change, can be the way to mitigate these impacts. This is not an easy task, but it is possible and necessary. Just as Carlota Pérez believes, we can find a path to green transformation. It is important to know all of her theory, understand the role of innovation in the economy and society, understand technological revolutions and analyze the barriers and opportunities so that we can dream of reaching the sixth technological revolution, where the green economy is a reality, with zero-carbon industrialization practices, fully developed circular systems, promoting recycling or reuse, and where the "zero waste" culture is a reality.

Keywords: Carlota Perez, innovations, digital technologies, green transformation, structural changes, global warming, sixth technological revolution.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 1 – O MODELO TEÓRICO DE CARLOTA PEREZ	14
1.1 As influências schumpeterianas.....	14
1.2 As influências neoschumpeterianas	18
1.3 Paradigmas tecnoeconômicos	22
1.4 As quatro fases tecnoeconômicas.....	25
1.5 As cinco fases do paradigma.....	33
CAPÍTULO 2 – A 5ª REVOLUÇÃO TECNOLÓGICA: TECNOLOGIAS DIGITAIS.....	39
2.1 definições e origem.....	39
2.2 Tecnologias Precedentes	41
2.2.1 Semicondutores	42
2.2.2 Microeletrônica	43
2.2.3 Computadores.....	46
2.2.4 Internet	47
2.3 Sistema de Tecnologia Digital	48
2.3.1 Big Data.....	50
2.3.2 Computação na nuvem.....	52
2.3.3 Inteligência Artificial	53
CAPÍTULO 3 – TRANSFORMAÇÃO VERDE: ORIGINANDO A 6ª REVOLUÇÃO TECNOLÓGICA.....	56
3.1 Efeitos das atividades humanas nas mudanças ambientais.....	56
3.2 Economia Ecológica, economia ambiental, economia verde e a transformação verde.....	63
3.3 Oportunidades e Desafios: Em direção a transformação verde	66
3.3.1 Oportunidades por meio de tecnologias digitais.....	67
3.3.1.1 Eficiência Energética.....	68
3.3.1.2 Energia Limpa	73
3.3.1.3 Economia Circular.....	76
3.3.4 Desafios Institucionais	79
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
REFERÊNCIAS	94

INTRODUÇÃO

A inovação, quando amplamente difundida na sociedade, desencadeia revoluções tecnológicas que substituem antigos paradigmas e impulsionam a adoção de novos processos. Na inovação, observam-se tanto momentos de rápidas transformações tecnológicas quanto períodos de mudanças mais graduais e contínuas.

Historicamente, passamos por cinco grandes ondas de revoluções tecnológicas, todas marcadas por períodos de turbulência, seguidos de crescimento econômico sustentável, transformando instituições e a sociedade. Ao longo do processo histórico, cada uma das revoluções provocou uma quebra de paradigmas existentes e trouxe mudanças econômicas significativas. Cada revolução tecnológica não apenas impulsionou avanços econômicos e industriais, mas também exigiu adaptações sociais e regulamentares significativas (Perez, 2002).

A era das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), por meio de tecnologias, como microeletrônica barata, computadores, softwares, telecomunicações, tem transformado a economia. O surgimento da quinta onda tecnológica, conforme descrito por Carlota Perez, “trouxe consigo uma série de inovações, que não pararam de evoluir, ocasionando o que é chamado de tecnologia digital, dividida em três grandes blocos: computação em nuvem, big data e inteligência artificial, sendo o core para viabilizar as demais” (Sturgeon, 2019, p. 3). Este cluster pode ser a base para a sexta revolução tecnológica, uma possível revolução verde, visto os desafios ambientais de grandes proporções, assim como há desafios, é notável janelas de oportunidades principalmente para países mais pobres (Lema; Perez, 2024).

Assim, o problema de pesquisa é compreender como a revolução tecnológica digital, por meio das tecnologias de comunicação e informação, descritas no modelo de Carlota Perez, pode acelerar, promover e aprofundar a transição verde na economia mundial.

À medida que avançamos na era digital, começa a se delinear o surgimento de uma sexta revolução tecnológica. Essa nova fase tem o potencial de redefinir padrões produtivos, incentivar a sustentabilidade e criar um paradigma econômico, marcado pela integração entre tecnologias digitais e transformação verde. A eficiência energética, energias limpas e economia circular, promete ser um dos pilares dessa revolução, promovendo não apenas a eficiência econômica, mas também a regeneração ambiental,

Juntas, podem estabelecer as bases de uma economia mais resiliente e sustentável, moldando o futuro da humanidade e levando a sociedade a um patamar de desenvolvimento verdadeiramente integrado com os limites do planeta, possibilitando uma economia global mais adaptada aos limites planetários.

As tecnologias digitais, ao impulsionarem uma sexta revolução tecnológica, têm o potencial de quebrar paradigmas tradicionais, reconfigurando sistemas produtivos e financeiros, promovendo uma integração entre desenvolvimento econômico e transformação verde.

Assim, este trabalho visa contribuir com a literatura acadêmica sobre inovação tecnológica e transformação, além de fornecer *insights* valiosos para formuladores de políticas e profissionais de setores interessados em compreender as oportunidades e desafios geradas para difusão de uma nossa revolução tecnológica.

A teoria de Carlota Perez e as ideias sobre revoluções tecnológicas servirão de suporte para dar solidez à ideia de uma mudança de grandes magnitudes com a expansão do sistema de tecnologia digital. A teoria de Carlota Perez propõe o progresso social e econômico, impulsionado pelos ciclos de revolução tecnológica. Nela, a ideia central é que ondas tecnológicas não são eventos isolados, mas parte de um padrão repetitivo que molda a evolução com impactos econômicos e sociais, portanto é importante para entender o histórico das revoluções tecnológicas, já que essas revoluções influenciam o sistema econômico.

Perez (1988) introduz a ideia de quebras de 'paradigma tecnoeconômico', isto é, suas revoluções tecnológicas têm consequências generalizadas em todos os setores da economia, promovendo uma melhor aplicabilidade entre a nova tecnologia e o sistema de gestão social da economia (Freeman; Perez, 1988), como essa ideia aplica-se na transformação verde.

A escolha de Carlota Perez como base teórica para analisar a transformação verde é particularmente relevante, pois ela amplia a perspectiva Schumpeteriana, conectando inovação, economia e instituições em ciclos tecnoeconômicos longos. Ao integrar a ideia de que as transições tecnológicas não são apenas impulsionadas por inovações, mas também exigem mudanças institucionais, Perez discute bastante sobre uma transição verde, e fornece uma abordagem abrangente para entender como a crise climática pode servir como catalisadora de uma nova onda de progresso sustentável. Diferente de outros neoschumpeterianos, que enfatizam a inovação tecnológica e a evolução econômica em termos mais lineares ou segmentados, Perez destaca a interação

entre novas tecnologias, as instituições políticas e sociais são essenciais para quebrar barreiras para uma economia sustentável. Sua teoria sobre os ciclos oferece uma estrutura dinâmica para compreender como as tecnologias digitais podem ser o caminho para mitigar os impactos humanos na degradação ambiental. Perez, portanto, se destaca ao integrar a necessidade de uma mudança estrutural abrangente, tecnologias digitais não são apenas respostas tecnológicas, mas elementos fundamentais para uma reorganização sistêmica que reconfigure, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade. Sua visão otimista, mas realista, se alinha perfeitamente à urgência da transformação verde, fornecendo uma base sólida para argumentar que a crise climática, mais do que um obstáculo, pode ser a oportunidade para acelerar um novo ciclo de progresso para um novo paradigma verde.

Os objetivos específicos deste trabalho, com base no modelo de Carlota Perez, analisando como a fase de disseminação da atual revolução tecnológica pode ser o caminho para uma economia mais verde, favorecendo um crescimento econômico sustentável e a integração de práticas ambientais mais conscientes. Também discutir como as tecnologias podem mitigar os efeitos das atividades humanas, facilitando uma transição para um modelo econômico resiliente que responde aos desafios climáticos; investigar o papel das tecnologias digitais na aceleração da transformação verde, conforme os ciclos tecnológicos de Perez, o desafio está nas barreiras institucionais, proporcionado assim uma dualidade, à medida que a inovação abre caminhos para uma transformação verde, esbarra em desafios institucionais, políticos e sociais.

O procedimento de pesquisa utilizado é majoritariamente a pesquisa bibliográfica, utilizando-se como referencial teórico a abordagem de Carlota Perez. Por meio dessa exploração bibliográfica, busca-se identificar como fenômenos tecnológicos são responsáveis por mudanças, aprofundando na evolução das TICs, resultando em uma transformação verde.

Por meio desta introdução e uma conclusão, a dissertação organiza-se em três capítulos. No primeiro capítulo, será abordado o modelo teórico de Carlota Perez, serão apresentadas ao leitor as ideias schumpeterianas, incluindo conceitos como inovação disruptiva, o papel do empreendedor, destruição criativa e os ciclos longos, assim como as ideias neoschumpeterianas, como mudanças no sistema tecnológico, a revolução tecnológica e os paradigmas tecnoeconômicos. Segundo Perez (1988), o ciclo tecnoeconômico se concentra em quatro fases: irrupção, frenesi, sinergia e maturidade, divididas em dois grandes períodos: instalação e implementação. O segundo capítulo se

concentra na quinta Revolução Tecnológica e seus desdobramentos recentes, a era das TICs, que abriram novos caminhos para enfrentar os desafios ambientais e aceleraram a transição para uma economia mais sustentável, capaz de lidar com problemas globais complexos causados pela ação humana. O Capítulo 3 explora uma possível a sexta Revolução Tecnológica, onde o caminho, talvez único seja por meio de tecnológicas digitais, destacando o papel crucial das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) na aceleração da transição para uma economia mais sustentável. Embora as inovações tecnológicas, como a digitalização, tragam enormes potencialidades, também surgem desafios significativos que precisam ser superados para que a transformação verde se concretize de forma eficaz, enfatizando, portanto, que tecnologias digitais é o caminho para mitigar os impactos climático, caso contrário já estamos sofrendo com os aumentos das temperaturas, podemos não estar mais aqui para contar essas história.

CAPÍTULO 1 – O MODELO TEÓRICO DE CARLOTA PEREZ

1.1 As influências schumpeterianas

Este capítulo tem como escopo abordar o modelo teórico de Carlota Perez, percorrendo sobre suas características e principais pontos da teoria. Primeiramente, é importante entender as influências que deram origem ao modelo de Carlota Perez; por isso, é conveniente elucidar as ideias de Schumpeter e Kondratiev.

Schumpeter defendia a ideia de inovação disruptiva, que, por meio de novas tecnologias, impulsiona mudanças estruturais profundas na sociedade ao longo do tempo, além disso, ele destacava a importância do papel do empreendedorismo, visto como crucial na introdução de inovações disruptivas que desafiam os modelos de negócios existentes, por fim Schumpeter também acreditava na presença de ciclos longos de inovação, assim como Kondratiev, propondo que o desenvolvimento econômico segue padrões de longo prazo, identificados por fases. Essas mudanças resultam em um processo de destruição criativa, criando contextos institucionais para suportar as novas tecnologias.

A inovação é o centro das ideias de Schumpeter (1982), assim, segundo ele, a inovação como o motor do desenvolvimento econômico, os saltos inovadores eram as principais causas cíclicas da economia.

Por isso, dividiu-se a inovação em três fases: a fase da invenção, a fase da inovação e a fase da difusão, em que as grandes inovações tecnológicas resultaram em mudanças no sistema econômico (Schumpeter, 1988).

Na fase da invenção, ocorre uma nova descoberta, onde um inventor destrói o mercado com sua ideia, Schumpeter (1988) irá destacar o papel do empreendedor, agindo ativamente para difundir as ideias. O empreendedor será o responsável pela mudança de processos, organizações, sistemas, e assim, conseguirá obter vantagens competitivas e obrigará seus concorrentes a aceitarem o novo, sendo mérito do empreendedor essas mudanças.

Na fase da inovação, primeiro ocorre a descoberta de uma nova tecnologia, um novo produto, resultando em uma ruptura da antiga tecnologia usada, tornando-a obsoleta; depois ocorre a alteração do método de produção, buscando eficiência e reduzindo custo; posteriormente, a tecnologia descoberta é impactante em um nível tão

alto que cria novos mercados, e também é possível substituir ou encontrar uma nova fonte de matéria prima e, por fim, há um novo modelo de negócio, totalmente inovador, que quebra paradigmas em todo o mercado e seus concorrentes (Schumpeter , 1988).

Por fim, não basta que haja apenas invenção e inovação; é necessário que ocorra sua difusão generalizada. A presença de barreiras institucionais pode limitar ou retardar esse processo, ocasionando transformações em setores inteiros da economia. É nesse mesmo período de transformação que se torna crucial entender os ajustes institucionais que acompanham tais mudanças (Schumpeter, 1988).

A invenção de um novo produto ou processo ocorre na esfera tecnocientífica. Já uma inovação ocorre na esfera econômica; ao realizar a transformação na esfera comercial, passa-se da esfera científica para a econômica, e sua difusão dependerá do sucesso. Caso resulte em adoção massiva na sociedade, isso é o que realmente transforma a invenção em um fenômeno socioeconômico. Invenções podem aparecer a todo momento, mas nem todas se difundem amplamente no sistema econômico (Perez, 2004).

Na fase da difusão, nota-se a importância do empreendedor, como o principal responsável para difusão de uma inovação, na medida que difunde uma inovação tecnológica, ocasionará uma destruição criativa, essencial na dinâmica do capital. Com isso, surgirão novas ondas, como um processo de mutação, alterando a estrutura industrial de dentro para fora, conseqüentemente, transformando o consumo, trazendo oportunidades de investimentos, aumento na produtividade, trabalho e renda, e obtendo vantagens competitivas em relação aos concorrentes.

O processo de transformação industrial resulta na modificação da estrutura econômica partindo de dentro para fora, destruindo antigos elementos e criando novos, conhecido como destruição criativa. (Schumpeter, 1961).

Essa destruição criativa, precisa-se da figura de um executor para combinar as transformações industriais, surgindo assim a figura do empreendedor, será, portanto, aquele que executa, resultando sim ou não no desenvolvimento econômico, o grau de difusão na economia será importante para entender o sucesso ou não do empreender. (Schumpeter, 1988).

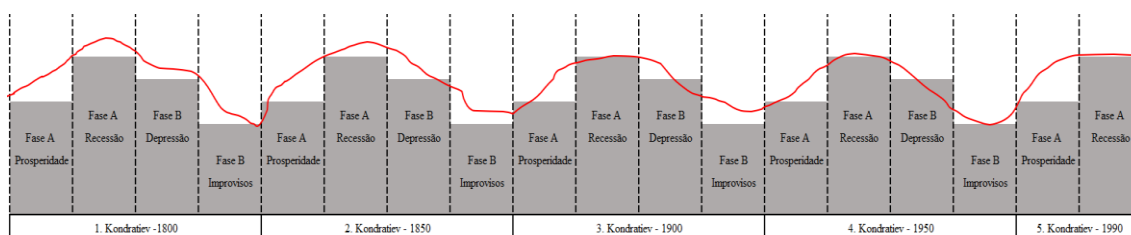
De acordo com Perez (2002), a destruição criativa explica como novas revoluções tecnológicas substituem as antigas, posto que longos ciclos tecnológicos resultam em destruição de indústrias, práticas e regras obsoletas, mas em contraponto aparecem novas oportunidades e setores econômicos.

As revoluções destroem os métodos existentes, deslocando a economia, uma espécie de ondas de inovações, em que Schumpeter baseou-se em Kondratieff para definir essas ondas, que por meio de uma nova ideia, explorou a presença de onemas longas, com aproximadamente 50 anos. Kondratieff utilizou de séries temporais sobre níveis de preços, juros, salários, nível de investimento, nível de poupança, concluindo que existe similaridade entre os indicadores, evidenciando uma espécie de onda no desenvolvimento econômico.

Os resultados encontrados pelo autor “Kondratieff” permitiram a divisão dos períodos analisados, desde o surgimento do capitalismo industrial, da seguinte forma: Primeira onda longa: a ascensão teve início por volta do fim dos anos 1780 e início dos anos 1790 até 1810/17 e o declínio durou de 1810/17 até 1844/51. Segunda onda longa: o período de ascensão estendeu-se de 1844/51 a 1870/75 e o declínio de 1870/75 até 1890/96. Terceira onda longa: a ascensão iniciou-se em 1890/96 e perdurou até 1914/20, enquanto o declínio provavelmente se iniciaria em 1914/20”. (Kondratieff, 1979 *apud* Magnani, 2018, p. 16).

Abaixo, segue figura com a demonstração das ondas longas de Kondratieff:

Figura 01 - Ondas longas de Kondratieff



Fonte: adaptada Kondratieff (1979).

Todo o ciclo é uma onda, mas nem toda onda transforma-se em um ciclo. Uma onda é marcada por um período de ascensão, chamada por Kondratieff como fase A, e um período de declínio considerado como fase B, é preciso portanto entender que utilizados para esta distinção estão contidos em Kondratieff (1979) e Schumpeter (1997).

Kondratieff, mesmo com esse estudo, não conseguiu resultados empíricos para a comprovação da existência de ciclos, faltava uma comprovação teórica, assim, Schumpeter irá conseguir empiricamente comprovar a presença de ciclos e não somente ondas separadas (Kondratieff, 1979 *apud* Magnani, 2018).

Schumpeter tomará como base as ondas K, de Kondratieff, para conseguir explicar o caráter cíclico, considerando o papel da inovação como central para que ocorram ondas. Schumpeter, por meio dos ciclos de Kondratieff, identificou longos ciclos econômicos, impulsionados por clusters de inovação, que eram caracterizados por ciclos de expansão, seguidos por ciclo de declínio (Schumpeter 1988).

Ancorada pelas ideias acima, Perez (2002) as expandiu, periodizando esses ciclos em revoluções tecnológicas por períodos longos, ciclo de 50-60 anos, marcado por fases, um período turbulento que resultará em uma crise, mas logo virá a bonança, por meio de um período de crescimento sustentável.

As inovações frequentemente impulsionam o desenvolvimento econômico ao introduzir novidades que desafiam o *status quo* na sociedade. Essas mudanças disruptivas pressionam as instituições a se adaptarem rapidamente, enquanto as empresas precisam encontrar novas maneiras de garantir sua competitividade e lucratividade. Esse processo de adaptação não ocorre rapidamente; seus efeitos podem ser sentidos ao longo de ciclos econômicos extensos, revelando gradualmente o verdadeiro impacto das inovações no sistema econômico global (Perez, 2002).

No capitalismo, existe um sistema interligado por instituições, sendo elas políticas, econômicas e sociais, as quais suas adaptações resultam nos avanços econômicos. A base institucional é formada por propriedade privada, estado, governança, sistema financeiro, mercado, estilos de vida e valores culturais. Essas instituições são responsáveis por certos comportamentos que influenciam as práticas econômicas, que podem resultar em desenvolvimento econômico na medida que difunde por toda a sociedade (Schumpeter, 1942).

Schumpeter argumenta que as instituições precisam ser um aliado das tecnologias e ir em sua direção, bases institucionais por si só não resultam em desenvolvimento econômico e transformação, mas alinhada com tecnologias é possível quebrar barreiras, as instituições precisam ser flexível e mutável para que o fluxo esteja à disposição e na mesma direção das tecnologias. Argumentava que barreiras institucionais surgem quando estruturas econômicas já estabelecidas resistem às mudanças causadas por inovações disruptivas. Em sua visão, grandes empresas e burocracias frequentemente apresentam dificuldades para se ajustar às novas tecnologias, devido à lentidão ou ineficiência nos processos de adaptação. Essas barreiras podem ser atribuídas à rigidez dos sistemas econômicos, à oposição de indústrias consolidadas e à ausência de estímulos suficientes para redirecionar investimentos para setores inovadores e emergentes (Schumpeter, 1942).

À medida que as empresas se ajustam para se manterem relevantes, a dinâmica entre inovação e adaptação transforma continuamente o ambiente econômico. Essas transformações são fundamentais para a evolução das estruturas empresariais e institucionais, alterando o modo como os mercados funcionam e como as sociedades

respondem às mudanças. Assim, enquanto as inovações abrem novas oportunidades, também desafiam as normas estabelecidas, redefinindo constantemente o equilíbrio econômico e estimulando a busca por novas formas de prosperar em um cenário em constante mudança (Perez, 2002).

As teorias de Schumpeter foram essenciais para a formulação das ideias de Carlota Perez, ressaltando a importância do empresário inovador, os ciclos econômicos de longo prazo e a inovação disruptiva, e a introdução das ideias de instituições, aprofundada mais a diante pelos neoschumpeterianos. Essas ideias combinadas formam um quadro teórico abrangente que ajuda a explicar como as revoluções tecnológicas não são eventos isolados, mas processos complexos que moldam a trajetória econômica e socioinstitucional.

1.2 As influências neoschumpeterianas

Aprimorando as ideias de Schumpeter, cabe algumas definições relevantes até chegarmos na teoria de Carlota Perez.

Schumpeter abordou de forma branda que o desenvolvimento econômico depende de mudanças institucionais, assim os neoschumpeterianos expandiram essa ideia, integrando a análise das instituições no desenvolvimento econômico. Essa abordagem considera as mudanças estruturais no sistema econômico como resultado de uma transformação institucional, considerando as instituições como elementos centrais para entender mudanças radicais e trajetórias de desenvolvimento.

O conceito de instituições passa-se a ganhar força com os neoschumpeteriano, em que aprimoram a importância de uma base institucional mutável para responder os avanços tecnológicos. Para definir instituições é preciso cuidado ao não defini-la de forma genérica, podendo reduzir sua importância.

Para Nelson, por exemplo, as instituições “referem-se a uma complexidade dos valores, normas, crenças, significados, símbolos, costumes e padrões socialmente aprendidos e compartilhados, que delineiam o elenco de comportamento esperado e aceito em um contexto particular” (Nelson, 1995, p. 137).

Já Lundvall *et al* (2002, p. 220) propõem as "Instituições, entendidas como normas, hábitos e regras, estão profundamente enraizadas na sociedade e desempenham um papel crucial em determinar como as pessoas se relacionam entre si e como elas aprendem e utilizam seus conhecimentos".

É essa ideia que aparece também na definição de Dosi, para quem as instituições são “conjuntos particulares de normas que são socialmente compartilhadas, socialmente impostas em diferentes graus, e tendem a se reproduzir inercialmente através do tempo” (Dosi, 1991, p. 137).

Hämäläinen (2003) faz uma distinção entre instituições formais e informais. Para ele, "Valores, normas, tradições, convenções, costumes, sanções, tabus e códigos de conduta culturalmente enraizados formam as restrições e os incentivos institucionais informais que moldam o comportamento humano e organizacional" (Hämäläinen, 2003, p. 153).

Ainda elucida que:

Informal institutions provide human actors with a taken-for-granted mental framework that extends, elaborates, modifies, and complements the formal institutions rules of society. [...] Shared informal institutions can be found at all levels of the economic system: organizational subunits (working methods), firms (organizations routines and standards), corporations (corporate culture), industrial sectors (industry recipes) and nations (national culture, its customs and behavioral norms). Since informal institutions evolve gradually with the national culture, they provide the continuity and path-dependence that connects a society's present to its history and to the future. Thus, informal institutions tend to be more durable than formal institutions which may be replaced overnight by new legislation and regulation, wars, revolution and so forth. Since informal institutions are deeply embedded in a society's cultural heritage, it is difficult to comprehend and internalize them from the outside. As a result the historical pathdependence and social complexity of informal institutions can provide a sustained competitive advantage for firms embedded in a superior institutional framework (Hämäläinen, 2003, p. 153-154)¹.

As instituições precisam resultar-se de um processo evolutivo, adaptando-se em cada momento e de acordo com cada região, as instituições não são apenas estruturas estáticas, são agentes ativos que interagem com os processos de inovação em ciclos

¹ As instituições informais fornecem aos atores humanos uma estrutura mental considerada grandiosa que amplia, elabora, modifica e complementa as regras das instituições formais da sociedade. [...] Instituições informais compartilhadas podem ser encontradas em todos os níveis do sistema econômico: subunidades organizacionais (métodos de trabalho), empresas (rotinas e padrões organizacionais), corporações (cultura corporativa), setores industriais (receitas da indústria) e nações (nacional cultura, seus costumes e normas de comportamento). Dado que as instituições informais evoluem gradualmente com a cultura nacional, elas proporcionam a continuidade e a dependência do percurso que ligam o presente de uma sociedade à sua história e ao futuro. Assim, as instituições informais tendem a ser mais duráveis do que as instituições formais, que podem ser substituídas de um dia para o outro por nova legislação e regulamentação, guerras, revoluções e assim por diante. Dado que as instituições informais estão profundamente enraizadas na herança cultural de uma sociedade, é difícil compreendê-las e internalizá-las a partir do exterior. Como resultado, a dependência histórica e a complexidade social das instituições informais podem proporcionar uma vantagem competitiva sustentada para empresas inseridas num quadro institucional superior. (Tradução nossa).

econômicos e tecnológicos, para que uma revolução aconteça é preciso adaptações institucionais fortes.

Carlota Perez baseia-se nas ideias neoschumpeterianas para destacar o papel fundamental das instituições na inovação e transformação econômica, enfatizando que tanto instituições formais (governos, regulamentações, políticas públicas) quanto informais (normas culturais e valores sociais) são cruciais para o sucesso dos ciclos tecnológicos, assim, surge a opção pelo modelo teórico de Carlota Perez que se justifica pela ênfase que ela atribui às instituições e ao papel das tecnologias digitais, que são responsáveis por romper paradigmas. Essas tecnologias forçam as instituições a se adaptarem a novas realidades, até que se estabeleça um novo modelo de paradigmas tecnológicos.

A visão dos neoschumpeterianos fornecem um arcabouço teórico robusto que Carlota Perez utiliza para explicar a importância de remover barreiras institucionais e criar um ambiente favorável para que as revoluções tecnológicas tenham impacto efetivo na sociedade.

Os neoschumpeterianos são importantes para Carlota Perez porque expandiram as ideias de Schumpeter sobre a relação entre inovação tecnológica e mudanças institucionais, dependendo do tamanho da inovação, tornam-se disruptivas e exigem adaptações institucionais para estabelecer novos paradigmas econômicos, assim grande parte das tecnologias tende a seguir uma trajetória semelhante em relação ao ritmo e à direção das mudanças e melhorias, desde a inovação inicial até a maturidade, evolução que coincide aproximadamente com a dos seus mercados, conhecido como Trajetória Tecnológica (Perez, 2001).

Essa trajetória é frequentemente moldada por barreiras institucionais que podem tanto impulsionar quanto restringir o progresso. Regulamentações, padrões industriais e a resistência ao abandono de tecnologias obsoletas são exemplos dessas barreiras que podem limitar ou retardar o avanço das tecnologias ao longo de sua trajetória (Schumpeter, 1942).

Para superar barreiras institucionais que dificultam a adoção e expansão de sistemas tecnológicos inovadores, é essencial implementar estratégias direcionadas a desafios estruturais. Essas barreiras incluem a falta de infraestrutura moderna, a deficiência de sistemas educacionais preparados para as novas demandas tecnológicas, e estruturas de financiamento ineficazes que desestimulam investimentos em inovação.

Essas reformas não só eliminam obstáculos imediatos, mas também criam um ambiente propício para o desenvolvimento sustentável de tecnologias e novos setores econômicos, ampliando os impactos positivos de inovações radicais e incrementais, conforme descrito por Freeman (1987).

Segundo Freeman (1987), sistemas tecnológicos baseiam-se numa combinação de inovações, sejam elas radicais ou incrementais, que irão afetar as organizações, podendo resultar em mudanças, em poucas empresas, ou em várias, dependendo do seu tamanho, portanto, são precursoras de mudanças longas, impactando ramos da economia e criando setores, assim, seu impacto global vai depender das múltiplas inovações que constituem cada sistema tecnológico, combinando inovações aos insumos, produtos e processos. Dessa forma, surgem as transformações no sistema tecnológico, que impactam um ou vários setores da economia, dando origem a novas empresas e novos segmentos.

Freeman (1987) identifica quatro categorias de inovação que servirão como pilares para a teoria de Perez: a inovação incremental, que busca melhorar produtos ou serviços existentes através de pequenos ajustes e otimizações; a inovação radical, que introduz mudanças disruptivas e transformadoras no mercado; as mudanças no sistema tecnológico, que afetam setores inteiros da economia através da combinação de inovações; e, por fim, a mudança no paradigma tecnoeconômico, conhecida como revolução tecnológica, que redefine os fundamentos econômicos e sociais.

A inovação incremental pode ocorrer em qualquer indústria ou serviço, são resultados de estudos de engenheiros ou profissionais envolvidos no processo de produção, muitas vezes resultantes de testes com usuários finais, pode também ser resultado de uma solução criativa de algum colaborador, visando resolver algum problema do cliente, já as inovações radicais são eventos isolados, resultado de pesquisa e desenvolvimento (P&D), realizadas por empresas, universidades, criando algo disruptivo e novo (Freeman, 1987).

Pode-se chamar de inovação incremental algo que leva melhorias, e não se cria, melhorias nos produtos ou serviços já existentes, resultando em otimização, redução de custo, solução de necessidades, melhoria de experiência e posicionamento e adequação às normas (Freeman, 1987).

A inovação radical vai em busca de mudar por completo o mercado, não impactando somente uma empresa isolada, mas sim todo um segmento. Empresas irão buscar por meio de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) investimentos em inovações, objetivando redução de custos e melhorias de processos, concentrando-se no

desenvolvimento de um produto ou serviço de alto impacto, nunca realizado antes pela organização, completamente diferente de algo existente (Freeman, 1987).

A inovação radical busca mudar por completo o mercado, impactando não apenas uma empresa isolada, mas todo um segmento. Empresas investem em P&D visando a redução de custos e melhorias de processos, focando no desenvolvimento de produtos ou serviços de alto impacto, algo nunca realizado antes. Ainda assim, as barreiras institucionais podem obstruir essas inovações, através de regulações inadequadas ou sistemas de patentes que favorecem grandes corporações sobre novos entrantes (Freeman, 1987).

Por fim, as inovações podem dar origem a um novo paradigma técnico-econômico. A expressão paradigma tecnoeconômico provém de uma combinação de inovações possíveis que geralmente precisam de um período longo para difundir em toda a economia e sociedade, contudo um paradigma tecnoeconômico é aquele que modifica as estruturas econômicas, como métodos de produção e distribuição, eliminando velhos padrões e conseguindo difundir para quase todos os setores da economia. (Freeman, 1987). Desse modo, essa mudança no paradigma tecnoeconômico cria uma espécie de revolução tecnológica, afetando toda a economia e a sociedade, adentrando de fato na teoria dos paradigmas tecnoeconômicos de Carlota Perez.

1.3 Paradigmas tecnoeconômicos

Carlota Pérez definiu o paradigma tecnoeconômico como um conjunto de novos métodos de gestão que causam a ruptura de antigos métodos, tornando-o senso comum. Entretanto, para que esses modelos alcancem seu potencial, é necessário quebrar barreiras institucionais. Isso inclui enfrentar desafios como regulamentações rígidas, sistemas educacionais desatualizados que não formam trabalhadores para as novas demandas tecnológicas e resistências ao abandono de tecnologias obsoletas. Perez argumenta que essas barreiras devem ser superadas por meio de reformas institucionais e de políticas que acelerem a adoção de inovações e permitam que elas influenciem de maneira ampla os sistemas econômicos e sociais (Perez, 2002).

Carlota Perez propõe o conceito de paradigmas tecnoeconômicos (PTE) pela primeira vez em 1983, assim definido como modelos de melhores práticas compostos por princípios tecnológicos e organizacionais que representam a forma mais eficaz de aplicar e utilizar uma revolução tecnológica específica para rejuvenescer e modernizar toda a

economia, caracterizada por ciclos longos e representados por fases. O conceito de paradigmas tecnoeconômicos, desenvolvido por Carlota Perez, propõe que o progresso econômico e social é impulsionado por ciclos repetitivos de revoluções tecnológicas, cada um dos quais transforma profundamente a estrutura econômica e social (Perez, 2002).

Cada paradigma tecnoeconômico traz consigo novas tendências e práticas: como novos métodos de produção, alterações em produtos (sendo ele incremental ou radical), mudança no mix, crescimento de antigas empresas e aparecimento de novas. (Freeman; Perez, 1988).

Um paradigma técnico-econômico é um modelo de desenvolvimento alinhando-se com tecnologias que ao impactar a economia e a sociedade desempenham um papel importantíssimo no desenvolvimento econômico, propagando a inovação, ocasionando mudanças em diversos setores da economia, obrigando as instituições adequarem-se aos novos padrões, pressionando por uma mudança institucional para readequar a nova tecnologia com as bases estruturais da economia, evitando assim uma crise estrutural. (Freeman; Perez, 1988).

Essas mudanças de paradigma tecnoeconômico, afetam a maioria dos grandes setores econômicos, resultando em novos produtos e as vezes em novas indústrias, seus efeitos estão presentes em processos produtivos, estruturas de custos, condições de produção e distribuição. Essas mudanças geralmente são longas, os longos ciclos propostos por Schumpeter, seguindo Kondratiev, incluem ondas de “destruição criativa” e seriam sucessões de vários paradigmas técnico-econômicos associados às mudanças no contexto institucional.

Mudanças no paradigma tecnológico irão resultar em revoluções tecnológicas. Segundo Carlota Pérez, estas revoluções tecnológicas conduzem a profundas mudanças estruturais e estão na origem de todos os grandes booms da economia mundial (Perez, 2002). Portanto, as revoluções tecnológicas têm um impacto generalizado capaz de transformar a forma de produzir, o modo de viver e geografia econômica global. Estas revoluções são o principal gerador de mudanças massivas e fundamental no comportamento dos ajustes econômicos (Perez, 2002).

“Uma revolução tecnológica pode ser definida como um conjunto poderoso e altamente visível de tecnologias, produtos e indústrias novas e dinâmicas, capazes de provocar uma reviravolta em todo o tecido da economia e de impulsionar um surto de longo prazo do desenvolvimento” (Perez, 2002, p. 8).

Uma revolução tecnológica é um processo de mudança em toda a sociedade, compreender a forma como tais mudanças têm sido enfrentadas historicamente provavelmente aumentará as chances de sucesso na superação das principais ameaças que o mundo enfrenta.

Um paradigma técnico-econômico é, então, um modelo de melhores práticas composto por um conjunto de princípios tecnológicos e organizacionais genéricos e onipresentes, que representam a maneira mais eficaz de aplicar uma revolução tecnológica específica e de utilizá-lo para modernizar e rejuvenescer toda a economia (Perez, 2002, p. 15-16).

As mudanças no paradigma tecnoeconômico têm consequências em todos os setores da economia, a partir do momento que começa sua difusão ocorre uma crise estrutural para que possam ser redefinidas as práticas e processos, nas quais mudanças institucionais são necessárias para ocasionar novo equilíbrio. Um paradigma tecnoeconômico, que se concentra em quatro períodos sucessivos: na difusão inicial, surgem as inovações radiais de produtos e processos, crescimento rápido, novas firmas exploram a mesma inovação, crescimento mais lento, o paradigma se difunde para as firmas menos receptivas, fase da maturação, última fase do ciclo do paradigma, em que o mercado começa a saturar-se, os produtos se esgotam e as inovações incrementais trazem pouco aumento da produtividade (Perez, 2002).

É importante entender como cada fase desses paradigmas tecnoeconômicos desencadeia mudanças estruturais significativas, exigindo adaptações tanto nas organizações econômicas quanto nas estruturas institucionais que sustentam essas economias em transformação.

O teorema de Carlota Perez, conhecido como Teoria das Ondas de Inovação ou Teoria das Revoluções Tecnológicas, propõe o progresso social e econômico, impulsionado pelos ciclos de revolução tecnológica. Cada onda tecnológica transforma a estrutura econômica e cria novas oportunidades e desafios, influenciando a organização social, as políticas públicas e os comportamentos individuais e sociais para isso, assim Perez (2002) introduz a ideia de "paradigmas tecnoeconômicos", por meio de um modelo onde a tecnologia é instrumento central, redefinindo a maneira como a economia e a sociedade praticam negócios, e assim pode ocasionar uma revolução tecnológica, mudando padrões e processo que no fim das contas pode modernizar e desenvolver a economia e sociedade. O teorema de Carlota Perez, conhecido como Teoria das Ondas de Inovação, não só reconhece o papel transformador das revoluções tecnológicas, mas também enfatiza a necessidade de superar as barreiras institucionais que surgem ao longo

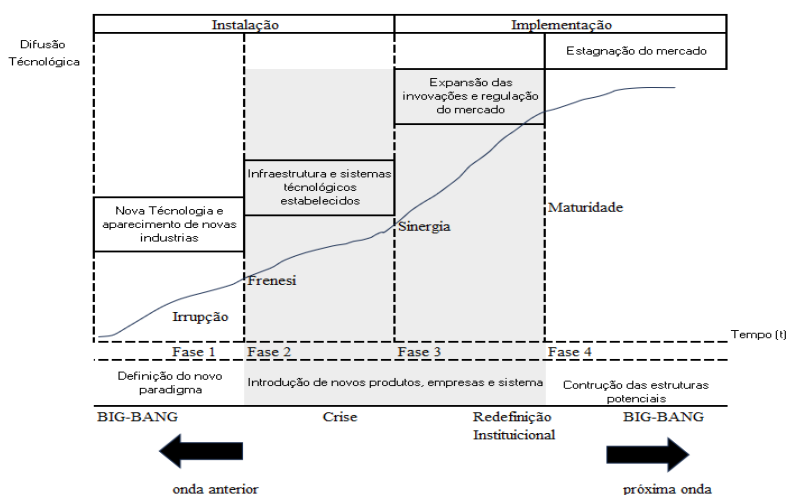
dessas transições. A teoria propõe que o progresso social e econômico é impulsionado por essas revoluções, mas apenas se houver uma resposta institucional adequada para facilitar o processo e maximizar o impacto positivo dessas inovações na sociedade.

1.4 As quatro fases tecnoeconômicas

As quatro fases conceituadas por Carlota Perez, em sua obra "*Technological Revolutions and Financial Capital*", oferecem uma estrutura poderosa para entender a dinâmica das grandes transformações econômicas impulsionadas por inovações tecnológicas ao longo da história, cada uma dessas fases representa um estágio crucial no ciclo de vida das revoluções tecnológicas.

Essa periodização identifica os desafios e ajustes necessários para sua adoção generalizada sustentável; oferece *insights* valiosos sobre como as sociedades e as economias podem se adaptar e prosperar diante dessas transformações profundas.

Figura 02 – Fases do ciclo tecno-econômico.



Fonte: adaptada de Perez (2004).

Cada onda é iniciada por um big-bang, caracterizado pelo surgimento de uma tecnologia revolucionária capaz de estimular os empresários a expandir as inovações no entorno de sua lógica atendo-se a determinados setores e regiões geográficas, nos quais a nova tecnologia foi criada e desenvolvida. (Perez, 2004c *apud* Freitas, 2011, p. 7-8).

A partir de um *big-bang*, inicia-se o processo de difusão do novo paradigma, assim, Perez o divide em dois períodos longos, instalação e implantação. No período de instalação da nova tecnologia à sociedade, há uma euforia, aquecendo os investimentos, possibilitando maiores lucros, aquecendo empregos e aumentando a renda.

Para que o novo paradigma possa se estabelecer de forma sustentável é necessário um processo de reforma institucional que alinhe as políticas, práticas e infraestruturas com as exigências da nova tecnologia, superando assim as barreiras que ameaçam limitar seu potencial transformador.

Nas primeiras décadas da instalação, há uma enorme euforia, em que novas ondas industriais e infraestrutura buscam por estabilização, nesse momento, há o período de maior divergência entre as esferas técnico-econômica e socioinstitucional, existindo um desalinhamento entre os aspectos técnicos e econômicos. Desse modo, é preciso ajustar ou corrigir com políticas econômicas, teorias econômicas, métodos de análise econômica, eficiência produtiva, alocação de recursos, perdendo a maximização de resultado dentro do contexto econômico e os contextos sociais e institucionais (Perez, 2002).

O Período de Instalação é caracterizado por desafios significativos, em que os empresários precisam compreender e explorar as novas oportunidades de capital. No entanto, enfrentam resistência daqueles que estão acostumados com o paradigma antigo, o que pode dificultar a transição para as novas práticas econômicas e tecnológicas. A primeira é a turbulenta batalha do novo contra o velho; o tempo de destruição criativa schumpeteriana, de intensa experimentação no mercado livre e exploração de todas as possibilidades das novas tecnologias.

A prosperidade frenética que caracteriza o final desse período, com o surgimento de novos gigantes e a formação de bolhas financeiras, evidencia a urgência de reformar essas barreiras institucionais. Sem mudanças adequadas, o sistema financeiro pode entrar em colapso, mostrando que a incapacidade de adaptar rapidamente as instituições às exigências da nova era tecnológica pode resultar em instabilidade econômica e crises financeiras severas. Assim, as barreiras institucionais precisam ser transformadas para facilitar a plena integração do novo paradigma e sustentar o crescimento econômico.

No período de instalação, Perez (2002) segmentou duas fases: irrupção e frenesi.

A fase de irrupção estabelece uma euforia a caminho do desenvolvimento econômico, assim que um big-bang é descoberto, surge uma gama de possibilidades movidas pela nova tecnologia, destruindo o paradigma anterior estabelecido, tornando-o obsoleto, assim, o aparecimento desse novo paradigma tende ao crescimento de produtividade e níveis de investimentos.

Dessa forma, as empresas do paradigma anterior são forçadas à modernização. Ademais, esta fase é marcada por desemprego crescente e por políticas públicas ineficazes, atrelados ao paradigma anterior, simultaneamente há a revitalização do mercado financeiro e há a construção de uma nova fronteira de ótima prática pelos novos empresários (Perez, 2004a, p. 80-81 *apud* Freitas, 2011, p. 16).

Na fase frenesi, o capital financeiro, sedento por oportunidades de lucros, destrói o paradigma anterior, até então dominante na economia, e passa a ver setores com olhares diferentes e visualiza um alto potencial de investimentos, resultando em aumento de crédito para adaptar-se aos novos padrões de produção e consumo.

O sistema financeiro, dentro deste esquema de investimento massivo na nova indústria, age como um grande agente da destruição-criativa de Schumpeter, decretando a decadência dos setores estagnados através do estrangulamento no crédito oferecido, enquanto supre os setores mais dinâmicos com abundante liquidez (Schumpeter, 1982, p. 71-74).

Nesse momento, o investidor estará disposto ao risco, imaginando um retorno alto; o crédito fácil resultará em mudanças na economia, aumentando a demanda por bens e serviços e impulsionando o crescimento econômico, os bancos readéquam suas operações para investir mais e garantir lucros, inovando em novos produtos bancários para atender à demanda pela nova tecnologia.

É um momento em que pode haver um aumento do endividamento das empresas e população, risco de bolhas financeiras, causando instabilidades e crises econômicas, o acesso desigual do crédito pode agravar as disparidades socioeconômicas, beneficiando quem tem mais oportunidade de crédito e excluindo os mais necessitados. O papel do investidor por meio do crédito é importante nesse momento, gerando efeitos positivos em um primeiro momento, mas o cuidado é com o fornecimento estrutural do crédito, esse sim pode gerar efeitos devastadores em longo prazo.

De acordo com Pérez, mesmo com o grande crescimento, as novas indústrias não são capazes de absorver todo o fluxo de investimento proveniente do mercado de ações. Dessa forma, o capital financeiro promove inovações, transformando se distanciando da esfera real da economia e gerando um ambiente especulativo e a busca das firmas por maneiras de garantir altos retornos contribui para a hiperinflação. (Perez, 2004c, p. 14-15 *apud* Freitas, 2011, p. 16)

Nesse período a especulação leva a investimentos em infraestrutura, para atender à necessidade do novo. O capital financeiro será responsável para estabelecer as infraestruturas necessárias para novas raízes econômicas que estarão por vir, objetivando

margens de lucros excessivas, o capital financeiro será importante para a difusão da tecnologia e dos setores.

Ao ocorrer a difusão da tecnologia, o capital financeiro passa a não ter ganhos excessivos, e procura não estar exposto ao risco, entrando, portanto, na fase de frenesi.

É uma fase caracterizada pela polarização de renda e especulação, porém constitui também um amplo processo de exploração das possibilidades geradas pela revolução tecnológica, revelando o potencial do novo paradigma para criar mercados e rejuvenescer empresas antigas (Perez, 2004a, p. 82 *apud* Freitas, 2011, p. 15)

A instalação é basicamente um período experimental para testar no mercado o espaço de inovação aberto pela revolução tecnológica e definindo a forma das novas indústrias, os novos métodos de produção e a distribuição e os novos padrões de consumo.

O período de instalação facilita o surgimento do novo paradigma, também o financiamento concedido às indústrias tradicionais é assimilado para preparar-se para as vantagens da nova infraestrutura, mudando modelos organizacionais, padrões de consumos e outras questões.

Uma mudança institucional de transferência do capital financeiro para o produtivo será difícil, visto que o setor financeiro está fortalecido, implementando-se, então, uma crise que permita uma reforma institucional que leve à total difusão do novo paradigma técnico-econômico pela sociedade.

Assim, o capital financeiro representa os critérios e o comportamento daqueles agentes que possuem riqueza na forma de dinheiro ou outros ativos de papel [...] no final, por qualquer meio, seu propósito permanece vinculado a ter riqueza na forma de dinheiro ('líquido' ou quase líquido) e fazê-lo crescer", enquanto que o capital Produtivo: "Em contraste, o termo 'capital de produção' incorpora os motivos e comportamentos daqueles agentes que geram nova riqueza através da produção de bens ou da prestação de serviços". (Perez, 2002, p.71)

Após um período de inovações financeiras e de um frenesi de investimentos, é comum que o capital financeiro se desconecte da economia real. Isso pode levar à formação de uma bolha especulativa, onde os preços de ativos são inflacionados além de seu valor real. Quando essa bolha eventualmente estoura, pode desencadear uma crise financeira severa, marcando o fim desse ciclo de prosperidade artificial.

Portanto, o Período de Instalação atinge seu fim depois da substituição das indústrias que consolidam o motor do crescimento econômico, da instalação da nova infraestrutura e após a aceitação geral do paradigma como senso comum. No entanto, o fim do período é geralmente caracterizado pela

formação de uma bolha especulativa e por um colapso financeiro (Perez, 2004c, *apud* Freitas, 2011, p. 15)

O capital precisa mover forças para o setor produtivo, sem impactar mudanças institucionais profundas, os trabalhadores, em um momento de instabilidade, aumentam as pressões para que reformas e greves possam vir a existir, forçando, assim, mudanças institucionais para que possa difundir-se um novo paradigma por toda a sociedade e atingir o equilíbrio.

Crises econômicas marcam a ruptura entre as ondas, podem ser importantes catalisadores para as reformas institucionais, facilitando a adoção e difusão de novas tecnologias.

What is critical to understand, firstly, is that the recessions that follow the mid-surge crash result, not only from speculation and panic, as is commonly believed regarding the current economic crisis, but also from the structural changes brought about by the new paradigm itself. Each technological revolution is based on an interrelated set of new technologies, industries and infrastructure networks that develop in intense ‘feedback loops’, providing markets and suppliers for each other, lowering production costs and increasing profitability – in the way that computers generated markets for micro-chips, the Internet for computers and both of them together for the iPhone.¹⁸ It is these synergies between the new technologies, industries and infrastructures that are the hallmark of a technological revolution and the basis for its rapid growth in the initial decades of diffusion. (Perez, 2016, p. 8)².

A globalização intensifica a interconexão entre economias, fazendo com que as ondas tecnológicas tenham impactos globais. Isso também significa que crises e recuperações podem se espalhar mais rapidamente entre os países.

Em um momento de crise, possivelmente haverá maiores desigualdades sociais, além disso, as ondas tecnológicas podem aumentar ainda mais as desigualdades existentes, em contrapartida, também possuem potencial para novas inclusões sociais e econômicas, intervenções, ademais as políticas públicas serão importantes nesse momento.

² “O que é fundamental compreender, em primeiro lugar, é que as recessões que se seguem ao colapso do mid-surge resultam, não só da especulação e do pânico, como normalmente se acredita relativamente à actual crise económica, mas também das mudanças estruturais provocadas pelo novo paradigma. em si. Cada revolução tecnológica baseia-se num conjunto inter-relacionado de novas tecnologias, indústrias e redes de infra-estruturas que se desenvolvem em intensos “ciclos de feedback”, proporcionando mercados e fornecedores uns aos outros, reduzindo os custos de produção e aumentando a rentabilidade – da mesma forma que os computadores geraram mercados para micro- chips, a Internet para os computadores e ambos juntos para o iPhone.¹⁸ São estas sinergias entre as novas tecnologias, indústrias e infra-estruturas que são a marca de uma revolução tecnológica e a base para o seu rápido crescimento nas décadas iniciais de difusão”. (Tradução nossa).

A crise seria elemento fundamental para romper barreiras dentro da estrutura socioinstitucional estabelecida, resultando na mudança necessária para que a estabilidade econômica volte a prosperar.

Essa crise pressionará por adoção das reformas regulatórias e institucionais, assim a economia passa a encontrar-se no equilíbrio entre as esferas tecnoeconômicas e socioinstitucional, permitindo, desse modo, a difusão mais acentuada do paradigma.

Segundo Perez (2016, p. 7):

Historically, it is a time of ferocious competition, during which the ideology of laissez faire tends to shape the behaviour of governments. This permits financial capital to override the entrenched power of the production giants of the previous paradigm, enabling the modernisation (or destruction) of the mature industries and spreading a new ‘common sense’ across both the business world and society – turning to ‘normal’ many processes, practices and expectations that would have been inconceivable only decades before. This frenzy phase of extravagant ‘Great Gatsby’-esque prosperity also facilitates a necessary over-investment in the new infrastructures, in order that coverage (whether of canals, railways or the Internet) is broad enough for widespread usage. This enables the paradigm to diffuse from niche to mainstream³.

O segundo período, implementação, é caracterizado pelo processo de “construção criadora”:

As tecnologias trazidas pela revolução tecnológica são utilizadas amplamente pelas indústrias de todos os setores, sendo este um período de expansão, extensão e multiplicação das possibilidades trazidas pelo novo paradigma estabelecido até que este encontre sua maturação. Durante este período, o Estado retoma seu papel ativo na economia – diferentemente do período de instalação, quando adota uma atitude laissez faire –, sendo um impulsionador da inovação aliado ao capital financeiro (Perez, 2010a, p. 9 *apud* Freitas, 2011, p. 15).

Perez (2016) divide o período em duas fases: sinergia e maturidade. O segundo período concretiza todo o potencial aberto pelas novas tecnologias. Há o período de implantação quando os novos gigantes da produção servem como motores de crescimento. É um momento de ‘construção criativa’ envolvendo a expansão dos setores

³ “Historicamente, é uma época de competição feroz, durante a qual a ideologia do laissez faire tende a moldar o comportamento dos governos. Isto permite que o capital financeiro anule o poder entrincheirado dos gigantes da produção do paradigma anterior, permitindo a modernização (ou destruição) das indústrias maduras e espalhando um novo “senso comum” tanto no mundo empresarial como na sociedade – voltando ao “normal”. muitos processos, práticas e expectativas que seriam inconcebíveis apenas décadas antes. Esta fase frenética de prosperidade extravagante ao estilo do “Grande Gatsby” também facilita um necessário investimento excessivo nas novas infraestruturas, para que a cobertura (seja de canais, caminhos-de-ferro ou Internet) seja suficientemente ampla para uma utilização generalizada. Isso permite que o paradigma se difunda do nicho para o mainstream”. (Tradução nossa).

novos e rejuvenescidos e, geralmente, pretendem difundir os benefícios do crescimento de forma muito mais ampla do que durante a Instalação.

A sinergia trará a necessidade de inovação institucional, tal mudança resultará em condições de liderança para as empresas que conseguirem essa mudança, porém não será fácil ou de forma automática. Segundo Perez (2016), requer-se uma recomposição institucional radical para modificar o contexto empresarial, favorecendo a produção e o emprego reais da criação sobre a especulação e começa-se a reverter o processo de polarização da renda que caracteriza os períodos de instalação.

Nessa fase, o papel do Estado na economia é um fator determinante e a capacidade de inovar com ousadia na política governamental é crucial. “This is why we emphasise the role of governments in establishing the policies that will make it more profitable to innovate and invest in a green direction than to follow the traditional paths” (Lema; Perez, 2024, p. 6).

Sobre os desafios regulatórios com a nova tecnologia, sempre que algo novo começa a difundir-se no mercado, é preciso cuidado com seus impactos, geralmente novas tecnologias pressionam por marcos regulatórios. Sendo assim, é necessário adaptar-se para expandir a tecnologia e trazer segurança à sociedade, permitindo o equilíbrio da inovação e a proteção dos interesses públicos.

The second period in the diffusion of each revolution is ‘context dependent’ deployment. The new set of possibilities is disparate and often unconnected. It is referred to as ‘potential’ precisely because it can be used and shaped in different ways and because profitability depends on relative costs, dynamic demand and the availability of synergies in terms of suppliers, skills, distribution networks and customer learning. Hence the potential inherent in each revolution requires the choice of a direction in order to come to fruition: in other words, an orientation for innovation is necessary, applicable across multiple and disparate industries, which can generate synergies advantageous to all of them⁴. (Perez, 2016, p. 9)

No que tange às mudanças nas organizações, as empresas precisam adotar novas mudanças tecnológicas de forma eficiente, incluir mudanças nos custos, estruturas de gestão, processos, culturas metodológicas.

⁴ “O segundo período na difusão de cada revolução é a implantação “dependente do contexto”. O novo conjunto de possibilidades é dispar e muitas vezes desconexo. É referido como “potencial” precisamente porque pode ser utilizado e moldado de diferentes maneiras e porque a rentabilidade depende dos custos relativos, da procura dinâmica e da disponibilidade de sinergias em termos de fornecedores, competências, redes de distribuição e aprendizagem dos clientes. Assim, o potencial inerente a cada revolução exige a escolha de uma direção para se concretizar: por outras palavras, é necessária uma orientação para a inovação, aplicável a indústrias múltiplas e dispare, que possa gerar sinergias vantajosas para todas elas”. (Tradução nossa).

Nesse momento também é importante a parceria entre investimento público e privado, para estabilizar a infraestrutura sustentável. No início é importante o investimento público para haver inovação, mas, com o passar do tempo, o setor privado precisa liderar a inovação, para não causar outros impactos, como a dívida pública.

Perez (2002) destaca o papel do Estado como um catalisador e facilitador da inovação em certos estágios do desenvolvimento econômico. Perez (2002) enfatiza a importância da mudança estrutural na economia, incluindo mudanças na organização industrial, nos padrões de consumo e nas relações de trabalho, que são impulsionadas pela inovação tecnológica.

Para Perez (2016), o que está claro é que as receitas antigas não funcionarão agora, assim como não funcionaram nas últimas vezes. Tampouco, não funcionará a simples receita de austeridade de tirar o governo do caminho e esperar que os mercados façam tudo isso sem um contexto claramente definido e com uma certa direção estável. Precisamos repensar seriamente na construção de um consenso intenso, de uma abordagem global, onde haja negociações e liderança determinada.

A fase de sinergia é a fase de ouro do paradigma, onde as estruturas básicas para o desdobramento da revolução tecnológica foram instaladas, resultando em condições viáveis de expansão e crescimento.

Durante este período, novas leis, regras e mudanças ocorrem, a parte social fica mais evidente, pressionando proteção de classes sociais mais baixas, distribuição de renda e mercados de consumo, a infraestrutura estabelecida eleva o nível de produtividade.

A fase de sinergia consagra o novo paradigma, fazendo com que sua lógica esteja embutida em todas as atividades – dos negócios ao governo e educação, por toda a sociedade, além de tornar o capital financeiro um verdadeiro apoio ao capital produtivo (Perez, 2004a, p. 86-7 *apud* Freitas, 2011, p. 18)

A produção aquecida é ponto central da economia, pois as instituições realizaram fusões para que as empresas obtivessem maiores lucros, incrementando salários e aumento do consumo.

Altera-se o papel dos consumidores, adotam-se as novas tecnologias de forma sustentável. Nesse momento, já mudaram suas preferências para empresas com vantagem competitiva dessa nova tecnologia. Os impactos culturais mudaram de maneira significativa, alterando a maneira como vivem, trabalham e interagem os agentes, assim, uma cultura de inovação dentro das organizações e na sociedade em geral deve ser estabelecida.

O capital financeiro e o capital produtivo alcançam o equilíbrio, por mais que pareça que a era de ouro seja a era de maior desenvolvimento, não é nesse período o crescimento mais acelerado, e sim um crescimento mais equilibrado, oportunidades de investimento, nesse período, são mais limitadas ao longo de seu tempo, gerando retornos decrescentes, é um período de maior competição entre empresas.

A fase de maturação é a última etapa do ciclo de difusão, é o resultado da estabilização do paradigma e linearidade dos mercados, onde na esfera social buscar-se-ão melhorias pessoais e sociais.

Durante a fase há uma crescente divisão sociopolítica, desencadeando protestos de trabalhadores e atos de rebelião. Ao mesmo tempo, para as grandes indústrias, há o esgotamento das tecnologias, impactando o nível de produtividade e reduzindo os ganhos, dando espaço à concentração de empresas por meio de fusões e aquisições e à exportação de atividades a mercados menos saturados. Este cenário configura o declínio de todo o modelo de crescimento, favorecendo a irrupção de uma nova revolução tecnológica (Perez, 2004a, p.87-88 *apud* Freitas, 2011, p. 15)

O período de implantação é o momento de modernização, setores, empresas, instituições inovam usando as novas tecnologias da revolução, é um momento de expansão e de inovação social, ampliando a tecnologia por toda a sociedade, resultando em uma vasta criação de riqueza.

Nesse período, moldam-se a sociedade e a economia, acirram a sobrevivência entre as empresas, tendendo a estabelecer oligopólios que restringirão os investimentos de longo prazo em tecnologia, isso é perigoso para o futuro econômico e social.

1.5 As cinco fases do paradigma

Os longos ciclos refletem ondas de destruição criativa associadas a mudanças no contexto institucional. Perez (2002) foca em períodos de longo prazo, destacando os ciclos de inovação que ocorrem ao longo de várias décadas.

De acordo com Perez (2002), houve cinco revoluções tecnológicas, em cada uma delas houve a quebra de um paradigma existente, além da mudança estrutural do período.

Figura 03 – Os *Big-bangs* das ondas tecno-econômicas

Os Big-bang das ondas técnico-econômicas de Carlota Perez (2002)			
Revolução Tecnológica	Conhecida por	Big Bang	Ano
Primeira	A "Revolução Industrial"	Moinho Arkwright	1771
Segunda	Era do Vapor e das Ferrovias	Teste da locomotiva "Rocket"	1829
Terceira	Era do aço, eletricidade e engenharia pesada	Planta produtora de aço Bessemer de Carnegie	1875
Quarta	Era do Petrólio, do automóvel e da produção em massa	Lançamento do modelo Ford-T	1908
Quinta	Era da informação e das telecomunicações	Lançamento do primeiro microchip comercial da Intel	1971

Fonte: adaptada de Perez (2002).

A primeira revolução ocorrida em 1771, conhecida como revolução industrial na Grã-Bretanha, foi marcada pelas novas tecnologias como uso de ferro forjado e algodão mecanizado, estabeleceu-se um paradigma tecnológico, em que a mecanização do sistema produtivo agregava valor ao reduzir o tempo.

A Revolução Industrial, que começou na Grã-Bretanha, por volta de 1771, trouxe uma série de mudanças estruturais significativas que transformaram profundamente a sociedade, a economia e a vida das pessoas, começando pela famosa transição da produção manual para a produção industrial; uma produção em alta escala, resultando em eficiência, seguida de inovações tecnológicas, devido à invenção da máquina a vapor, ocorreu também um grande êxodo rural em busca de maiores oportunidades de empregos na cidade (Perez, 2002).

Destaca-se o crescimento econômico, já que a produção em massa de bens permitiu uma maior disponibilidade e variedade de produtos a preços mais baixos, melhorando o padrão de vida para muitas pessoas e estimulando o consumo.

A pressão da classe trabalhadora e dos movimentos sindicais resultou em reformas políticas e trabalhistas significativas.

As consequências sociais de cada transição envolvem o desemprego generalizado, a obsolescência de qualificações em todos os níveis, a destruição do sustento de muitos indivíduos, o deslocamento geográfico de pessoas e atividades e a desigualdade dada pelo crescimento da riqueza de uns e crescente pobreza de outros, o que vale para indivíduos, regiões e países. (Perez, 2004b, p. 16).

O *big bang* foi o responsável pela ruptura da época, caracterizando as tecnologias trazidas pela revolução na mecanização da indústria do algodão, do ferro forjado e das máquinas no processo produtivo.

O paradigma estabelecido pela Revolução Industrial tinha como princípios a produção em fábricas, a mecanização da produção, a introdução do conceito de produtividade e redução de tempo, a fluidez de circulação para máquinas movidas por energia hidráulica e para o transporte através de vias fluviais, e por fim as redes locais (Perez, 2004a, p. 35-44 *apud* Freitas, 2011, p. 20)

O período de instalação da primeira revolução tecnológica foi marcada por uma enorme bolha especulativa, em 1780, e sua era de ouro elevou o patamar da Grã-bretanha, tornando o país a ter as práticas a ser seguido na época.

A segunda revolução ocorreu em 1829, conhecida como a era do vapor e ferrovias, motores a vapor e máquinas; viu-se a industrialização espalhar-se para o restante do mundo, houve avanços significativos em tecnologias como aço, eletricidade, química e comunicações, resultando em uma expansão dos transportes, construções de ferrovias, permitindo o acesso rápido e eficiente de produtos, impactando no comércio internacional, ganhando notoriedade o termo globalização.

A terceira revolução, de 1875, foi caracterizada pela era do aço, eletricidade e engenharia pesada; a expansão do aço levou a mudanças sociais significativas, aumentando a urbanização em massa, cidades expandiram sua produção e precisavam de mão de obra para as indústrias.

From 1875, the age of steel and heavy engineering (electrical, chemical, civil and naval) saw the proliferation of transnational railways and trans-continental steamships, enabling an intense development of international trade and the first ‘globalization’⁵. (Perez, 2016, p. 4)

As infraestruturas redefinidas do paradigma consistiam em ferrovias, serviço postal padronizado, telégrafos, construção de pontes e barcos.

Os princípios de sentido comum do período englobavam economias de aglomeração, cidades industriais e mercados nacionais; formação de centros de poder com redes nacionais; utilização de grande escala como progresso; construção de máquinas para a fabricação de máquinas; utilização ampla de energia a vapor. (Perez, 2004a, p. 35-44 *apud* Freitas, 2011, p. 20)

Este paradigma deve-se ao baixo custo do aço, resultando na utilização do aço acessível, permitindo sua aplicação em diversos setores da economia, como indústrias químicas, engenharia, alimentos, assim como no aprimoramento do motor a vapor para navio e embarcações de aço, no avanço da engenharia química e civil, no

⁵ “A partir de 1875, a era da siderurgia e da engenharia pesada (elétrica, química, civil e naval) viu a proliferação de ferrovias transnacionais e navios a vapor transcontinentais, permitindo um intenso desenvolvimento do comércio internacional e a primeira “globalização””. (Tradução nossa).

desenvolvimento de equipamentos elétricos, uso de cobres, na popularização de alimentos enlatados e engarrafados, e na adoção de embalagens.

Em relação as infraestruturas dava-se em conta a importância dos barcos para locomoção, das grandes redes de ferrovias e redes elétricas.

Os fundamentos deste paradigma eram a construção de gigantes estruturas de aço, as economias de escala e a integração vertical, a distribuição de energia para a indústria, a ciência como força produtiva, as redes e os impérios mundiais, a padronização universal, a contabilidade de custos para aumentar o controle e a eficiência e as grandes escalas para o domínio do mercado mundial. (Perez, 2004a, p. 35-44 *apud* Freitas, 2011, p. 21)

A quarta revolução, de 1908, era concebida pelo petróleo, o automóvel e a produção em massa. A produção industrial adotou os novos métodos para produção em massa, resultando em aumento da eficiência e redução de custos.

In 1908, with the launch of Ford's Model-T, the age of the automobile and highways, of oil and plastics, and of universal electricity and mass production shook up patterns of working and living once more. In this instance, the US led the way, harnessing the interrelated technologies and infrastructures to produce the great surge of development that created the mass-produced, suburban American dream⁶. (Perez, 2016, p. 5)

Os impactos sociais foram por mais demanda por trabalhadores em fábricas, impulsionando o êxodo rural; as cidades expandiram-se rapidamente para acomodar a crescente população urbana e a mão de obra industrial, resultando em desafios para o governo em termos de serviços públicos e infraestrutura.

Nesse momento, surgem as novas organizações trabalhistas, busca por melhores condições de trabalho, salários e benefícios aos trabalhadores industriais.

Nesse período, ocorrem impactos significativos no desenvolvimento de instituições, impactos econômicos e políticos, aumento de crescimento do poder empresarial. Assim que a tecnologia é difundida e torna-se grande empresa, sendo dominante no mercado, pressionando para outras adequações, é que surge o papel do governo, com o objetivo de regular e proteger o mercado de trabalho.

⁶ “Em 1908, com o lançamento do Modelo T da Ford, a era do automóvel e das auto-estradas, do petróleo e dos plásticos, da electricidade universal e da produção em massa abalaram mais uma vez os padrões de trabalho e de vida. Neste caso, os EUA lideraram o caminho, aproveitando as tecnologias e infra-estruturas inter-relacionadas para produzir a grande onda de desenvolvimento que criou o sonho americano suburbano, produzido em massa”. (Tradução nossa).

Nesse momento, diversas tecnologias permitiram a produção em massa dos automóveis, como petróleo mais barato, motor de combustão, transporte de carga, eletrodomésticos etc.

As redes rodoviárias, autopistas, portos e aeroportos, as redes de oleodutos, a eletricidade industrial e as telecomunicações eram as infraestruturas que acentuavam a economia naquele momento.

O paradigma consistia na produção em massa e mercados massivos, nas economias de escala e integração horizontal, na padronização de produtos, no uso intensivo de energia com base no petróleo, nos materiais sintéticos, na especialização funcional e pirâmides hierárquicas, na aglomeração de pessoas em centros metropolitanos. (Perez, 2004a, p. 35-44 *apud* Freitas, 2011, p. 22)

A quinta revolução, de 1971, era caracterizada pela informação e telecomunicações, nos Estados Unidos, espalhando-se para Europa e Ásia. Foi concebida com a informação da revolução da microeletrônica barata, computadores, softwares, telecomunicações, instrumentos de controle assistidos por computador, biotecnologia, e materiais de inteligência artificial, robótica, internet das coisas, permitindo uma conectividade global, encurtando distâncias e facilitando a comunicação instantânea em escala global, elevou a preocupação para o desemprego tecnológico e qualificação profissional, a informação e a confiabilidade dos dados ocasionaram desafios regulatórios, segurança cibernética e ética ao uso de tecnologias.

The year that Intel's microprocessor was launched, our current age of information and communication technologies (ICT) was initiated. It is important to emphasise that, when identifying these shifts as 'revolutions', we are not referring only to the radical new technologies themselves. True, each of these technological leaps has brought with it a whole new set of interrelated innovations, industries and infrastructures. But it is the potential of these technologies to increase productivity across the whole economy that makes them truly revolutionary⁷. (Perez, 2016, p. 5).

Para compreender o impacto das TICs, é essencial analisar como essas inovações têm transformado setores econômicos e sociais, promovendo maior produtividade e competitividade global. Diante da revolução que estamos vivendo, é crucial aprofundarmos na quinta revolução, pois, segundo Carlota Perez, as TICs podem acelerar

⁷ “No ano em que o microprocessador da Intel foi lançado, iniciou-se a nossa era atual de tecnologias de informação e comunicação (TIC). É importante sublinhar que, ao identificar estas mudanças como “revoluções”, não nos referimos apenas às próprias novas tecnologias radicais. É verdade que cada um destes saltos tecnológicos trouxe consigo todo um novo conjunto de inovações, indústrias e infraestruturas inter-relacionadas. Mas é o potencial destas tecnologias para aumentar a produtividade em toda a economia que as torna verdadeiramente revolucionárias”. (Tradução nossa).

a transição para a sexta revolução, alinhadas à quebra de barreiras institucionais. Isso aponta para um futuro de contínuas mudanças e novas possibilidades, com a evolução das tecnologias a desempenharem um papel chave na formação do novo paradigma econômico e social.

CAPÍTULO 2 – A 5ª REVOLUÇÃO TECNOLÓGICA: TECNOLOGIAS DIGITAIS

2.1 definições e origem

Este capítulo irá aprofundar as discussões sobre as tecnologias da informação e comunicação, assim como seus desmembramentos tornam-se fortes aliados na quebra de barreiras para uma transformação verde, mudança que precisa ocorrer, devido aos rumos e problemas globais enfrentados, provocados por ações humanas. As Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) estão moldando a economia e os padrões globais. Este item explora as inovações e tecnologias que impulsionam essas mudanças, bem como seus desdobramentos recentes. Desde o início, as tecnologias têm sido aliadas da transformação. Portanto, definir e explicar essas tecnologias e suas principais funções ajudará a entender como elas podem contribuir para a transformação verde.

Segundo Castellacci (2006), com o aparecimento dos primeiros computadores, em 1940, a expansão dos semicondutores, a criação do primeiro microchip da Intel em 1971, o desenvolvimento dos semicondutores, das telecomunicações, e a variedade de serviços ligados à internet evidenciam o novo paradigma com a quinta revolução industrial. Esta nova onda longa está baseada na formação de várias inovações relacionadas ao digital, tendo como insumo principal o chip da microeletrônica, provendo uma nova infraestrutura: as telecomunicações e a internet, comumente chamada de TICs.

Perez (2002) define as TICs como Tecnologias da Informação e Comunicação, dentro da quinta revolução industrial, sendo tecnologias responsáveis por impulsionar a sociedade e a economia. Assim, as TICs contemplam inovações digitais, desde a invenção do microchip até as telecomunicações, “proporcionando um novo paradigma tecnoeconômico, no qual as estruturas sociais são profundamente transformadas, quebrando paradigmas e alterando de forma significativa as dinâmicas do capitalismo contemporâneo” (Perez, 2002, p. 9).

As tecnologias da informação e da comunicação (TIC) difundiram rapidamente nas últimas duas décadas, devido a três pilares: o rápido desenvolvimento tecnológico dos semicondutores, evolução das telecomunicações e mais recente com a gama de serviços provenientes da internet. (Castellacci, 2006).

Em 1960, as pesquisas dos primeiros computadores vieram majoritariamente de recursos governamentais, em 1970 começou-se a exploração comercial dos

computadores, e no final de 1970 os microcomputadores começaram sua expansão, já nos anos 1990, a popularização da internet e o desenvolvimento da World Wide Web mudaram drasticamente o cenário das TICs, nos anos 2000, smartphones e internet móvel solidificaram as TICs, até chegarmos nas evoluções tecnológicas recentes, onde as tecnologias digitais estão dominando a maneira de produzir e realizar negócios, presente em todos os setores da economia.

As Tecnologias de Informação e Comunicação desempenham um papel fundamental na sociedade moderna, elas permitem a rápida troca de informações em todo o mundo, facilitando a colaboração, o acesso ao conhecimento, a automação de processos e o desenvolvimento de novos produtos e serviços. Ao impactar o ecossistema, consequentemente, elas pressionaram por infraestruturas. Assim uma nova infraestrutura foi estabelecida, baseada na internet e comunicações por celulares, com novas indústrias dominantes, com capacidade das tecnologias de comunicação à informação para transformar qualquer indústria e atividade não aplicada (Perez, 2017).

Para compreender o impacto profundo das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) na sociedade contemporânea é essencial explorar o paradigma que essas tecnologias ajudam a moldar. Esse paradigma é caracterizado por um uso intensivo da informação, uma integração descentralizada e estruturas em rede, e a valorização do conhecimento como um capital intangível. Além disso, abrange a heterogeneidade, a diversidade e a adaptabilidade dos mercados, a segmentação de mercados e a proliferação de nichos, bem como a combinação de economias de escopo e escala. “A globalização, com sua interação entre o global e o local e a comunicação global instantânea também são componentes chaves desse paradigma” (Perez, 2004a, p. 35).

Dentro desse contexto, as principais inovações das TICs surgem como forças transformadoras, redefinem o funcionamento das instituições. A seguir, exploraremos essas inovações e seu papel crucial na configuração do nosso ambiente econômico e mais sustentável, importantíssimo nos dias atuais. Ao redefinir as práticas como redução, uso consciente, eficiência e redução de desperdícios, as tecnologias a seguir são essenciais para quebra no paradigma atual e a transformação da sociedade para um caminho verde, para que possamos conseguir uma economia mais sustentável.

2.2 Tecnologias Precedentes

O digital está presente nos negócios e na vida de todos, assim, para chegarmos no modelo de hoje é importante descrever as tecnologias precursoras que permitiram essa estrutura. Esse avanço está intimamente ligado à evolução dos semicondutores e à miniaturização dos circuitos eletrônicos, o que abriu caminho para a microeletrônica e, eventualmente, para a criação de computadores compactos e dispositivos móveis, internet e uma série de desdobramentos recentes, como a computação em nuvem, a inteligência artificial (IA) e o big data foram diretas beneficiárias dessa evolução tecnológica.

O processamento de dados refere-se à capacidade de realizar análises sobre grandes volumes de informações, e essa evolução tem sido fortemente impulsionada por componentes como os semicondutores e a microeletrônica. Os semicondutores, presentes em chips de alto desempenho são essenciais para garantir que o processamento de dados seja rápido e eficiente. A microeletrônica, que se ocupa da fabricação de circuitos integrados e componentes eletrônicos miniaturizados, é um complemento dos semicondutores ao possibilitar o desenvolvimento de processadores e unidades de memória mais compactos e poderosos. Juntas, essas tecnologias permitem a criação de sistemas capazes de realizar operações em paralelo, fundamentais para o processamento em tempo real exigido por tecnologias como Inteligência Artificial (IA) e Big Data, garantindo que as tarefas exigentes sejam executadas de maneira eficiente e escalável.

O armazenamento de dados envolve a capacidade de guardar grandes volumes de informações de forma segura e acessível. Os semicondutores são um componente crucial nesse processo, com unidades de armazenamento baseadas em chips, como SSDs, oferecendo alta velocidade e eficiência no acesso e gravação de dados. A computação na nuvem tem se tornado uma solução dominante para o armazenamento de dados, permitindo que informações sejam guardadas de forma distribuída em servidores remotos, garantindo escalabilidade e acessibilidade global.

A comunicação de dados é responsável pela transferência de informações entre diferentes sistemas, dispositivos e locais, sendo um aspecto fundamental para o funcionamento de tecnologias como a computação na nuvem e IA. A internet, como infraestrutura de comunicação global, permite a transferência de dados em tempo real entre dispositivos e servidores, o que é essencial para a operação de sistemas distribuídos e a troca de informações entre diferentes partes de um sistema de IA. A internet e a internet

móvel, são fundamentais para garantir a comunicação eficiente entre dispositivos conectados, servidores e sistemas em nuvem.

O computador é o coração do sistema digital moderno, onde praticamente todas as atividades são realizadas. Ele desempenha um papel essencial em três aspectos interdependentes: processamento, armazenamento e comunicação. Esses aspectos são fundamentais para o funcionamento de tecnologias avançadas como Big Data, computação na nuvem e Inteligência Artificial.

O processamento, armazenamento e comunicação são interdependentes e essenciais para o funcionamento de tecnologias avançadas como Big Data, computação na nuvem e Inteligência Artificial, eles garantem que dados possam ser processados, armazenados e compartilhados de forma eficiente e em tempo real, possibilitando a inovação e a transformação digital que estamos vivendo, no entanto sem as tecnologias precedentes a seguir não seria possível.

2.2.1 Semicondutores

O desenvolvimento dos semicondutores exemplifica de maneira impressionante como a ciência e a tecnologia podem gerar transformações profundas e duradouras na sociedade. Criados na década de 1940, esses dispositivos são fundamentais para sustentar o atual sistema de tecnologias digitais e continuam a influenciar inovações, refletindo o conceito de ondas longas por serem uma tecnologia que atravessa décadas com impacto contínuo.

O verdadeiro marco na história dos semicondutores foi a descoberta do transistor, permitindo a construção de circuitos mais compactos e confiáveis, consentindo, assim, a fabricação de circuitos integrados. Estes, por sua vez, possibilitaram a miniaturização dos circuitos eletrônicos, combinando múltiplos componentes em um único chip de semicondutor e marcando o início da era da microeletrônica (Tigre; Noronha, 2013).

A indústria de semicondutores surgiu a partir da invenção do transistor em 1947, esse mecanismo possibilitou grandes consequências em relação ao tamanho e ao consumo de energia. Após esse avanço veio o System on a Chip (SoC), proporcionando toda a evolução em um único chip, como processador, memória, controle de entrada e saída, gráficos, conectividade e outras funções.

A evolução das tecnologias digitais está relacionada diretamente com os semicondutores, onde é possível identificá-los em diversos dispositivos eletrônicos, resultando em respostas aos anseios desde mais básicos aos mais complexos para a sociedade. Os semicondutores, essenciais para a criação de dispositivos mais eficientes, permitiram o desenvolvimento de tecnologias que impulsionam práticas mais sustentáveis em diversos setores. A miniaturização dos semicondutores permitiu que os circuitos integrados se tornassem cada vez menores e mais poderosos, levando à evolução exponencial do poder de processamento e à criação de computadores compactos, smartphones, tablets. As tecnologias digitais modernas, como as conhecemos, seriam inviáveis sem o avanço dos semicondutores.

O uso de semicondutores é e será bem importante para alcançarmos as metas climáticas coletivas até 2050, principalmente para a redução de emissão de CO₂, exigindo práticas padronizadas para obtermos um futuro de gases de efeito estufa zero líquido.

O desenvolvimento contínuo dessas tecnologias possibilita o progresso em várias áreas, transformando tanto a economia quanto a sociedade. A evolução dos semicondutores destaca como a inovação científica e tecnológica pode quebrar barreiras institucionais e promover uma transformação verde. O desenvolvimento dessas tecnologias não apenas redefiniu a produtividade e a comunicação, mas também se tornou essencial para alcançar metas climáticas. A trajetória dos semicondutores, desde a descoberta do transistor até os circuitos integrados, simboliza o potencial transformador que impulsionou a era digital e continua moldando nossa infraestrutura tecnológica, impulsionando a microeletrônica. (Perez, 2002).

2.2.2 Microeletrônica

A revolução da microeletrônica foi fundamental para o surgimento dos microprocessadores, que proporcionaram o poder de processamento em dispositivos como computadores e smartphones. A introdução do microchip catalisou o aumento exponencial da capacidade computacional, promovendo a disseminação de dispositivos eletrônicos de uso pessoal. O advento dos computadores pessoais, seguido pela explosão da internet, deu início à formação do moderno sistema de tecnologia digital. Com a chegada da banda larga, a internet se consolidou como uma infraestrutura global que impulsiona a inovação e facilita a comunicação, criando uma plataforma robusta para o surgimento de novos serviços e negócios digitais.

A microeletrônica tornou-se possível devido aos avanços contínuos na fabricação de semicondutores, permitindo a integração de milhões de transistores em um único chip, resultando em microprocessadores e sistemas complexos.

A introdução do que depois se denominou microcomputador 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; Noronha, 2013).

A miniaturização e a integração contínuas dos semicondutores permitiram a fabricação de chips em escala nanométrica, o que possibilitou a criação de microprocessadores com capacidades computacionais muito superiores.

Há diversos indícios que a microeletrônica foi a base para o novo paradigma tecnoeconômico, Perez (1991) e Tigre (1997) acreditam que por meio da microeletrônica a sociedade sofreu mudanças radicais, no âmbito econômico e social, resultando em diversas mudanças técnicas, organizacionais, processos, aparecimento de novos produtos e surgimento de novas indústrias, uma inovação que transformou as tecnologias de informação e comunicação. Por meio da microeletrônica os processos industriais anteriormente humanizados foram substituídos por equipamentos automatizados, resultando em aumento da produtividade em diversos setores da economia.

A revolução da microeletrônica resgata o conceito de destruição criativa do Schumpeter, assim a nova tecnologia resulta em um crescimento intensivo e precisa adaptar-se aos novos padrões e regras e, ao mesmo tempo, pressionando por uma infraestrutura revigorada diferente da anterior (Tigre, 1997).

A indústria de microeletrônica, por meio da utilização do chip, permite evoluções de tecnologias paralelas, como evoluções de computadores, celulares, impressoras. Também, pode-se verificar sua capacidade de incorporação a produtos pré-existentes, diminuindo o tamanho, redução do consumo de energia, aumento do desempenho e eficiência. E, ainda, a aplicação em gestão de processos, aumentando a flexibilidade e a produtividade do trabalho, a eficiência do capital, e a produção e processamento de informação que modificam a organização institucional das empresas. Percebemos, assim, o impacto tecnológico e institucional promovido pela mudança no paradigma.

A microeletrônica tem o potencial de uso universal, podendo ser utilizado em diversas atividades produtivas, por mais que seja uma atividade intermediária, não há

limites para sua aplicação. A microeletrônica continua transformando a comunicação e a tecnologia digital, moldando a era moderna da computação e contribuindo para a evolução contínua da tecnologia.

A microeletrônica também possibilita o desenvolvimento de tecnologias de comunicação, como redes 5G e Wi-Fi, que dependem de componentes eletrônicos miniaturizados e de alto desempenho para funcionar, com chips menores, que se dá por meio da eficiência energética, otimização de recursos renováveis e eletrificação sustentável. A IBM e a Samsung foram pioneiras e conseguiram reduzir ainda mais os chips, para 2nm, melhorando a eficiência e sustentabilidade dos computadores.

Os avanços na microeletrônica impulsionaram a popularização da internet. Sensores, microprocessadores e microchips integrados se tornaram as principais tecnologias da era digital, assim como será uma das tecnologias de base para transformação verde. Essa evolução e sensores serão importantes para ultrapassar barreiras institucionais.

Além disso, a crescente demanda por semicondutores de alto desempenho para tecnologias avançadas, como inteligência artificial, big data e computação em nuvem, gerou inovações no design de chips.

A evolução dos semicondutores e da microeletrônica desempenhou um papel fundamental na quinta revolução industrial, fornecendo os componentes essenciais que alimentam a transformação digital. As inovações na microeletrônica e os avanços nos semicondutores são diretamente responsáveis pela miniaturização, aumento da eficiência e melhoria da conectividade de dispositivos tecnológicos, que são a base das atuais infraestruturas de computação em nuvem, inteligência artificial e big data.

Componentes microeletrônicos avançados são essenciais para a criação de dispositivos e sistemas mais eficientes, como sensores inteligentes, dispositivos de controle de energia, veículos elétricos e sistemas de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas.

Além disso, a miniaturização e a integração de funcionalidades em chips cada vez menores, como os SoCs (System on Chips), tornam possível a criação de soluções mais sustentáveis, com menor consumo de recursos e redução de resíduos. A microeletrônica, portanto, não só contribui para a inovação tecnológica, mas também é crucial para atender às necessidades da transformação verde, ajudando a construir um futuro mais sustentável

2.2.3 Computadores

Os primeiros computadores eletrônicos foram desenvolvidos durante o período da segunda Guerra Mundial com o objetivo de processar os cálculos matemáticos de balística, primeiro computador comumente conhecido foi batizado ENIAC (Calculadora e Integrador Numérico Eletrônico), em 1946 (Cortada, 2006).

A segunda geração ocorreu entre 1956 e 1963, com a evolução do microprocessador, impulsionada pela descoberta dos transistores, em meados de 1948, assim em 1956, produziu-se computadores com essa tecnologia, a evolução continuou em ritmo acelerado para que em 1964 e 1970, provenientes da evolução do microcondutores e microprocessadores surgissem a terceira geração, com a diminuição dos chips surgem a quarta geração e o minichip vem trazendo a quinta geração de computadores, por meio dos supercondutores.

As funções básicas de um computador são a entrada, o controle dessa entrada, o armazenamento e o processamento desses dados e a saída de informações. O computador é capaz de processar e armazenar gigantesco volume de dados, por meio do computador é possível conectar-se com diversos locais no mundo, permitindo uma conectividade em tempo real.

Muitas operações realizadas pelo computador são similares às efetuadas manualmente, tais como somar, multiplicar, etc. Do mesmo modo, o computador só realiza uma dessas operações por vez (os modernos computadores estão sendo desenvolvidos para realizar mais de uma operação simultaneamente). Portanto, se quisermos realizar muitas operações, estas deverão seguir alguma seqüência apropriada.

Diz-se ao computador que operações devem ser efetuadas por meio de instruções que normalmente não contêm apenas informação sobre uma operação que deve ser efetuada, mas também indicam quais os argumentos para a operação.

O importante é o uso de computadores em áreas como inteligência artificial e big data, onde o processamento de grandes volumes de informações e o desenvolvimento de algoritmos inovadores são cruciais para avanços, o computador é o coração das tecnologias modernas, sua importância é inegável para a estrutura do sistema digital consequentemente para a gestão a distância, sendo base para gerenciamento mais sustentável

Assim alinhado com a conectividade global e a internet, computadores serão também o coração da transformação verde, bem como na criação do primeiro computador

peçoal, a IBM também identificou sistemas que podem reduzir o uso de energia, por meio de processamento gráfico pode otimizar a potência e a eficiência energética.

2.2.4 Internet

A internet teve suas origens na década de 1960, quando foi desenvolvida uma rede de comunicação inicial chamada Arpanet, nos Estados Unidos, com o objetivo de conectar instituições de pesquisa e militares. A Arpanet foi a precursora da internet moderna, criada para compartilhar informações de maneira rápida e eficiente entre computadores de diferentes locais, o projeto criou um conceito inovador chamado de DARPA, em que, ao invés de utilizar um sistema centralizado de controle, a rede operaria por meio de um conjunto de computadores autônomos. (Leiner, 1997).

Esse sistema se expandiu rapidamente e, ao longo das décadas seguintes, evoluiu para a World Wide Web (WWW). A criação da World Wide Web transformou a maneira de acessar as informações e conexões com a internet.

Nos anos 1990, a internet começou a se popularizar, à medida que provedores comerciais passaram a oferecer serviços de conexão ao público. Com a expansão dos navegadores e da infraestrutura de telecomunicações, a Internet se tornou acessível a milhões de usuários no mundo inteiro (Castells, 1996). A internet funciona como um grande repositório de informação, possui a maior quantidade de dados diversos do mundo e onde pode ser facilmente acessado, anteriormente para nos comunicarmos era muito caro, e tínhamos pouco acesso, seu alcance portanto é global e tornou a comunicação fácil. A internet permitiu que possamos trabalhar e nos comunicar mediante rede sem depender de um espaço físico.

Castells (2003) compreende a internet como “a ferramenta tecnológica e a forma organizacional que distribui informação, poder, geração de conhecimento e capacidade de interconexão em todas as esferas de atividades” (Castells, 2003, p. 220).

A importância da internet para as tecnologias digitais modernas é imensa. Ela é a infraestrutura fundamental que conecta bilhões de pessoas e dispositivos, possibilitando o compartilhamento de informações em tempo real e a criação de novos serviços e produtos digitais. A internet transformou a forma como nos comunicamos, trabalhamos e consumimos informações, sendo o principal motor da transformação digital, permitindo novas formas de comunicação, negócios e interação social (Castells, 1996).

A internet móvel se configura como dispositivos sem fio que permitem conectividade a uma grande leva de aplicativos, atualmente os mais comuns usados para acessar a internet são celulares e tablets. Os aplicativos tornam o uso da internet móvel distinto, facilitando a interação com o mundo e permitindo o acesso a serviços baseados em localização, monitoramento de saúde, pagamentos e armazenamento em nuvem, além de serem responsáveis pela ampliação das capacidades da internet móvel e pela diversificação dos modelos de negócios (Manyika *et al.*, 2016).

A internet e a internet móvel desempenham papéis centrais na transformação digital, redefinindo a maneira como empresas, governos e indivíduos operam, se comunicam e interagem. Elas são as infraestruturas essenciais para a digitalização global, permitindo o acesso a serviços e dados em tempo real, de qualquer lugar e a qualquer momento. Essas tecnologias estão impulsionando a inovação em todos os setores, promovendo a inclusão digital, transformando a maneira como vivemos e trabalhamos, e desempenhando um papel crucial na transição para uma economia mais sustentável e verde.

A transformação verde, que busca reduzir o impacto ambiental e promover uma economia mais sustentável, depende fortemente das capacidades tecnológicas e computacionais para atingir seus objetivos, como otimização de processos industriais, gestão inteligente de energia, tecnologias limpas, descarbonização, prevenção de impactos climáticos.

Os avanços tecnológicos pavimentaram o caminho para a transformação digital e estabeleceram as bases para as tecnologias que moldam o mundo contemporâneo, como o Big Data e a Inteligência Artificial. Mais do que marcos históricos, o legado dos semicondutores e do microchip é o alicerce sobre o qual as futuras revoluções tecnológicas continuarão a ser construídas, incluindo a transição verde, que agora exige a integração de tecnologias digitais e sustentáveis para enfrentar os desafios climáticos e energéticos.

2.3 Sistema de Tecnologia Digital

O sistema tecnológico pode ser entendido como estruturas em que as principais inovações geram novas inovações. Elas precisam de complementos tanto na cadeia anterior quanto posterior, e também facilitam o surgimento de inovações relacionadas,

incluindo aquelas que competem diretamente. Essa interconexão dinâmica é o que define o conceito de um sistema tecnológico (Perez, 2009).

O Sistema Tecnológico Digital (2010-2020) possui três grandes blocos: computação em nuvem, big data e inteligência artificial, sendo o core para viabilizar as demais (Sturgeon, 2019).

Assim, o Big Data é responsável por melhorar os dados presentes ao consumidor, indústrias, redes sociais, vídeos e máquinas, organizando-se em o grande volume de dados objetivando os melhores resultados, a computação na nuvem é o local de armazenamento, geralmente por meio de um software ou plataforma, sem necessidade de uma infraestrutura física, e a inteligência artificial é a responsável pelas melhores previsões, por meio de um aprendizado neural das máquinas via reconhecimento de padrões. (Sturgeon, 2019).

Por sua vez, essas tecnologias digitais permitem às empresas colocarem em prática novos modelos de negócio baseados em dados, por meio de algoritmos de megadesenvolvimento que formam a base da economia de plataforma ou plataformização (Kenney; Zysman 2016).

A plataformização facilita o gerenciamento de redes inteligentes (*smart grids*), que integram energias renováveis como solar e eólica, equilibrando a oferta e a demanda de energia de forma mais eficiente. Além disso, sistemas on-line permitem que consumidores monitorem e otimizem seu consumo energético, incentivando a transição para fontes renováveis, para que ocorra a transformação verde é necessária uma nova revolução tecnológica, alinhando tecnologia com práticas sustentáveis.

Perez (2009) observa que as “revoluções tecnológicas podem ser definidas como um conjunto de avanços radicais inter-relacionados, formando uma grande constelação de tecnologias interdependentes; um *cluster* de *clusters* ou um sistema de sistemas” (Perez, 2009, p. 189), assim, como vimos até então, as tecnologias vêm evoluindo, para desembocarem em inovações que serão essenciais para quebrar barreiras e acontecer uma nova revolução, a possível revolução verde.

Essa revolução dependerá de mudanças institucionais, organizando-se e mudando padrões de acordo com a evolução das tecnologias digitais, pressionando o mercado e conseqüentemente o governo para políticas de adaptação ou correção.

O sistema tecnológico digital, segundo Sturgeon (2019), Lee (2018), Agrawal, Gans e Goldfarb (2018), é resumido em três blocos que sumarizam bem o sistema de

tecnologias digitais (2010-2020), com suas funções que serão detalhadas a seguir, sendo as tecnologias centrais que impactam ou influenciam as demais.

Bigdata: responsável pelos fluxos de dados gerados pelo consumidor e pela indústria a partir de sensores onipresentes e monitoramento de vídeo, fluxos de cliques, dados de localização, produtos "inteligentes" e máquinas etc., resultando em grandes amostras e resultados mais robustos.

Nuvem: responsável pelo armazenamento centralizado e software, servidores e plataformas, realizando atualização constante e automatizada.

Inteligência artificial: Melhores previsões e mais bem tomadas de decisão empresariais, de redes neurais a aprendizado de máquina, autonomia, previsão, replicação e automanutenção e autorregulação crescente e customização em massa para os usuários.

As tecnologias precedentes foram importantes, mas acredita-se que esses três grandes blocos - computação em nuvem, big data e inteligência artificial - serão a central da transformação verde, auxiliando a viabilizar outras tecnologias com o objetivo de difundir a transformação verde.

2.3.1 Big Data

Existem diversas definições do que é Big Data, assim algumas que mais ganham força quando pensarmos em transformação verde: Bigdata é uma intensa variedade de informações, em alta velocidade e volume, que exigem formas inovadoras de analisar informações, desse modo Bigdata é conhecida como os 3vs, “volume”, “variedade” e “velocidade”, sendo as três variáveis que impactam as análises de dados. (Gartner, 2020). A gestão desses 3vs é possível ter ganhos estratégicos e de tomadas de decisões gerenciais muito melhores, antecipando ou até mesmo prevenindo um problema, é possível antecipar também o comportamento de pessoas. O bigdata permite trabalhar informações para trazer resultados mais rápidos, antes mesmo de ela ser otimizada, permitindo que as empresas aproveitem essas informações para tomar decisões e garantindo sustentabilidade do mercado.

Bigdata diz respeito à expressiva quantidade de dados cada vez mais disponível para sociedade, podem ser dados pessoais, comerciais, localização, tendência de compra, comportamentais, atualmente de fácil acesso, apenas utilizando internet ou smartphone.

Um dos principais benefícios do Big Data é a capacidade de analisar dados em tempo real para tomar decisões mais rápidas e precisas. O uso do Big Data permite que as empresas respondam rapidamente às mudanças nas condições do mercado, adaptem suas estratégias de negócios e ofereçam produtos mais personalizados para os consumidores. (Davenport; Dyché, 2013, s.p.)

Big Data é responsável por análises de textos, áudios, vídeos e redes sociais buscando as melhores práticas para conseguir obter os melhores resultados, uma espécie de mineração dos dados, tornando mais acessível e fácil para tomada de decisão gerencial, geralmente essa mineração de dados é armazenada em um servidor, assim o papel do analista de dados é controlar e manipular esses dados por meio de novas tecnologias, é preciso técnicas robustas de Bigdata buscando adaptação ao grande volume de dados.

Temos três fases de *Analytics*, sendo a primeira o modo tradicional, com análises e reportes advindos de dados internos, para decisões internas e lentas; a segunda, já encobrendo a era do Big Data, com dados mais complexos e não estruturados sobre clientes, englobando novas capacidades computacionais e analíticas, com o surgimento dos profissionais especializados nessas tecnologias, os cientistas de dados, com um maior fluxo de transações e negócios ocorrendo on-line e, por fim; a terceira, com uma mistura do *Analytics* tradicional com o Big Data, de forma mais integrada ao negócio, com um modelo de entregas e visões de negócio rápido e ágil, de forma a utilizar os dados ao nível de decisão. (Davenport, 2012, s.p.)

A grande quantidade de dados da economia digital pressionou para o desenvolvimento de máquinas, assim tornou-se possível interpretar esses dados, que em um primeiro momento os dados estão dispersos, assim surge o Bigdata para consolidar esses dados, adicionando um filtro ou organizando-o, após a organização, os dados resultam em melhores experiências (Unctad, 2019).

O Big Data tem se mostrado uma ferramenta crucial na promoção da transformação verde, fornecendo informações valiosas que ajudam a mitigar os impactos ambientais e a acelerar a transição para uma economia mais sustentável. Ao processar e analisar grandes volumes de dados em tempo real, o Big Data permite que governos, empresas e organizações monitorem e otimizem processos, identifiquem padrões de consumo e implementem soluções mais eficientes e ecológicas.

O Big Data na transformação verde permite gestão eficiente de recursos naturais, como água e energia, reduz desperdícios e otimiza processos em tempo real, resultando em redução do consumo de energia, promove práticas mais sustentáveis por meio da agricultura de precisão, enquanto, na economia circular, facilita o rastreamento de materiais e a redução de resíduos. Além disso, cidades inteligentes e tecnologias de

captura de carbono se beneficiam do Big Data para otimizar o uso de recursos e reduzir o impacto ambiental.

O Big Data tem um papel crucial na transformação verde, fornecendo às instituições públicas e privadas a capacidade de analisar vastas quantidades de dados ambientais, econômicos e sociais para promover práticas sustentáveis e reduzir o impacto ambiental. A análise de Big Data permite uma compreensão mais profunda dos padrões ambientais e a previsão de mudanças climáticas, ajudando a guiar decisões e estratégias que aceleram a transição para uma economia de baixo carbono.

2.3.2 Computação na nuvem

A computação em nuvem é um modelo de tecnologia que fornece serviço de armazenamento onde os dados podem ser acessados remotamente, por meio da internet, é, portanto, a infraestrutura das TICs, composta por softwares, hardwares, redes, dispositivos que permitem armazenar e processar dados de diversas informações, sem a necessidade de infraestrutura física própria, o que reduz custos e melhora a eficiência, assim, conseqüentemente, é a infraestrutura mais poderosa das TICs, tornando o acesso global, mais fácil e rápido.

A computação em nuvem é global e proporciona serviços tanto para pessoas físicas tanto para empresas, por meio de guarda de documentos ou até mesmo empresas que utilizam de toda essa infraestrutura de forma remota, pode-se concluir que é uma infraestrutura completa da era digital, com recursos de computação sendo armazenados e entregues sob demanda como vários subprodutos ou serviços podem ser aproveitados em nuvem.

A computação em nuvem oferece uma série de vantagens importantes como escalabilidade, permitindo acessar dados sob demanda, usabilidade, com plataformas que facilitam o acesso por qualquer lugar do mundo, além de um modelo de baixo custo.

Assim a infraestrutura em nuvem desempenha um papel fundamental na transformação verde, facilitando a transição para uma economia mais sustentável ao oferecer uma infraestrutura robusta. Isso permite a centralização, o armazenamento e o processamento de dados em servidores otimizados, revolucionando a maneira como as empresas e governos operam. Dessa forma, a computação em nuvem contribui diretamente para a redução do impacto ambiental.

A nuvem é extremamente necessária para suportar as aplicações recentes de IA,

permitindo às empresas colocar em prática novos modelos de negócio baseados em dados, além disso a computação na nuvem é muito importante para consolidar o acesso a dados, uma ferramenta importante para resolver gargalos de difusão tecnológica na era digital, o processamento acessível viabilizou o aprendizado de máquinas. Com a evolução das redes neurais se fez necessária uma infraestrutura forte para conseguir suportar toda a evolução e testes proporcionado pela IA, dificilmente existiriam muitas outras tecnologias relacionadas sem um conjunto de dados disponíveis em nuvem (Unctad, 2019).

A Amazon Web Services (AWS), o Google Cloud, o Microsoft Azure e o IBM Cloud oferecem plataformas em nuvem com uma variedade de serviços, incluindo ferramentas para análise de dados, machine learning, bancos de dados gerenciados e infraestrutura escalável. Cada uma dessas plataformas proporciona soluções que abrangem computação e armazenamento, facilitando a construção e o gerenciamento de aplicativos e sistemas complexos de forma eficiente e confiável.

Um dos principais benefícios da computação em nuvem na transformação verde é a otimização do uso de recursos tecnológicos. Em vez de cada empresa ou organização precisar manter sua própria infraestrutura de TI, muitas delas estão migrando para plataformas de nuvem compartilhadas. Isso resulta em uma utilização mais eficiente dos servidores, que são configurados para operar de maneira ideal, reduzindo o consumo de energia e o desperdício de hardware. Data centers de grandes provedores de nuvem, como Google, Amazon Web Services (AWS) e Microsoft, estão cada vez mais adotando práticas sustentáveis, como o uso de energia renovável e a implementação de tecnologias de resfriamento eficientes, minimizando o impacto ambiental.

2.3.3 Inteligência Artificial

A inteligência artificial refere-se ao aprendizado para resolução de problemas, ao treinamento das máquinas para que execute atividades humanas por meio de regras e padrões. A evolução do Bigdata e computação na nuvem permitiu uma série de evoluções com isso, o homem consegue treinar uma máquina para desenvolver atividades por meio de mecanismos neurais, obtendo resultados similares ou melhores que humanos. As aplicações de IA podem ser por meio de robótica, linguagem natural, sistema de reconhecimento de voz.

Segundo John McCarthy, inteligência artificial é a ciência e a engenharia de fazer máquinas inteligentes, especialmente programas de computador inteligentes. (McCarthy, 1988).

A definição de Inteligência Artificial (IA), ainda em 2024 continua um desafio, vai além do imaginário de todos, e causa preocupação quanto a sua aplicabilidade e resultados na sociedade, estamos vivendo uma espécie inicial de revolução tecnológica baseada em IA, mas ainda não sabemos ao certo o que realmente o tamanho do seu impacto na sociedade, ainda é muito confuso suas vantagens e desvantagem e nem tudo que vemos pode ser uma IA, as vezes é apenas uma automatização.

Assim, a melhor definição sobre a inteligência artificial (IA) é: “a teoria e o desenvolvimento de sistemas computacionais capazes de realizar tarefas que normalmente requerem a inteligência humana” (Agrawal; Gans; Goldfarb, 2019, p. 140-141).

A comunidade científica aborda a IA em dois grupos, o primeiro mediante a regras de lógica matemática e em conjuntos de redes neurais e a segunda em uma abordagem de aprendizado inteligente, buscando entender melhor as camadas do cérebro humano (Lee, 2018).

Atualmente vemos um avanço em relação à IA, anteriormente até a década de 1980, a abordagem do aprendizado neural não teve grandes resultados, contudo, nos últimos anos, com o aprimoramento das redes neurais, conhecida como sistema de aprendizado profundo ganhou-se destaques

Esse aprimoramento e democratização resultaram em novas aplicações de IA por toda a economia. O Google, por exemplo, aplicou o aprendizado de máquinas e melhorou o nível de traduções de texto em sua plataforma e houve aparecimento de novas empresas como Open IA.

Outro ponto observado e ganha evolução dentro da IA é a predição, que é definida como “o processo de preencher as informações ausentes. A predição usa as informações que você tem, geralmente chamadas de ‘dados’, para gerar as que não tem” (Agrawal; Gans; Goldfarb, 2018, p. 24).

Outro avanço são a presença de algoritmos de alta performance, adicionados em sistemas complexos de IA, auxiliando em resoluções de problemas complexos para o ser humano.

O avanço em aprendizado de máquinas tornou os dados mais valiosos. O incremento no valor dos dados demandou mais redes de transmissão e armazenamento, impulsionando a computação em nuvem. Observa-se, entre Big Data, algoritmos de aprendizado de máquina e a computação em nuvem, uma interrelação tecnológica (Landes, 1969, p. 2).

O Sistema Tecnológico Digital atual avança de forma descontínua, à medida que tecnologias complementares criam demandas mútuas e resolvem gargalos emergentes (Rosenberg, 1976).

Essas tecnologias estão lançando as bases para a transição verde, permitindo o monitoramento ambiental, a otimização de recursos e a criação de soluções energéticas mais eficientes. Assim, as instituições continuarão desempenhando um papel central na navegação desse complexo ecossistema, garantindo que os benefícios sejam amplamente compartilhados e que os desafios éticos e ambientais sejam enfrentados com eficácia.

We may distinguish between three different types of green-digital innovations. The first type is the use of innovations to reduce the environmental footprint of ICTs themselves. [...] The second is the use of ICTs to improve innovations that occur in the green economy, i.e., related to those activities and companies devoted primarily to sustainability-oriented activities. [...] The third type is the use of digital technologies related to innovations outside either the ICT sectors or green energy sectors. These are introduced, for example, to abate their activities through electrification (such as transport), bring them into the green economy by introducing principles of genuine circularity (manufacturing), etc⁸. (Lema, Perez, 2024. p. 8).

Com a consolidação das TICs, o foco agora se desloca para a transição verde, onde a sustentabilidade se torna o novo eixo de inovação e governança. A integração das tecnologias digitais com objetivos ambientais, como a promoção de energia limpa e a redução de emissões, exige uma abordagem institucional que equilibre progresso tecnológico e proteção ambiental. Essa nova fase da transformação tecnológica demanda um alinhamento global para enfrentar os desafios climáticos, pavimentando o caminho para um futuro mais sustentável e equitativo.

⁸ Podemos distinguir entre três tipos diferentes de inovações digitais verdes. O primeiro tipo é a utilização de inovações para reduzir a pegada ambiental das próprias TIC. [...] A segunda é a utilização das TIC para melhorar as inovações que ocorrem na economia verde, ou seja, relacionadas com as atividades e empresas que se dedicam principalmente a atividades orientadas para a sustentabilidade. [...] O terceiro tipo é a utilização de tecnologias digitais relacionadas com inovações fora dos sectores das TIC ou dos sectores da energia verde. Estes são introduzidos, por exemplo, para reduzir as suas atividades através da eletrificação (como os transportes), trazê-los para a economia verde através da introdução de princípios de circularidade genuína (fabricação), etc. (Tradução nossa).

CAPÍTULO 3 – TRANSFORMAÇÃO VERDE: ORIGINANDO A 6ª REVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

3.1 Efeitos das atividades humanas nas mudanças ambientais

Antes de adentrar nas oportunidades e desafios de uma transformação verde, que pode resultar em uma quebra de paradigma, originando a sexta revolução tecnológica, é preciso entender o momento vivido. O capitalismo buscou suas evoluções e desenvolvimento, assim o homem provocou muitos danos a natureza objetivando o lucro e a transformação. A seguir, exploramos as principais ações humanas que motivaram esse trabalho, visto a preocupação ambiental principalmente com o aquecimento do planeta, caso não ocorra uma transformação verde é provável um futuro mais difícil. Acredita-se que, por meio de tecnologias, ser esse um caminho possível para quebrar barreiras institucionais e conseguirmos viver sem grandes danos, devido principalmente ao aquecimento do planeta, reduzindo emissões de combustíveis fósseis. Além disso, é preciso reduzir poluições, diminuir o desmatamento das florestas, e adotar melhorias de práticas agrícolas e o manejo de resíduos. Esse é o momento crucial para mitigar ações humanas para que possamos ter um futuro melhor.

O homem e a natureza interagem ao longo da história, essa interação é marcada por uma relação ambígua, onde a natureza fornece benefícios à sociedade, por meio de alimentos, água potável, solo fértil para plantio e captura de carbono, por outro lado o homem, explora a natureza de maneira insustentável, voltada principalmente para objetivos econômicos e de lucro, resultando em uma elevação da degradação ambiental em uma escala crescente. Essa degradação ambiental pode ser vista como parte de um ciclo de crescimento econômico alimentado por novas tecnologias (Perez, 2002).

Perez argumenta que, ao atingir o auge da fase de "excesso" de uma inovação, o sistema econômico começa a buscar uma reorganização para alcançar maior sustentabilidade, frequentemente por meio de uma mudança de paradigma tecnológico e social. Nesse sentido, um novo ciclo de inovação poderia surgir, com foco em tecnologias mais verdes e sustentáveis, revertendo parte da degradação ambiental (Perez, 2002).

Essa crescente intensidade dos impactos ambientais, causados pelas atividades humanas, tem gerado consequências drásticas para o clima e os ecossistemas globais. Nesse contexto, surge a proposta da sexta revolução tecnológica, que, segundo Carlota Perez, se fundamenta na necessidade de uma transição verde. A autora destaca que crises

ambientais, como as causadas pelas mudanças climáticas, criam uma pressão global que acelera a adoção de um novo paradigma tecnoeconômico, essencial para enfrentar os desafios ambientais. As tecnologias digitais desempenham um papel fundamental nesse processo, oferecendo soluções inovadoras para mitigar os efeitos adversos das ações humanas no meio ambiente (Perez, 2002).

O Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas do IPCC, o qual atribuiu às atividades humanas o aquecimento global, ficou mais ainda evidente a influência do homem sobre o clima. A concentração de gás carbônico, o mais importante gás presente no efeito estufa, aumentou consideravelmente desde revolução industrial, passando de 280 ppm para 379 ppm (IPCC, 2007). As mudanças climáticas já estão ocorrendo e, com 95% de certeza, são derivadas da ação do homem (IPCC, 2014).

A urgência em lidar com as mudanças climáticas e os demais limites ambientais está se tornando um aspecto crucial em diversas organizações no que tange a tomada de decisão. Um grande desafio está relacionado aos gases de efeito estufa, cuja intensificação resulta no fenômeno conhecido como aquecimento global, devido ao aumento da concentração de gases como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, esse fenômeno ocorre de forma natural, contudo o aquecimento global tem se intensificado devido às ações humanas, gerando impactos ambientais significativos, devido à natureza, que está sendo modificada ou até destruída por essas atividades humanas.

Segundo Soares e Higuchi (2006), o efeito estufa é essencial para regular o clima e manter as condições necessárias à vida na Terra. No entanto, quando os gases de efeito estufa estão em excesso, eles formam uma camada espessa demais, que retém calor de forma excessiva, aquecendo a superfície do planeta além do necessário. Esse aquecimento excessivo altera o clima global, gerando problemas ambientais e econômicos que afetam todas as nações.

Regras e leis serão importantes para que os impactos das ações humanas sejam minimizados. O protocolo de Quioto surgiu justamente para minimizar esses impactos, é um acordo internacional adotado em 1997 sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), com o objetivo de combater as mudanças climáticas ao estabelecer metas juridicamente vinculantes para os países industrializados reduzirem suas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). O protocolo busca mitigar o impacto ambiental ao propor medidas para reduzir as emissões geradas por essas ações humanas.

Assim os principais pontos explorados nesse trabalho, que ao ser mitigados poderão impactar drasticamente na transformação verde são: 1. queima de combustíveis fósseis (nos setores de transporte e indústria); 2. do desmatamento e das mudanças no uso da terra; 3. além de práticas agrícolas insustentáveis; e 4. da produção e manejo inadequado de resíduos.

1. **Queima de combustíveis fósseis:** Primeira e grande preocupação é com a emissão de CO₂. As indústrias são responsáveis por uma parte significativa das emissões de CO₂, especialmente devido à queima de combustíveis fósseis em processos de produção. A geração de eletricidade é fortemente dependente de carvão, petróleo e gás natural, assim como setores como a indústria de cimento, aço e petroquímica, têm suas bases com combustíveis fósseis, tornando mais difícil ainda essa transição, visto a infraestrutura industrial dependente de combustíveis fósseis.

Existe uma enorme preocupação com as indústrias, conforme citado acima as indústrias de cimento e transporte são as mais preocupantes e precisam de mudanças imediatas. De acordo com os dados mais recentes da International Energy Agency (IEA) e do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), a queima de combustíveis fósseis é responsável por uma parte significativa das emissões de gases de efeito estufa, sendo o transporte com 25% e as indústrias com 10%.

Indústria de cimento: a produção de cimento é uma das atividades mais emissoras de CO₂. Ela libera grandes quantidades de dióxido de carbono na transformação do calcário em clínquer, além da queima de combustíveis fósseis das fornalhas, sendo assim o concreto é um dos principais responsáveis pela emissão de CO₂. Entre 88,6% a 92,2% das emissões do concreto originam-se na produção do cimento, outra forma responsável por emitir um volume considerável de CO₂ é o transporte do concreto, mesmo em uma cidade como São Paulo, é responsável por em torno de 4% das emissões do concreto (Souza, 2012).

Para alcançarmos a sonhada transformação verde é preciso que essa indústria esteja mobilizada para reduzir CO₂ dos materiais cimentícios, sendo a estratégia mais popular reduzir a quantidade de clínquer da produção de cimento. (Lima; 2010).

Setor de Transportes – o transporte de mercadorias, seja por caminhões, navios ou aviões, também representa uma fonte significativa de emissões, especialmente devido ao uso de combustíveis fósseis.

Assim, segundo Fleury, Wanke (2016, p. 412), “são cinco os modais de transporte de cargas: rodoviário, ferroviário, aquaviário, dutoviário e aéreo. Cada um

possui características operacionais específicas e, conseqüentemente, estruturas de custos específicas que os tornam mais adequados para determinados tipos de produtos e de operações”.

Conforme a Confederação Nacional do Transporte - CNT (2011), a infraestrutura para transporte brasileira é considerada inadequada, quando comparada com as existentes em outros países em desenvolvimento de dimensões territoriais semelhantes.

O Brasil possui dimensões extensas, e decidiu-se no passado priorizar o modal rodoviário, ao utilizar isso para longas distancias gera ineficiências, além do mais uma infraestrutura não modernizada, ou seja, a ausência de investimentos públicos que visam modernização eleva o impacto ambiental, em especial os movidos pelos combustíveis fósseis; assim como a falta de manutenção implica no aumento de poluição.

2. Desmatamento e uso da terra: Em seguida, é o aumento do desmatamento que contribui significativamente para as emissões de CO₂, pois as árvores absorvem carbono. A eliminação das florestas reduz a capacidade de sequestrar esse gás, além de liberar o carbono armazenado nas árvores. A preservação e restauração de florestas, bem como o uso de práticas agrícolas sustentáveis, são essenciais para combater essa fonte de emissões.

As queimadas e incêndios florestais resultam em diversos impactos ambientais, como perda de biomassa, mudanças na vegetação das terras, degradação vegetal e principalmente emissão de carbono. (Cochrane; Schulze, 1999; Ribeiro; Assunção, 2002; Alencar *et al*, 2006; Smith *et al.*, 2014).

A degradação florestal causada pelo homem está relacionada com a exploração indevida da madeira, causando grandes danos ao meio ambiente, além disso para que a pratica seja devida é preciso seguir uma série de regras, o que não ocorre na exploração ilegal, não existe uma extração florestal sustentável, impactando na composição de espécies e o funcionamento da floresta. Ao explorar ilegalmente a madeira, umas das ações humanas pode ser as queimadas florestais, contribuindo também para o aumento dos incêndios, tornando a emissão de carbono por meio de incêndios florestais outra peça fundamental na redução de emissão de carbono, uma vez que incêndios florestais contribuem aproximadamente com 25% das emissões de carbono (Aragão *et al.*, 2014).

O desmatamento é um dos principais fatores responsáveis pelas emissões de CO₂ e pelo agravamento das mudanças climáticas. Ele ocorre quando as florestas, que desempenham um papel vital na absorção de carbono da atmosfera, são destruídas para

dar lugar a atividades humanas, como a agricultura, pecuária, exploração madeireira e urbanização. Ao remover as árvores, a capacidade natural de captura de carbono é reduzida, enquanto o carbono armazenado na vegetação é liberado de volta para a atmosfera, contribuindo diretamente para o aumento da concentração de gases de efeito estufa. Além disso, o desmatamento afeta a biodiversidade, os ciclos hídricos e a qualidade do solo, exacerbando os impactos ambientais e comprometendo a sustentabilidade de longo prazo.

3. **Práticas agrícolas inadequadas:** A agricultura intensiva refere-se a um sistema de produção agrícola focado em maximizar a produtividade das terras cultivadas, frequentemente por meio do uso intensivo de fertilizantes, pesticidas, irrigação e maquinaria. Embora esse modelo tenha como objetivo atender à crescente demanda por alimentos em um curto período de tempo, ele acarreta uma série de impactos ambientais e sociais. Um dos principais impactos ambientais é a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como os óxidos de nitrogênio (N₂O), resultantes do uso de fertilizantes nitrogenados e outros produtos químicos. Esses gases têm um efeito de aquecimento global muito mais potente do que o dióxido de carbono (CO₂).

Além disso, a queima de biomassa, frequentemente realizada para preparar áreas para o cultivo, libera grandes quantidades de CO₂, além de reduzir a capacidade do solo de absorver carbono. Outro efeito significativo da agricultura intensiva é a degradação do solo, especialmente quando se adota o cultivo de monoculturas.

A prática de plantar uma única espécie de planta em grandes áreas esgota os nutrientes do solo e, juntamente com o uso excessivo de pesticidas e fertilizantes, contribui para sua erosão e diminuição da sua qualidade. A poluição da água também é uma consequência importante, uma vez que o uso excessivo de fertilizantes e pesticidas pode resultar na contaminação de corpos d'água, afetando os ecossistemas aquáticos e comprometendo a qualidade da água potável para os seres humanos.

A conversão de grandes áreas de ecossistemas naturais em terras agrícolas também provoca uma perda significativa de biodiversidade, especialmente quando há desmatamento de florestas ou destruição de zonas úmidas para expandir as áreas cultiváveis. Além disso, a agricultura intensiva exige grandes quantidades de água para irrigação, o que pode levar ao esgotamento de recursos hídricos, especialmente em regiões onde o abastecimento já é limitado. Esses impactos refletem os desafios ambientais e sociais associados a esse modelo agrícola, que visa atender à demanda global

por alimentos, mas, ao mesmo tempo, provoca consequências profundas para o meio ambiente e os recursos naturais.

4. Produção e manejo inadequado de resíduos: O descarte inadequado de resíduos orgânicos, como em aterros sanitários, resulta na emissão de metano. A implementação de práticas de reciclagem, compostagem e o uso de tecnologias para tratamento de resíduos sólidos ajudam a reduzir essa fonte de poluição. “A promoção da educação ambiental é fundamental para conscientizar a população sobre a importância de separar corretamente os resíduos e adotar práticas mais sustentáveis. A implementação de programas de coleta seletiva e a criação de centros de reciclagem são medidas essenciais para reduzir a quantidade de resíduos enviados para os aterros. Além disso, a busca por tecnologias mais avançadas de tratamento de resíduos, como a compostagem e a incineração controlada, pode contribuir para a redução do volume de lixo e a geração de energia a partir dos resíduos. Para avançar na gestão de resíduos sólidos, é essencial que governos, setor privado e sociedade civil atuem em conjunto. Políticas públicas que incentivem a responsabilidade compartilhada entre produtores, consumidores e governos podem impulsionar a adoção de práticas mais sustentáveis ao longo de toda a cadeia de produção e consumo” (Machado, Gleysson, 2023).

A decomposição de resíduos agrícolas, esterco e restos de alimentos ou colheita, libera metano e dióxido de carbono na atmosfera, outro grande problema em relação ao efeito estufa, assim o tratamento de resíduos, como água contaminada por produtos químicos, substâncias orgânicas ou outros poluentes são responsáveis por cerca de 3% das emissões globais de GEE (IPCC 2007).

A industrialização associada ao crescimento populacional aumentou exponencialmente a quantidade de lixo produzida, devido ao aumento no consumo e descarte. “No entanto, autoridades e até mesmo a população esforça-se para a ocorrência de minimização do lixo urbano e de suas consequências” (Sacramento, 2014, p. 11).

Sacramento (2014) define lixo “como qualquer resíduo que seja oriundo de atividades humanas ou concebido pela natureza em aglomerações urbanas. Já os dicionários definem a palavra lixo como sendo algo proveniente de descarte” (Sacramento, 2014, p. 11).

Ainda segundo o autor, o desenvolvimento econômico, o crescimento populacional, a urbanização e revolução tecnológica, acompanhados de mudanças no estilo de vida e consumo da população, tendem a ampliar a produção de resíduos, sendo uma tendência para agravamento do problema. Por isso, a questão dos resíduos sólidos

vem ganhando destaque no problema do aquecimento global. A decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos libera grandes quantidades de CH₄, segundo gás em importância para o agravamento do efeito estufa (Gouveia, 2012).

A situação é preocupante, pois, mesmo que consigamos enfrentar os desafios, passaremos por momentos difíceis, que podem colocar a civilização em risco. A transformação digital é um caminho importante para isso. Embora o futuro do clima seja incerto, sabemos que os gases de efeito estufa e as temperaturas estão subindo. Por isso, é urgente focar na economia sustentável para reduzir os impactos das ações humanas e garantir o desenvolvimento econômico com qualidade de vida (Lovelock, 2006).

A transição verde, nesse contexto, exige alinhar inovações tecnológicas e mudanças institucionais com um novo paradigma de desenvolvimento sustentável. Ela envolve uma reestruturação profunda das práticas sociais, valores e prioridades, para que essa revolução seja bem-sucedida e alcance seu potencial máximo, será necessária uma ação coordenada e um apoio significativo das instituições em diversos níveis. O aumento das temperaturas e os impactos climáticos estão tornando a sustentabilidade ambiental um ponto de referência fundamental nos discursos e influenciando decisões importantes que moldam as direções atuais das mudanças macrossociais e tecnológicas (Lema; Fu; Rabellotti, 2020).

Após essa explanação fica mais evidente a urgência para uma transição para uma economia verde, de baixo carbono e uso eficiente dos recursos naturais, uma economia verde é do interesse de todos os países, sendo pobre ou rico, é preciso aproveitar a janela de oportunidades.

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem gerado uma urgência global por uma transição verde, antes de abordar como as tecnologias digitais podem atuar como facilitadoras dessa transformação verde, é essencial compreender algumas definições fundamentais que orientam as ações voltadas à sustentabilidade e à mitigação das mudanças climáticas.

A mudança climática é, portanto, uma consequência direta dessas atividades humanas e representa um dos maiores desafios globais, exigindo uma ação coordenada para mitigar seus efeitos e adaptar os sistemas a um futuro com mais incertezas climáticas. Antes de adentrarmos como a tecnologia poderá mitigar esses impactos é preciso seguir com algumas definições “verdes” para esclarecer o que é a transformação verde tão sonhada para o futuro.

3.2 Economia Ecológica, economia ambiental, economia verde e a transformação verde

É importante definir os conceitos “verdes”, conceitos de economia ecológica, ambiental e verde ganham relevância como abordagens complementares que apontam caminhos para um futuro mais sustentável.

De acordo com Cavalcanti (2010), a economia ecológica busca estudar como as bases biofísicas dos sistemas ecológicos e econômicos podem evoluir de forma independente, mas ao mesmo tempo interconectada. O principal objetivo da economia ecológica é a preservação dos bens naturais e a promoção de uma convivência equilibrada entre a economia e o meio ambiente. Essa abordagem rejeita a ideia de que o crescimento econômico ilimitado possa resolver os problemas ambientais, afirmando que a sustentabilidade depende de limites claros e da proteção dos recursos naturais.

A economia ecológica visa não apenas o equilíbrio entre consumo e regeneração de recursos, mas também a preservação da biodiversidade, tanto de espécies silvestres quanto agrícolas (Martínez-Alier, 1998).

A economia ambiental seria uma maneira de controlar a ação humana de impactos ambiental, com a aplicação de instrumentos econômicos, propondo soluções econômicas junto com regras, que estabeleceriam soluções econômicas para o gerenciamento ambiental em conjunto com os instrumentos jurídicos (Lanna, 1996).

Iniciando com Abramovay (2012), o autor esclarece que a economia verde envolve três dimensões: primeiro seria diminuir o uso de energia advindo de combustíveis fósseis e aumentar o uso de energia provindo de fontes renováveis, segundo uso de produtos que vem da biodiversidade. No terceiro aspecto, a economia verde se concentra em técnicas e tecnologias capazes de diminuir as poluições e resíduos

A economia verde irá diminuir a emissão de carbono, o que implica em uma luta contra as mudanças climáticas. Esta economia exige maior eficiência no uso dos bens naturais nos processos produtivos, o que resulta em menos degradação ambiental, pois menos recursos serão retirados do meio.

Em uma economia verde, com foco na inclusão social, deve-se ocorrer o crescimento de renda e emprego, “impulsionados por investimentos públicos e privados que reduzam as emissões de carbono e a poluição, aumentem a eficiência energética e o uso de recursos e impeçam a perda da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos” (Pnuma, 2011, p.17).

Uma questão central frequentemente colocada sobre o Desacoplamento do Crescimento Econômico e do Impacto Ambiental é que seria uma consequência automática do crescimento econômico per se ou um processo induzido por políticas públicas, assim na proposta da economia verde não há dúvida sobre o determinante do desacoplamento é um processo induzido por políticas públicas e incentivos à inovação. (Almeida, 2012).

A Economia Verde promove investimentos em setores verdes, como energias renováveis, transporte sustentável e tecnologias limpas, buscando equilibrar o crescimento econômico com a proteção do meio ambiente.

Economia verde, economia ecológica e economia ambiental: De acordo com Ballesterro (2008), a economia ambiental procura a melhor forma de utilizar os recursos de maneira eficiente, a economia ecológica baseia-se em estudos transdisciplinares e enfatiza a questão social, deterioração e transformação dos meios ecológicos e a economia verde foca em redução da emissão de carbono, eficiência no uso de recursos e inclusão social, políticas públicas e investimento.

A economia ecológica e a transição para uma economia verde estão profundamente interconectadas, pois ambas visam um modelo econômico sustentável que respeite os limites ambientais e promova o bem-estar social. A economia ecológica fornece os fundamentos teóricos necessários para repensar as relações entre economia e natureza, enquanto a economia verde foca em estratégias práticas, como a adoção de tecnologias sustentáveis, políticas de baixo carbono e modelos de negócios que priorizam a conservação ambiental e o uso eficiente dos recursos naturais.

A economia ambiental, por sua vez, propõe ferramentas como impostos sobre a poluição, subsídios para práticas ecológicas e sistemas de emissões de carbono, com o objetivo de internalizar os custos ambientais e incentivar práticas mais sustentáveis. Ela reconhece que os mercados tradicionais muitas vezes não consideram os custos ambientais, como os danos causados pela poluição, e sugere políticas que corrijam essas falhas, como a precificação do carbono e incentivos à produção limpa. A economia ambiental também promove soluções inovadoras, como o uso de tecnologias limpas e a eficiência energética.

A economia verde, então, representa a aplicação prática dessas inovações e políticas, com o objetivo de transformar setores econômicos em modelos mais sustentáveis, já a transição para uma economia verde exige a integração de tecnologias e

práticas sustentáveis em diversos setores, para que haja um novo padrão para toda a sociedade.

A transformação verde é percebida como uma nova direção para o desenvolvimento técnico-econômico.

A transformação verde representa uma mudança fundamental no modelo econômico e social, com o objetivo de criar uma economia mais sustentável e resiliente, voltada para a preservação ambiental e a redução das emissões de carbono. Esse processo envolve uma série de oportunidades e desafios que exigem uma abordagem integrada entre inovação tecnológica, políticas públicas, mudanças culturais e adaptação das instituições. A seguir, serão exploradas as oportunidades por meio de tecnologias digitais, no entanto, também existem desafios significativos a serem enfrentados, como a resistência a mudanças, a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura, a superação de barreiras políticas e a adaptação das empresas e da sociedade às novas exigências.

Cada revolução tecnológica fornece um conjunto de tecnologias, infraestruturas e princípios organizacionais, que prometem modernizar toda a economia, as oportunidades de mercado específicas no espaço de inovação em TIC serão cada vez mais definidas pela direção da transformação verde (Perez, 2006).

Segundo Lema e Perez (2024, p. 01): “Green is now emerging, albeit not fast enough, as a new direction shaping innovation, investment and lifestyles during the lifetime of everybody”⁹. De acordo com o padrão histórico identificado pelos neoschumpeterianos (Freeman e Louçã, 2001; Perez, 2002), cada revolução tecnológica geralmente intercede com períodos de grande prosperidade, como a famosa era de ouro, a transição verde das (TICs) pode ser construída para o alinhamento entre tecnologias digitais e transformação verde.

A transformação verde será importantíssima para alinhar o processo de inovação tecnológica e mudança estrutural, buscando mitigar os impactos das ações humanas, em resposta à crescente crise ambiental global, assim as inovações tecnológicas devem ser direcionadas para a sustentabilidade, estabelecendo um novo paradigma alinhando crescimento econômico com a preservação ambiental (Lema; Perez, 2024).

⁹ “O verde está agora a emergir, embora não suficientemente rápido, como uma nova direção que molda a inovação, o investimento e os estilos de vida durante a vida de todos”. (Tradução nossa).

A transformação verde está interligada à mudança de paradigmas em diversas áreas, mas o caminho deve seguir entre a inovação tecnológica como a chave para mitigar os efeitos das atividades humanas nas mudanças climáticas e quebra de barreiras institucionais, alcançando o crescimento econômico e mitigando os limites planetários. (Lema; Perez, 2024).

3.3 Oportunidades e Desafios: Em direção a transformação verde

Após as definições e a notória importância da tecnologia, seguiremos neste capítulo sobre algumas oportunidades das tecnologias digitais para que ocorra a transformação verde e consiga reduzir os impactos das ações humanas, principalmente pelas devidas e urgentes impactos das ações humanas. Aqui será abordado as oportunidades por meio de tecnologias digitais e os desafios, vulgos desafios institucionais.

A seguir será explorado as duas perspectivas essenciais para a transição: a primeira, como as tecnologias podem superar obstáculos e impulsionar a transformação verde; e a segunda, analisando o papel das instituições em criar um ambiente propício para essa revolução sustentável.

Assim, primeiramente é preciso reconhecer o potencial das tecnologias de informação e comunicação, não só para acelerar e aprofundar a própria transição verde, mas também para promover o desenvolvimento dos países subdesenvolvidos, abrindo caminho para diversos países. Atingir um aproveitamento sinérgico das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) em uma direção verde poderia emergir como uma estratégia de desenvolvimento viável devido aos potenciais efeitos de aprendizado associados às TICs e sua centralidade como o atual motor dinâmico da economia global.

It is this social construction of direction, rather than the inherent nature of 'green technologies' themselves which may create windows of opportunity for latecomer development. In this section we explore the nature of 'green' as a direction of techno-economic development and the central role of ICTs in this respect.¹⁰ (Lema; Perez, 2024 p. 02).

Institutional changes implemented to shape directionality are guided by urgency and the fact that there is no alternative to avoid extremely dangerous

¹⁰ “É esta construção social de direção, e não a natureza inerente das próprias “tecnologias verdes”, que pode criar janelas de oportunidade para o desenvolvimento dos retardatários. Nesta seção exploramos a natureza do 'verde' como uma direção do desenvolvimento técnico-econômico e o papel central das TICs neste aspecto” pode criar janelas de oportunidade para o desenvolvimento dos países subdesenvolvidos”. (Tradução nossa).

consequences of environmental tipping points once they are transgressed”¹¹. (Lema; Perez, 2024, p. 02).

3.3.1 Oportunidades por meio de tecnologias digitais

A economia global moldará o futuro das tecnologias de informação e comunicação (TIC), isso porque as indústrias centrais de uma revolução tecnológica adicionarão novas perspectivas às existentes, juntando-se com as indústrias e infraestruturas (Perez, 2006).

Tecnologias digitais avançadas, como computação em nuvem, Bigdata, inteligência artificial, entre outras, ainda estão em seus estágios iniciais e certamente passarão por novos avanços e difusão. Esses avanços são impulsionados endogenamente e, em vez de perder força, estão produzindo novas tecnologias, que ainda não se difundiram entre setores e países, havendo um alto potencial de possibilidades para a inovação dentro das indústrias de TICs, assim como para todos os outros setores (Perez, 2006).

Segundo Freeman (1992), os avanços iniciais da evolução das TICs geraram preocupação para necessidade de reduzir a intensidade do uso de materiais e contribuir para o crescimento sustentável.

A inovação tecnológica pode ser um motor de mudança para reduzir os principais impactos ambientais, como emissões de gases de efeito estufa, melhorar a eficiência no uso dos recursos naturais e promover uma economia de baixo carbono. A transição para uma economia verde envolve a introdução de novas tecnologias, reestruturação de setores-chave e políticas públicas que incentivem a adoção de práticas mais responsáveis e menos poluentes, ao mesmo tempo reconhece que essa transformação deve ser cuidadosamente gerida, há uma enorme possibilidade de resistências por indústrias e mesmo pela sociedade marcada por desigualdades que precisam ser abordadas (Lema; Perez, 2024).

As tecnologias melhoram a produtividade e são frequentemente lucrativas e atraentes para os investidores desde o início. Por essas razões, as TIC podem acelerar e

¹¹ “As mudanças institucionais implementadas para moldar a direcionalidade são guiadas pela urgência e pelo fato de que não há alternativa para evitar consequências extremamente perigosas dos pontos de inflexão ambientais, uma vez transgredidos”. (Tradução nossa).

aprofundar a transição verde, mas isso depende da capacidade das sociedades e dos governos de criar uma "direção" para a revolução das TIC, uma direção que não será fácil.

A transição verde é um processo fundamental e as tecnologias desempenham um papel crucial nesse movimento. Os pilares dessa transformação são tecnologias inovadoras voltadas para eficiência energética, energias renováveis (solar, eólica e hidrogênio verde) e a economia circular promovendo um modelo econômico mais sustentável e menos dependente de recursos fósseis.

A capacidade das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) de melhorar a produtividade e atrair investimentos desde seus estágios iniciais faz dela um elemento-chave na aceleração dessa transição. No entanto, o sucesso dessa transformação depende não apenas das inovações tecnológicas, mas também da criação de políticas eficazes e de instituições capazes de direcionar e apoiar essas mudanças. De acordo com Lema e Perez (2024), é necessário que tanto as tecnologias quanto as instituições atuem de forma sinérgica, quebrando as barreiras existentes para uma transformação verde profunda e duradoura (Lema; Perez, 2024).

Ao integrar tecnologias digitais, a eficiência energética e as energias limpas desempenham papéis essenciais na redução das emissões de CO₂, otimizando o consumo e reduzindo desperdício de energia. A economia circular se torna crucial para a redução do desmatamento e das práticas agrícolas insustentáveis e de manejo inadequado.

3.3.1.1 Eficiência Energética

A combinação de eficiência energética com fontes de energia renováveis pode reduzir a dependência dos países em relação às importações de combustíveis fósseis, diversificar as fontes de fornecimento, incentivar o comércio e a cooperação energética, além de ajudar a desvincular as economias das flutuações instáveis dos preços globais dos combustíveis fósseis (Irena, 2023)

A eficiência energética, sob uma perspectiva neoshumpeteriana, é um processo de inovação contínua, em que empresas implementam tecnologias e práticas que melhoram a utilização de energia e transformam todo o sistema de maneira dinâmica, levando à destruição criativa de Schumpeter, criando uma economia mais eficiente e sustentável. Por meio das tecnologias digitais, é possível otimizar o uso de energia, reduzir desperdícios com o objetivo de diminuir a dependência de fontes de energia não renováveis e minimizar as emissões de gases de efeito estufa.

A eficiência energética é um dos pilares, inovações tecnológicas vão além do campo das energias renováveis, e pode ser difundida para toda economia, abaixo alguns exemplos de como pode ser quebrada a barreira tecnológica nos principais setores, como indústrias, transportes, construção e agricultura, conseguindo, portanto, por meio da difusão dessas tecnologias difundir para toda a economia e sociedade.

A adoção de energias renováveis nos processos industriais pode torná-los mais sustentáveis. O uso de inteligência artificial é uma ferramenta tecnológica importante no combate às mudanças climáticas, por meio da prevenção de perdas de energias é possível treinar a inteligência artificial para fazer recomendações objetivando reduzir desperdícios. “Estudos mostram que a aplicação de IA pode melhorar a eficiência energética em até 15% e reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 10% nas indústrias”¹², diz a especialista, em comunicado enviado ao IT Forum.

A evolução dos microchips é importante na condução dessa transformação verde. Ela está revolucionando a eficiência dos sistemas industriais ao otimizar a conversão de energia elétrica, reduzindo perdas. Esses chips são essenciais no armazenamento, melhora do desempenho e gerenciamento das máquinas. A adoção de tecnologias de armazenamento permite potencializar o aproveitamento das fontes renováveis, além de conseguir utilizar no melhor momento, controlando a demanda, ocasionando em melhoria de processo e redução de desperdício (IEA, 2017a).

A inteligência artificial é outra ferramenta importante, estando cada vez mais presente no aprimoramento de energia em baterias, em sistemas de energia renovável, potencializando a eficiência no uso de baterias. A utilização de sistemas de armazenamento de energia é primordial para otimizar o uso de fontes renováveis, melhorando a gestão das fábricas, reduzindo os gastos com eletricidade e a emissão de Co2. Esses sistemas permitem o armazenamento na baixa demanda e utilização quando necessário, potencializando a eficiência operacional (Irena, 2023).

Os algoritmos e sensores estão bastante em alta também, por meio deles é possível otimizar o consumo de energia e realizar manutenções preventivas, auxiliando em redução de falhas. Para que isso ocorra são utilizados algoritmos de Inteligência Artificial (IA) para ajustar automaticamente o funcionamento de equipamentos

¹² Disponível em: <https://itforum.com.br/noticias/ia-reduzir-emissoes-15-industria/#:~:text=A%20empresa%20brasileira%20%C3%A9%20especialista,comunicado%20enviado%20ao%20IT%20Forum>. Acesso em: 02 jan. 2024.

industriais, otimizando o consumo de energia em tempo real, reduzindo o consumo energético e prevendo falhas.

O setor de transportes é responsável por uma grande parte das emissões globais de carbono, em grande parte devido ao uso de veículos movidos a combustíveis fósseis. Os e-rickshaws da Índia ajudaram a reduzir a poluição do ar e o congestionamento nas cidades indianas. Impulsionados pelo esquema FAME (adoção e fabricação mais rápidas de veículos elétricos na Índia) implementado pelo governo, esses veículos elétricos de três rodas estão se tornando cada vez mais populares como uma forma de transporte de baixo custo e ecológica (Singh *et al.*, 2022).

Digital technologies have thus played a crucial role in advancing and enhancing the viability of e-rickshaws. GPS tracking and mobile payment systems have made e-rickshaws a viable alternative to traditional rickshaws by providing efficient navigation and convenient cashless transactions. At the same time the integration of IoT connectivity, telematics systems have streamlined the operations and management of e-rickshaws. IoT devices and sensors enable real-time monitoring of vehicle performance and maintenance needs, while telematics systems allow fleet managers to track and optimize e-rickshaw operations¹³ (Khan; Quaddus, 2020; Singh, Mishra and Tripathi, 2021, s. p.).

Para a redução do impacto ambiental e transformação verde é importante a transição para veículos elétricos. Carros elétricos consomem significativamente menos energia para a mesma quantidade de deslocamento. As tecnologias digitais desempenham um papel fundamental na evolução dos veículos elétricos, melhorando sua eficiência, autonomia e sustentabilidade. Elas são aplicadas no gerenciamento inteligente das baterias, otimização de rotas, infraestrutura de carregamento, e até na integração com veículos autônomos. A telemetria permite diagnósticos remotos e manutenção preditiva, enquanto plataformas de dados ajudam a reduzir as emissões e a pegada de carbono. Além disso, as inovações digitais no design e na fabricação de veículos elétricos tornam a produção mais eficiente e sustentável, contribuindo para uma mobilidade mais verde e conectada.

¹³ “As tecnologias digitais desempenharam, portanto, um papel crucial no avanço e no aumento da viabilidade dos riquixás eletrônicos. Os sistemas de rastreamento GPS e de pagamento móvel tornaram os riquixás eletrônicos uma alternativa viável aos riquixás tradicionais, fornecendo navegação eficiente e transações convenientes sem dinheiro. Ao mesmo tempo, a integração da conectividade IoT e os sistemas telemáticos simplificaram as operações e o gerenciamento dos riquixás eletrônicos. Dispositivos e sensores IoT permitem o monitoramento em tempo real do desempenho do veículo e das necessidades de manutenção, enquanto os sistemas telemáticos permitem que os gerentes de frota rastreiem e otimizem as operações dos riquixás eletrônicos”. (Tradução nossa).

De acordo com a International Energy Agency (IEA, 2022), os veículos elétricos convertem cerca de 85% a 90% da energia elétrica da bateria em movimento, enquanto veículos com motores a combustão convertem apenas cerca de 20% a 30% da energia do combustível em movimento. Segundo um estudo da IEA (2023), os carros elétricos têm o potencial de reduzir em até 70% as emissões de gases de efeito estufa em comparação aos carros a combustão, dependendo da fonte de eletricidade utilizada.

Além de serem mais eficientes em termos de consumo de energia, os carros elétricos também promovem a eficiência energética no setor de transporte ao integrar-se a soluções como a mobilidade compartilhada e os sistemas de carregamento inteligente,

A mobilidade compartilhada tem o potencial de diminuir a quantidade de veículos necessários para atender às necessidades de transporte de uma população, ao promover o uso coletivo de carros. Por outro lado, o carregamento inteligente permite que os veículos se conectem à rede elétrica nos momentos de maior disponibilidade de energia renovável, otimizando os períodos de pico de demanda e diminuindo a dependência de eletricidade gerada a partir de fontes não-renováveis.

No setor automotivo, uma série de países de renda média alta – China, Índia, Malásia, Vietnã e África do Sul – estão investindo seriamente para responder à atual mudança no nível do setor para veículos elétricos, embora com vários graus de sucesso e restrições (Altenburg, Corrocher, Malerba, 2022; Lema, Konda, Wuttke, 2024).

A agricultura é outro setor crucial para a transformação verde, desempenhando um papel central na promoção de práticas sustentáveis e na redução das emissões de carbono. Com o crescente impacto das mudanças climáticas e a pressão por uma produção de alimentos mais eficiente, é essencial adotar tecnologias inovadoras e métodos agrícolas que respeitem o meio ambiente. A integração de fontes de energia renováveis, o uso racional da água, a adoção de técnicas de cultivo regenerativo e a digitalização dos processos agrícolas são algumas das estratégias que podem transformar o setor, tornando-o mais sustentável e alinhado aos objetivos globais de conservação e redução do impacto ecológico.

A IA é usada para otimizar o uso de recursos em agricultura de precisão, ajudando a reduzir o consumo de água, fertilizantes e energia. Sensores e algoritmos podem monitorar as condições do solo e o crescimento das plantas, ajustando as práticas agrícolas para aumentar a produção e reduzir o desperdício de recursos.

A automação agrícola alimentada por fontes de energia renováveis, como os painéis solares, pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diminuir a pegada

de carbono da agricultura. Isso não só torna a agricultura mais eficiente, mas também mais ecológica. "Integrar fontes de energia renováveis com tecnologias digitais na agricultura pode acelerar a transição para um modelo de produção mais sustentável e de baixo carbono" (Netafim, 2022).

Além disso, tecnologias de rastreamento inteligente, baseadas em algoritmos de inteligência artificial (IA), ajustam o ângulo dos painéis solares conforme a posição do sol, otimizando a geração de energia. "A automação agrícola por painéis solares, não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, como reduz o impacto do carbono da agricultura, assim tecnologias digitais podem acelerar a transição para um modelo de produção mais eficiente e com menores emissões de carbono." (Irena, 2023)

As redes inteligentes, alimentadas por IA, podem distribuir a energia de forma mais eficiente, gerenciando a oferta e a demanda de maneira dinâmica. Isso ajuda a integrar fontes de energia renovável, como solar e eólica, de maneira mais eficaz, reduzindo a dependência de fontes fósseis e equilibrando a carga de energia, difundindo por toda a sociedade é possível impactar dezenas de moradias, exemplo disso é o alavancar dessas tecnologias digitais, a M-KOPA conseguiu fornecer energia limpa e renovável para mais de um milhão de residências no Quênia e em outros países africanos, ao mesmo tempo em que reduziu sua dependência de combustíveis fósseis. Além disso, houve uma redução drástica nos custos de investimento (e na pegada de carbono) da infraestrutura tradicional em edifícios, cabos etc. (Karjalainen; Byrne, 2021).

"Connectivity itself and self-generated energy open opportunities for local production and improvement of living conditions, which is a feature of digital technologies that has scarcely been used intentionally towards local development"¹⁴ (Lema e Perez, 2024, p.11).

In terms of energy systems, the variety of sources and the possibility of an interactive grid would have been unimaginable and impractical without ICT. In this respect the technological diversity of energy technologies can be made to converge, as in the case of smart electric grids, which not only optimise the use of several different sources of energy but also incorporate consumers interactively and allow them to sell to the grid and to minimise their own costs by choosing times of use¹⁵. (Lema; Perez, 2024, p. 08)

¹⁴ "A própria conectividade e a energia autogerada abrem oportunidades para a produção local e a melhoria das condições de vida, o que é uma característica das tecnologias digitais que quase não tem sido utilizada intencionalmente para o desenvolvimento local". (Tradução nossa).

¹⁵ "Em termos de sistemas de energia, a variedade de fontes e a possibilidade de uma rede interativa seriam inimagináveis e impraticáveis sem as TIC. Nesse sentido, a diversidade tecnológica das tecnologias de energia pode ser feita para convergir, como no caso das redes elétricas inteligentes, que não só otimizam o uso de várias fontes diferentes de energia, mas também incorporam os consumidores de forma interativa, permitindo que vendam para a rede e minimizem seus próprios custos, escolhendo horários de uso". (Tradução nossa).

3.3.1.2 Energia Limpa

As energias limpas são essenciais para a construção de um futuro sustentável, oferecendo alternativas ecológicas e renováveis aos combustíveis fósseis, reduzindo as emissões de carbono e os impactos ambientais.

Fontes como a solar, eólica e o hidrogênio verde são fundamentais para a transição energética, permitindo atender às crescentes demandas de energia de maneira sustentável. A transição para energias limpas é crucial para a redução dos impactos ambientais e um modelo econômico mais sustentável.

O hidrogênio verde tem o potencial de revolucionar setores industriais. Por exemplo, a indústria de aço, tradicionalmente dependente de carvão para a produção de ferro, pode adotar o hidrogênio verde para substituir o carvão em processos de redução do ferro, eliminando as emissões de CO₂ associadas (Irena, 2022), conseguindo assim aumentar sua eficiência. Quando combinado com tecnologias digitais de armazenamento, o hidrogênio produzido por meio da eletrólise da água usando energia renovável é uma promissora alternativa para descarbonizar setores difíceis de eletrificar, como a indústria pesada e o transporte de longa distância. Ao invés de emitir dióxido de carbono (CO₂), o hidrogênio verde gera apenas vapor d'água como subproduto. Seu uso pode ser essencial para atingir metas de neutralidade carbônica (IEA, 2023).

Mesmo em fase inicial da IA, é evidente seu poder transformador, resultando em uma excelente ferramenta para descarbonizar.

Há um enorme looby para utilização do hidrogênio em outros setores, como os de transporte, assim podendo resultar em uma alternativa para o uso de combustíveis fósseis, as próprias montadoras estão aderindo e movendo esforços para produzir veículos movidos a hidrogênio (Bloomberg, 2020; IEA, 2021c). Há também quem acredita que o hidrogênio possa ser usado em processos industriais, reduzindo impactos ambientais (Sharma; Goshal, 2015).

O aumento da utilização do hidrogênio vem ocorrendo nos últimos anos, em 2020, por exemplo, foram utilizadas 900 milhões de toneladas de CO₂ na produção de hidrogênio, 2,5% das emissões do planeta em 2020 (IEA, 2021c).

Além do hidrogênio, a energia solar, proveniente da luz do sol, é uma fonte de energia promissora para substituição de energia elétrica. Por ser extraída de forma direta por meio de células fotovoltaicas ou indireta por meio de receptores solares, a baixo custo

de manutenção e o poder de alcance em regiões mais precárias, a energia solar torna-se uma excelente alternativa energética.

A energia solar tem se destacado como uma das principais fontes renováveis na transição para uma matriz energética sustentável, graças à sua abundância e ao potencial de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa. A adoção de sistemas fotovoltaicos não apenas descentraliza a geração de energia, mas também democratiza o acesso à eletricidade, especialmente em regiões remotas. Inovações como painéis solares mais eficientes, tecnologias bifaciais e integração com baterias de armazenamento têm tornado essa solução cada vez mais viável economicamente, promovendo a descarbonização em escala global.

Tecnologias digitais estão cada vez mais impactando o mercado, desempenham um papel crucial na otimização e expansão da energia solar. Ferramentas baseadas em inteligência artificial e big data permitem prever padrões climáticos e maximizar a eficiência dos sistemas solares, enquanto redes inteligentes (smart grids) integram essa energia renovável ao sistema elétrico de maneira eficiente e estável. Além disso, plataformas digitais possibilitam a gestão remota de sistemas solares, viabilizando o monitoramento em tempo real, manutenção preditiva e comercialização de excedentes de energia, transformando-se em uma excelente alternativa para proporcionar acesso às famílias em situação de pobreza energética, juntamente pelo aproveitando das tecnologias digitais.

Digital technologies are often key to creating and utilising green windows of opportunity, but their presence alone is insufficient. These opportunities can sometimes be utilised by bringing external technological change and leveraging it by internal institutional change that, when successful, may lead to entirely new pathways¹⁶. (Tradução nossa. Lema e Perez, 2024 p. 11).

In Kenya, the fusion of digital finance innovations (Kingiri and Fu, 2020) with small-scale deployment pathways in renewable energy (Bhamidipati and Hansen, 2021) has created entirely new models of energy provision where Solar PV replaces diesel generators as a source of local electricity provision¹⁷. (Lema; Perez, 2024, p.11).

¹⁶ “As tecnologias digitais são muitas vezes fundamentais para a criação e utilização de janelas verdes de oportunidade, mas a sua presença por si só é insuficiente. Estas oportunidades podem, por vezes, ser utilizadas trazendo mudanças tecnológicas externas e alavancando-as através de mudanças institucionais internas que, quando bem sucedidas, podem levar a caminhos inteiramente novos”. (Tradução nossa).

¹⁷ “No Quênia, a fusão de inovações financeiras digitais (Kingiri e Fu, 2020) com caminhos de implantação em pequena escala em energia renovável (Bhamidipati e Hansen, 2021) criou modelos inteiramente novos de fornecimento de energia em que a energia solar fotovoltaica substitui os geradores a diesel como fonte de fornecimento local de eletricidade”. (Tradução nossa).

The Kenyan industry leader, M-KOPA Solar, uses mobile money technology to provide pay-as-you-go solar energy solutions to off-grid households. It enables its customers to use the solar systems by paying in small, affordable instalments using their mobile phones¹⁸ (Ogeya *et al.*, 2021 *apud* Lema e Perez, 2024, p. 11)

Exemplos acima reforçam que a digitalização pode democratizar o acesso à energia limpa, permitindo que as comunidades fora da rede elétrica acessem soluções solares pré-pagas por meio de pagamentos móveis. Esse modelo não só transforma a maneira como a energia é fornecida, mas também promove uma mudança em direção a uma economia mais verde, ao substituir fontes poluentes por energias renováveis. Ao integrar tecnologias financeiras digitais com a implantação de sistemas solares em pequena escala, cria-se um ciclo positivo de crescimento sustentável, onde a energia renovável não só beneficia os consumidores, mas também impulsiona a economia local e reduz as emissões de carbono, alinhando-se aos princípios da transformação verde. O Brasil por exemplo está entre os 10 países com mais capacidade em termos de geração de energia onshore, em 2021, uma capacidade instalada de 21.580 MW, enquanto no mundo o total acumulado foi de 780.275 MW (GWEC, 2022).

A energia eólica, aproveitando o vento por meio de turbinas, tem se mostrado uma das fontes mais eficazes de geração de eletricidade em larga escala. Países como Dinamarca e Alemanha lideram o uso dessa tecnologia, com grandes parques eólicos tanto em terra quanto no mar. A energia eólica é uma das opções mais baratas e eficientes para descarbonizar a rede elétrica (Irena, 2022).

Enquanto as energias renováveis oferecem uma forma mais limpa de gerar energia, a eficiência energética visa otimizar o uso da energia já disponível, reduzindo o desperdício. Em uma economia de baixo carbono, a eficiência energética é essencial, pois, mesmo que a geração de energia se torne mais limpa, uma parte significativa da energia gerada ainda é perdida em processos de consumo ineficientes.

Segundo informações da REN21 (2022), no geral, o uso de energia renovável cresceu 4,6% ao ano em média entre 2009 e 2020, superando o crescimento na demanda total de energia (1,2% ao ano; 41,8 EJ) e combustíveis fósseis (0,9%; 26,6 EJ).

¹⁸ “A líder da indústria queniana, M-KOPA Solar, usa a tecnologia de dinheiro móvel para fornecer soluções de energia solar pré-pagas para residências fora da rede. Ela permite que seus clientes usem os sistemas solares pagando em parcelas pequenas e acessíveis usando seus telefones celulares. No entanto, não são apenas os elementos do modelo voltados para o cliente que são habilitados pelas tecnologias digitais”. (Tradução nossa|).

3.3.1.3 Economia Circular

O desenvolvimento do capitalismo e a exploração humana trouxeram resultados desastrosos como escassez de recursos, poluição, aquecimento global e desaparecimento de espécie, impacto da ação humana com desejos de produtos, resultando em repensar no sistema linear, pensando assim no conceito de economia circular.

As tecnologias digitais, alinhadas com o conceito de economia circular, são capazes de aumentar a eficácia na utilização de um determinado produto, resultando em seu potencial máximo, expandindo sua utilidade. Além disso, com os métodos de logística reserva é possível o reuso de materiais por meio de reciclagem, conseguindo reduzir o impacto ambiental.

Além disso, empresas estão reduzindo as externalidades negativas, como substâncias tóxicas, emissões de água e gases de efeito estufa (Bakker, Wang, Huisman, Hollander, 2014).

A implementação da EC envolve pensar novas estratégias de design e modelo de negócios, além de métodos e ferramentas (Bocken, Pauw, Bakker, van der Grinten, 2016). Isso significa que, embora já existam casos bem sucedidos de circularidade para os bens de consumo (Mishra, Hopkinson, Tidridge, 2018), muitas outras estratégias de negócios ainda podem e devem ser desenvolvidas. “A produção de bens de consumo envolve uma extensa cadeia de suprimentos onde o modelo econômico predominante ainda é o linear. Os bens não duráveis e de consumo rápido são caracterizados por sua fabricação em grande escala e seu baixo preço” (Baron, 1991, p. 83).

O design e durabilidade dos produtos, quando aprimorados por meio de ferramentas digitais, desempenham um papel fundamental na promoção da economia circular. Essas tecnologias permitem otimizar a criação de produtos com maior vida útil, facilidade de reparo e reutilização, reduzindo o desperdício e o consumo excessivo de recursos. Ferramentas digitais, como modelagem 3D, simulação e análise de ciclo de vida, permitem aos fabricantes projetar produtos mais sustentáveis desde a concepção, garantindo que os materiais possam ser facilmente reciclados ou reaproveitados. Além disso, o uso de plataformas digitais pode facilitar a troca de produtos ou componentes, promovendo o reaproveitamento e a reutilização, que são princípios centrais da economia circular. Dessa forma, a digitalização não apenas melhora a eficiência dos processos de produção, mas também contribui para um modelo de negócios mais sustentável, alinhado com a redução de impactos ambientais e a maximização do valor dos recursos.

Ao empregar a agricultura de precisão, monitoramento remoto, práticas de manejo inteligente do solo, e inovações no setor pecuário, os agricultores conseguem reduzir significativamente suas emissões de gases de efeito estufa. Dessa forma, essas inovações não só contribuem para o aumento da produção agrícola, mas também para a preservação ambiental e a construção de uma agricultura mais verde e sustentável, essencial para mitigar os impactos das mudanças climáticas.

É importante ressaltar que as tecnologias digitais podem desempenhar um papel crucial na otimização e gestão das indústrias extrativas e facilitar a atualização, particularmente para as dimensões da atualização que estão conectadas aos objetivos de sustentabilidade (Litvinenko *et al.*, 2022). Por exemplo, dispositivos avançados de análise de dados, sensoriamento remoto e Internet das Coisas (IoT) podem auxiliar em levantamentos geológicos, mapeamento de recursos, monitoramento de operações de mineração e redução de resíduos (Nwaila *et al.*, 2022).

A estratégia de desenvolvimento deve, portanto, considerar e, de fato, impulsionar os objetivos de longo prazo de tornar o desenvolvimento econômico mais verde e transformador, por exemplo, em bens de consumo, adaptar-se e promover a durabilidade, a simplicidade de reparo e a reciclagem.

Além disso, as tecnologias digitais podem desmaterializar produtos, transformando-os em serviços, como já foi feito através da transmissão de grande parte da música e do cinema, bem como do material escrito.

Muitas das atuais tecnologias de reciclagem dependem da identificação "inteligente" de materiais assistida por computador para separar o vidro do plástico e do papel. Da mesma forma, eles poderiam permitir maior durabilidade de produtos tangíveis, facilitando a impressão 3D de peças de reposição, bem como modelos de aluguel em vários setores, em vez de posse e vida curta e desperdício, impostos pela obsolescência planejada que caracterizou o paradigma de produção em massa.

Menendez *et al.* (2023) identificam uma nova janela de oportunidade nas transformações verdes, enfatizando dois aspectos principais: quantidade e qualidade da demanda. No curto e médio prazo, o aumento da demanda impulsiona os preços, levando ao aumento das rendas minerais. Os benefícios a longo prazo também decorrem da procura sustentada. Além disso, a mudança para setores de tecnologia verde leva a um afastamento da mercantilização da produção mineral, impulsionada pela crescente demanda por minerais de baixo carbono.

Muitas das atuais tecnologias de reciclagem, como a identificação "inteligente" de materiais assistida por computador, desempenham um papel fundamental na redução do impacto ambiental, incluindo o desmatamento. Essas tecnologias permitem a separação eficiente de materiais como vidro, plástico e papel, contribuindo para a reutilização de recursos e minimizando a necessidade de extrair novas matérias-primas da natureza. Ao reduzir a dependência de recursos virgens, como madeira e minerais, elas ajudam a aliviar a pressão sobre os ecossistemas e, conseqüentemente, contribuem para a proteção das florestas e a redução do desmatamento.

Além disso, a tecnologia também promove a durabilidade dos produtos, facilitando a impressão 3D de peças de reposição e modelos de aluguel, o que reduz a necessidade de produção em massa e o descarte precoce de bens. A transição para um modelo de consumo baseado em durabilidade, em vez de obsolescência planejada, pode ajudar a diminuir a extração de recursos naturais, evitando o desmatamento e outros impactos ambientais negativos associados à produção em grande escala. Ao substituir a posse de produtos e a vida útil curta por práticas de compartilhamento e reutilização, esse modelo contribui para a redução da pressão sobre os ecossistemas naturais, ajudando a preservar as florestas e a biodiversidade, enquanto minimiza o desperdício de materiais e energia.

Há um grande debate, no entanto, sobre se a agenda de sustentabilidade apenas exacerbará as maldições dos recursos ou se de fato fornecerá um trampolim para novos caminhos de desenvolvimento (Månberger, 2021). Muitos países ricos em recursos não tiveram sucesso em traduzir a riqueza dos recursos naturais em riqueza econômica e social. Até à data, não existem provas de que a disponibilidade de recursos esteja associada à transformação verde do desenvolvimento econômico, com base em vínculos diretos de recursos naturais para domínios centrais para a economia verde (Cheng *et al.*, 2021).

A economia circular representa uma mudança significativa na forma de produzir, consumir e descartar recursos, promovendo a reutilização, reciclagem, reparo e regeneração de produtos. Em contraste com o modelo linear tradicional, ela busca a eficiência contínua dos recursos e é essencial para a descarbonização e sustentabilidade, contribuindo para uma economia de baixo carbono. Exemplos como o design de produtos duráveis e reparáveis, como lâmpadas LED, e a recuperação de calor nas indústrias, demonstram como os princípios da economia circular podem ser aplicados para reduzir o desperdício e a necessidade de energia nova. Ao integrar a economia circular com

energias renováveis e práticas industriais sustentáveis, cria-se um sistema interconectado que diminui as emissões de carbono e promove a inovação. No entanto, a transição para esse novo paradigma não depende apenas de inovações tecnológicas, como inteligência artificial e big data, mas também exige uma transformação institucional para superar barreiras estruturais, como normas e regulamentos antiquados, que resistem à mudança.

Nosso ponto principal aqui é que as sinergias com as TICs têm um enorme potencial para aumentar todas essas iniciativas. As tecnologias digitais são muitas vezes fundamentais para inovar numa direção ecológica e sustentável. A estratégia de desenvolvimento consiste em identificar janelas de oportunidade e setores potencialmente dinâmicos, mas a nova condição para o sucesso, dada a inevitável mudança dos mercados para a sustentabilidade ambiental, é aproveitar a oportunidade para o verde e alavancar as tecnologias digitais para esse fim. Isso significa que a política de desenvolvimento precisa abranger uma ampla gama de domínios nas esferas ambiental, tecnológica e industrial, ao mesmo tempo em que inova institucionalmente. (Lema; Perez, 2024. P. 16)

3.3.4 Desafios Institucionais

No contexto da transformação verde, vimos exemplos de tecnologias limpas (com hidrogênio, solar e eólica) tendo um grande crescimento em sua utilização, uma enorme melhora na gestão de resíduos, em que a economia circular auxilia na redução de custos de produtos e durabilidade dos produtos, e por fim várias ações de eficiência energética, levando a uma sociedade mais sustentável, com a tecnologia digital sendo um alinhado.

Práticas ou soluções inovadoras começam a desafiar os sistemas existentes, gerando um impacto significativo e gerando uma mudança radical nos paradigmas anteriores. O modelo de Carlota Perez sobre as revoluções tecnológicas e suas fases, com a evolução das tecnologias digitais, estamos vivendo a fase de instalação da transformação verde, onde já vimos um crescente número de inovações tecnológicas voltadas para a sustentabilidade aplicadas em energias renováveis (solar, eólica, hidrogênio), a mobilidade elétrica avançando, implementação de soluções digitais para melhorar a eficiência energética e a gestão de resíduos, o uso de inteligência artificial para otimização de processos, redução de desperdício. Para que possamos difundir e consolidar um novo paradigma, é preciso quebrar barreiras institucionais que vão além das tecnologias por si só (Perez, 2002).

Para Carlota Perez, barreiras institucionais referem-se aos obstáculos que surgem devido a estruturas e práticas existentes dentro das instituições sociais, políticas

e econômicas, que dificultam a adoção de novas tecnologias ou a implementação de mudanças no sistema econômico. Em suas obras, ela argumenta que as transformações tecnológicas e as inovações muitas vezes enfrentam resistência devido à falta de adaptação ou flexibilidade das instituições, que estão frequentemente ligadas a interesses estabelecidos e normas antigas.

Carlota Perez destaca que as barreiras institucionais são cruciais na transição entre fases de um novo paradigma tecnoeconômico, surgindo durante o período de "frenesi" e "destruição criativa", quando as novas tecnologias entram em conflito com as estruturas existentes. Essas barreiras incluem rigidez regulatória, resistência cultural e corporativa, falhas nas políticas públicas e dificuldades de coordenação internacional. Para superar essas barreiras e alcançar a "fase de sinergia", é necessário que governo, empresas e sociedade civil atuem juntos, criando instituições que promovam inovação sustentável, redistribuição econômica e um ambiente regulatório favorável ao novo paradigma. A adaptação institucional é essencial para um crescimento equilibrado e inclusivo.

As novas tecnologias, embora promissoras, ainda não são universalmente aceitas ou compreendidas, e muitos dos antigos sistemas tentarão impedir a sua adoção, apenas com uma mudança institucional será possível difundir e consolidar a sexta revolução tecnológica.

Aqui chegamos ao último capítulo, onde serão explorados os desafios institucionais para que as novas tecnologias descritas no capítulo anterior possam ser uma transformação verdadeira, porque as tecnologias sustentáveis representam a nova fronteira do desenvolvimento econômico e a possibilidade de criar um futuro mais equilibrado, tanto social quanto ambientalmente, com o aquecimento global será muito difícil a vida humana na terra, com isso é importantíssimo alinhar tecnologia com mudanças institucionais.

As revoluções tecnológicas seguem um padrão regular de difusão, apesar de distintas e com características técnicas próprias e influenciada por fatores históricos, políticos e contingentes, no entanto, certas características se repetem a cada nova revolução, onde as instituições e sociedade determinam sua difusão, assim a transformação verde pode espalhar grandes ondas de desenvolvimento, mas por outro lado pode resultar em, historicamente, levam meio século ou mais para se espalharem de maneira desigual pela economia “Cada revolução tecnológica fornece um conjunto de tecnologias, infraestruturas e princípios organizacionais genéricos – um novo paradigma

tecnoeconômico – capazes de modernizar e aumentar gradualmente a produtividade de toda a economia” (Perez, 2006).

É um momento de enorme resistência de setores já estabelecidos, o setor elétrico por exemplo movimento milhões de reais, desafiando grupos empresariais grandes, ocasionando em uma enorme resistência para utilização de novas tecnologias, esses setores estabelecidos e a falta de adaptação do sistema econômico atual são elementos-chave como Perez aponta, "o sistema existente reage com resistência, mas a nova tecnologia começa a provar seu potencial superior, e o futuro da revolução começa a se tornar mais claro" (Perez, 2002).

Ao pensarmos em uma transição para uma economia mais verde, é importante desmembrar os riscos com outros stakeholders, resultando em uma mutação das estruturas organizacionais alinhadas com metas governamentais direcionadas para a transformação verde (Mazzucato, 2024).

Outro desafio está relacionado aos custos alto “Energias renováveis, um grande número de países em desenvolvimento está investindo e projetando estratégias para maximizar os benefícios econômicos envolvidos na transição energética, assim o desenvolvimento de tecnologias verdes é muitas vezes uma proposta cara e, devido à presença de operadores históricos e à importância das economias de escala, as principais pré-condições – como grandes mercados internos e níveis limiares de capacidades tecnológicas – podem muitas vezes ser um pré-requisito para o desenvolvimento de sistemas setoriais em tecnologias verdes essenciais (Lema; Rabellotti, 2023).

Além disso, existe muita resistência que vem de sistemas financeiros e estruturas políticas, como uma ameaça a seus modelos de lucro e poder. Perez destaca que é quando essas inovações começam a mostrar seu valor e começam a ter um impacto profundo, mas ao mesmo tempo, o sistema tentará barrá-las, criando tensões que fazem parte do processo de transformação (Perez, 2002).

As instituições financeiras desempenham um papel fundamental no apoio à transição para uma economia sustentável, fornecendo os recursos necessários para impulsionar projetos inovadores e tecnologias disruptivas. Elas ajudam a criar e desenvolver soluções verdes, além de apoiar startups e empresas que estão liderando essa transformação.

Momento da transformação verde, investimentos e financiamentos são de extrema importância para sua difusão, onde ainda nessa fase é um investimento de risco, tecnologias estão sendo testadas, o papel do empreendedor Schumpeteriano é posto em

prática, é preciso acreditar nas mudanças, o risco e a chance de retornos são altos, fontes de financiamentos podem vir de fontes mais arriscadas, como Venture Capital (Schumpeter, 1982).

“Muitas novas indústrias surgiram como novas "indústrias verdes" devido especialmente à ameaça das mudanças climáticas, mas também à perigosa poluição do ar local e outros riscos ambientais” (Lema; Perez, 2024, p. 16), é preciso, portanto, ter cuidado com a real mensagem da transformação verde, que não vise apenas o lucro e sim o impacto social e ambiental.

A economista alerta para a necessidade de evitar a “financeirização” precoce das iniciativas de financiamento à inovação verde. Nesse caso, o risco seria de que os fundos disponíveis para pesquisa e desenvolvimento em novas iniciativas verdes passassem a ser destinados a recompra de ações e distribuição de dividendos, como parece ter ocorrido em muitos setores de tecnologia.

A “financeirização” acontece por muitas dessas tecnologias ainda são caras ou não são suficientemente eficientes para competir com as alternativas tradicionais. Perez e Mucazzatto acreditam que incentivo dos governos ou parcerias público-privadas para quebrar o desafio de escalabilidade, Portanto, inovação e estado precisam caminhar juntos para quebrar essa barreira de escalabilidade, fazendo com que seja necessária a presença de um Estado que assuma a incerteza decorrente dos estágios iniciais da inovação, muitas vezes temida pelo setor privado (Mazzucato, 2014).

Embora as inovações da fase de irrupção sejam promissoras, elas desempenham um papel crucial na materialização das inovações tecnológicas e no estabelecimento de novos padrões industriais, essas organizações, por meio de seus investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D), ajudam a moldar o futuro da economia sustentável, desse modo, para que ocorra o desenvolvimento verde, é necessário que haja intencionalidade e um governo que assuma a liderança dos processos iniciais de pesquisa e desenvolvimento. Mazzucato (2014) destaca que os países líderes na revolução verde são aqueles onde o Estado exerce papel ativo.

O destaque, contudo, vai para o arcabouço de políticas de incentivo adotadas pela China. Para Mazzucato, os chineses foram capazes de combinar diferentes tipos de incentivo à difusão de tecnologias verdes. Além disso, priorizaram essas tecnologias como parte de uma visão estratégica de longo prazo e de apoio ao crescimento econômico sustentável (Mazzucato, 2014).

É preciso também impulsionar mudanças significativas nos sistemas de produção e consumo, há um enorme movimento social de apelo a produtos verdes, alimentação saudável que incentiva indústrias a desenvolverem cada vez mais pesquisa e desenvolvimento, resultando na transformação verde.

O consumo verde precisa estar nas pautas centrais do desenvolvimento sustentável, com utilização de produtos e serviços que minimizem os impactos ambientais. Assim, a transição para uma economia sustentável não depende somente do padrão de consumo individual, é preciso uma ação coordenada entre iniciativa pública e privada, reestruturando toda a economia (Mazzucato, 2014).

Culturas e normas sociais que valorizam a sustentabilidade estimulam maior aceitação de produtos e serviços verdes, como veículos elétricos, energia renovável e agricultura orgânica. No aspecto social, as instituições culturais e sociais também têm um papel significativo ao promover atitudes favoráveis à inovação e à adoção de novas tecnologias. Durante a fase inicial, as mudanças de comportamento são essenciais para garantir que as novas tecnologias sejam aceitas e utilizadas pela sociedade.

Desde então houve intensa mobilização da comunidade internacional para a busca de um acordo global que pudesse evitar a escalada da emissão de carbono e os consequentes efeitos negativos previstos (Mazzucato, 2014).

No entanto, o temor quanto aos impactos negativos do aquecimento global ainda não tem sido suficiente para desencadear a transformação social e econômica abrangente, necessária para a transição para uma economia verde (Mazzucato, 2014).

Esse contexto é a base para algumas das recentes contribuições da economista Mariana Mazzucato ao debate público, nas quais ela enfatiza a urgência de estabelecer um pacto social abrangente, capaz de promover as mudanças essenciais para a criação de uma economia com menores emissões de carbono (Mazzucato, 2014).

Para que a transformação ocorra é preciso quebrar as barreiras de regulação. As barreiras de regulação para as Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) estão intimamente relacionadas à transformação verde, pois as novas soluções tecnológicas sustentáveis, que são essenciais para essa transformação, muitas vezes enfrentam desafios regulatórios. Leis desatualizadas e falta de harmonização entre países podem dificultar a implementação de tecnologias verdes, como energias renováveis, mobilidade elétrica e soluções de economia circular. Além disso, regulamentações sobre proteção de dados e privacidade podem limitar a utilização de tecnologias inovadoras, como as que envolvem inteligência artificial para otimização de processos sustentáveis. Para que a transformação

verde seja bem-sucedida, é necessária que haja uma adaptação das regulações, criando um ambiente favorável à inovação tecnológica sustentável e à transição para uma economia mais verde.

O protocolo mais importante até então, vista a preocupação quanto à elevação da temperatura média do planeta como consequência do aumento das emissões de carbono, ocupou o centro do debate público internacional sobre desenvolvimento sustentável, é expresso pelo Protocolo de Kyoto, que diz que se a elevação da temperatura média do planeta exceder os 2°C, profundos impactos ambientais e mudanças negativas serão sentidas em todo o mundo, com efeitos possivelmente irreversíveis” (Mazzucato, 2014). Precisa que haja muito mais para difundir mais ainda na sociedade.

As instituições governamentais são essenciais ao criar políticas públicas e regulamentações que incentivam ou exigem a transição para práticas mais sustentáveis. Durante essa fase inicial, os governos podem estabelecer metas ambiciosas para a redução de emissões de CO₂ e o aumento da eficiência energética, como foi o caso de muitos países da União Europeia, que implementaram incentivos fiscais e subsídios para tecnologias limpas, auxiliem nas infraestruturas, para carros elétricos, smart grids, etc. Assim, políticas de longo prazo se fazem essenciais para obter uma infraestrutura ideal para a transformação verde (Mazzucato, 2014).

A solução, segundo a economista, passaria pela criação de mecanismos de financiamento “pacientes” e bem adaptados ao alto risco do investimento em inovação. Mazzucato também acredita que esses resultados se beneficiariam da instituição de novas modalidades de taxação favoráveis à redução de emissões de carbono. “Ao mesmo tempo, defende uma mudança na estrutura tributária, que deveria incidir menos sobre os salários e mais sobre o consumo de energia e de recursos naturais” (Mazzucato; Mcpherson, 2019, p. 5-6).

Atualmente, esse cenário institucional tem mudado, existe agora muita tração em termos de quadro institucional e, ao mesmo tempo, há mais atividades inovadoras e novas tecnologias digitais que não existiam em 1992 e que têm um grande potencial para criar progressos na área ambiental do desenvolvimento económico. Indiscutivelmente, os estágios mais recentes do paradigma das TIC com a introdução de tecnologias digitais ainda mais avançadas têm o potencial de aumentar significativamente essa contribuição.

As oportunidades de mercado específicas no setor de inovação em TIC serão cada vez mais determinadas pela direção e intensidade do crescimento em outras indústrias, enquanto a inovação em diversas áreas e atividades dependerá do novo

potencial e dos ajustes institucionais necessários. Assim, no processo de examinar o caminho futuro das TIC, é importante referir as características do paradigma tecnoeconômico específico e a maneira como elas podem estar influenciando as oportunidades em outros setores da economia. (Perez, 2006)

Assim, o futuro das tecnologias de informação e comunicação (TIC) está inextricavelmente ligado ao futuro da economia global, bem como das economias regionais e nacionais. Embora sejam necessários ajustes institucionais, com o tempo, esses ajustes podem se transformar em pacotes institucionais completos, capazes de criar uma direção verde.

Quadro 1: A Caminho da Direção verde – Instituições para transformação verde

	Transformação verde
Políticas do lado da demanda	Subsídios de aquisição para energia verde Instituições para colaboração entre países Contratos públicos de tecnologias verdes Requisitos ambientais em licitações públicas Cronogramas para acabar com o uso de combustíveis fósseis (por exemplo, apenas EVs após 2030) Subsídios para painéis solares, EVs, isolamento, etc.
Políticas do lado da oferta	Imposto sobre o carbono Apoio à P&D verde Fornecimento de capital humano Regras de contratação pública Investimento direto em tecnologias verdes Tratamento fiscal favorecido. Facilitação obrigatória de desmontagem e reciclagem
Bens Públicos	Projetos públicos de investigação e demonstração Infraestrutura verde, como reciclagem e infraestrutura de carregamento elétrico
Financiar	Classificações ESG Alianças de investidores verdes Títulos verdes Subsídios

Instituições internacionais	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) Protocolo de Quioto Acordo de Paris e reuniões da COP ODS da ONU
-----------------------------	---

Fonte: (Lema; Perez, 2024 - Adaptado e traduzido) (Tradução nossa. Lema e Perez, 2024).

Por meio do quadro é possível ter alguns exemplos de ações que precisamos seguir, principalmente dentro dos pacotes institucionais, para chegarmos na sonhada idade de ouro de Carlota Perez. Contudo, é preciso aprofundar em mais ações institucionais, das enumeradas acima. Deve-se reconhecer a necessidade de uma estrutura institucional complexa para uma economia mundial verde, não há tempo a perder, é uma necessidade inevitável devido aos diversos impactos climáticos ocorrendo na atualidade, é preciso acelerar e não medir esforços para essa concretização e, por fim, que seja um fenômeno global.

No âmbito empresarial, é fundamental orientar as TICs para um paradigma verde predominante, com bigtechs direcionando grandes investimentos verdes, desenvolvendo IA para acelerar o crescimento do consumo verde e evitar desperdício, uma vez que os algoritmos ajudam nesse cenário.

Ainda há o papel importantíssimo do governo, estabelecendo políticas e incentivando empresas a inovar e investir em uma direção verde, ao invés de caminhos tradicionais. A revolução institucional de que precisamos será profunda e impactante tal qual as vividas nas cinco revoluções anteriores.

Para que essa transformação significativa aconteça, será fundamental repensar a governança global, a justiça social e as tecnologias e desenvolvimento econômico. Contudo, é necessário implementar um conjunto de ações práticas voltadas para combater as mudanças climáticas e a desigualdade econômica em nível global. De acordo com as ideias de Lema e Perez (2024), temos a seguinte proposta:

- Um imposto global sobre transações financeiras (GFTT), que poderia se tornar a principal fonte de financiamento para a ecologização do Sul Global, administrado por um banco global transparente com poder de execução e canalizando fundos para infraestrutura verde.
- Um fundo global de inovação verde apoiado pelo governo nas economias avançadas para estimular inovações nos sistemas de ciência e tecnologia que possam responder a muitos desafios globais, facilitar sinergias entre as transformações digital e verde e promover a transformação no Sul Global.
- Abandono das proibições extremas da OMC contra o uso de tarifas,

subsídios e compras públicas. Tornou-se óbvio que a proteção da indústria nascente é indispensável para o desenvolvimento. Muitos governos, mesmo o dos EUA, agora os usam tanto para a transformação verde quanto para fortalecer a liderança tecnológica, na medida em que se tornaram obsoletos na prática.

- Um regime específico de propriedade intelectual para tecnologias verdes que também tenha em conta as necessidades dos países em desenvolvimento menos avançados tecnologicamente.
- A incorporação de uma instituição global para codificar, monitorar e certificar métricas ambientais, sociais e de governança (ESG), que incluem métricas para os objetivos do New Deal, como investimentos verdes e localização em países de baixa e média renda.
- Implementação de nossos padrões progressivos e passaportes digitais de produtos para interoperabilidade de todos os aparelhos eletrônicos e elétricos, disponibilidade de software para diagnóstico e manutenção, reciclabilidade e outras medidas para contribuir para o fim da economia de resíduos.

Obviamente, há uma necessidade de mudança institucional global só podem ser um complemento e um reforço das políticas nacionais. Muitas das iniciativas necessárias já são claras, mas não ganham força suficiente: investir em energia renovável e em eficiência energética, promover o transporte sustentável, conservar a natureza, apoiar a agricultura sustentável etc. (Lema; Perez, 2024 p .18).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar as tecnologias digitais sendo um elemento principal para uma transformação verde, ocasionando a sexta revolução tecnológica, sozinha a tecnologia não tem força suficiente para transformar toda a sociedade, mas alinhada com mudanças institucionais pode quebrar barreiras que resultem em uma nova revolução tecnológica, a revolução verde.

Hoje, em 2024, vivemos a quinta revolução tecnológica, identificou-se a necessidade de uma mudança urgente e necessária, decorrentes das ações humanas perante a natureza, onde ao visar-se o lucro durante todas as cinco revoluções tecnológicas históricas preocupou-se pouco com as mudanças climáticas.

Para entender toda a problemática e como chegarmos na sexta revolução tecnológica, foi preciso voltar ao passado e entender a história das revoluções tecnológicas, assim foi possível identificar um padrão dentro das revoluções tecnológicas. Carlota Perez, periodizou esses ciclos em revoluções tecnológicas por períodos longos, ciclo de 50-60 anos, marcado por fases, um período turbulento que resultará em uma crise, mas logo virá a bonança, por meio de um período de crescimento sustentável, baseada nas teorias do ciclo longos de Kondratieff e Schumpeter.

As quatro fases do paradigma tecnológico de Perez são importantes para explicar sobre mudanças estruturais, que seguem um padrão tecnológico, contudo para entender seu teorema foi preciso entender as influências que deram origem ao modelo de Carlota Perez, modelo esse seguindo ideias Schumpeterianas, em que a inovação é ideia central, podendo acelerar ou resultar em um desenvolvimento econômico, e ideias neoschumpeterianas enfatizam o papel das instituições, formais e informais, nas revoluções tecnológicas.

As ações humanas têm gerado impactos significativos no clima global, levando a uma série de mudanças ambientais preocupantes. O aumento das emissões de gases de efeito estufa, principalmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (NO_x), devido à queima de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas intensivas, tem provocado o aquecimento global.

Esse aquecimento tem contribuído para o aumento da temperatura média global, resultando em eventos climáticos extremos mais frequentes, como ondas de calor, secas severas, inundações e furacões mais intensos, esses impactos, se não mitigados, terão consequências devastadoras para a humanidade e o planeta, exigindo ações urgentes para

reduzir as emissões de gases de efeito estufa, promover a sustentabilidade e adaptar as sociedades às mudanças já em curso.

É urgente e necessário mitigar principalmente a queima de combustíveis fósseis (nos setores de transporte e indústria), combater o desmatamento e das mudanças no uso da terra, práticas agrícolas insustentáveis e produção e manejo inadequado de resíduos. A urgência em mitigar os impactos ambientais decorrentes da ação humana exige uma reconfiguração profunda dos sistemas econômicos e industriais, priorizando a sustentabilidade. A queima de combustíveis fósseis nos setores de transporte e indústria, o desmatamento, a degradação do uso da terra, práticas agrícolas insustentáveis e o manejo inadequado de resíduos têm sido os principais motores da crise climática atual.

A teoria de Carlota Perez sobre a transformação verde se alinha a essa necessidade urgente de adaptação ao destacar a dualidade entre inovações e instituições. Perez argumenta que as revoluções tecnológicas não ocorrem isoladamente, mas são profundamente influenciadas por um alinhamento entre inovações disruptivas e mudanças nas instituições que as possibilitam e sustentam.

A evolução das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs desde os primeiros computadores e a internet, as TICs passaram a incorporar inovações, assim como os três principais: Bigdata, computação na nuvem e Inteligência Artificial, garantem que dados possam ser processados, armazenados e compartilhados de forma eficiente e em tempo real, possibilitando a inovação e a transformação digital que estamos vivendo, essas tecnologias formam os alicerces que irão moldar o futuro da transformação verde e com eles mitigar os impactos das ações humanas, fazendo com que seja mais fácil viver na terra com as baixas temperaturas.

A automatização e digitalização têm se mostrado essenciais para a indústria na busca por uma maior eficiência energética e redução do impacto ambiental. A inteligência artificial, por exemplo, identifica padrões que permitem otimizar o consumo de energia, enquanto o Big Data facilita o monitoramento das emissões e o uso mais eficiente de recursos. Esses avanços também são fundamentais na promoção de uma economia circular, pois ajudam a prolongar a vida útil dos produtos e reduzir desperdícios. A computação em nuvem, por sua vez, facilita a integração de sistemas, tornando a gestão de dados mais eficiente e a implementação de soluções sustentáveis, além de promover o uso de energia limpa ao otimizar processos e reduzir a dependência de recursos fósseis.

No setor de transportes, os carros autônomos e independentes oferecem uma

revolução no que diz respeito à eficiência energética e à sustentabilidade. Equipados com sensores e inteligência artificial, esses veículos otimizam rotas e reduzem congestionamentos, o que resulta em menor consumo de energia e emissões de CO₂. Sua integração com veículos elétricos potencializa ainda mais a redução de poluentes, contribuindo diretamente para a economia circular ao promover o uso de energia limpa e renovável. Essa transformação no transporte não só melhora a segurança e a eficiência, mas também impacta positivamente a forma como as cidades são planejadas, incentivando práticas urbanas mais sustentáveis.

O desmatamento, principalmente nas áreas tropicais, é um grande motor das mudanças climáticas, mas tecnologias como monitoramento por satélite, inteligência artificial e drones oferecem soluções inovadoras para combater essa prática. Essas tecnologias permitem mapear áreas desmatadas, identificar atividades ilegais em tempo real e promover uma gestão mais eficiente dos recursos naturais, contribuindo para a conservação ambiental e a promoção de uma economia circular. Ao possibilitar a recuperação de áreas degradadas e o uso sustentável das florestas, essas inovações ajudam a mitigar as emissões de CO₂ e a manter o equilíbrio ecológico global, favorecendo a transição para um modelo de desenvolvimento mais sustentável e consciente.

No setor de produção e manejo de equipamentos, a inovação tecnológica também desempenha um papel central na eficiência energética e na implementação da economia circular. Sistemas de automação, inteligência artificial permitem que os equipamentos operem de maneira mais eficiente, reduzindo o consumo de energia e otimizando o uso de recursos. Essas práticas não apenas ajudam a reduzir o impacto ambiental, mas também criam um ciclo de produção responsável, que favorece a reutilização de materiais e a redução de resíduos, fundamentais para uma economia mais circular e sustentável.

Para que a inovação ocorra, as instituições devem alinhar-se com as tecnologias emergentes e superar barreiras como regulamentações e resistência a mudanças. Inovações disruptivas exigem adaptações institucionais e estratégias para superar desafios significativos, como a resistência de setores estabelecidos e grandes grupos empresariais, que se opõem à adoção de novas tecnologias devido à ameaça que elas representam para seus modelos de lucro e poder.

A transformação verde dificilmente surgiria naturalmente através de forças de mercado, em parte por causa da infraestrutura de energia incorporada, mas também

porque os mercados não valorizam a sustentabilidade, promovendo desperdício e poluição, além do mais uma das barreiras é a falta de infraestrutura necessária.

Outra barreira são os altos custos associados à implementação de inovações, além da resistência proveniente de sistemas financeiros e estruturas políticas que veem a transformação como uma ameaça.

Além disso, é necessário promover mudanças significativas nos sistemas de produção e consumo. O crescente movimento social em favor de produtos verdes e alimentação saudável tem incentivado as indústrias a investir em pesquisa e desenvolvimento, impulsionando a transformação verde. Normas sociais que valorizam a sustentabilidade também têm contribuído para a maior aceitação de produtos ecológicos.

É essencial quebrar barreiras regulatórias. No caso das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), essas barreiras estão diretamente relacionadas à transformação verde, pois soluções tecnológicas sustentáveis frequentemente enfrentam desafios regulatórios. Leis desatualizadas e a falta de harmonização entre os países dificultam a implementação de tecnologias verdes, como energias renováveis, mobilidade elétrica e economia circular.

Políticas públicas e regulamentações governamentais desempenham um papel fundamental ao incentivar ou até mesmo exigir a transição para práticas mais sustentáveis, criando um ambiente propício para o avanço dessas tecnologias e a adoção de soluções ecológicas.

Assim, o futuro das tecnologias de informação e comunicação (TIC) está inextricavelmente ligado ao futuro da economia global, bem como das economias regionais e nacionais. Embora sejam necessários ajustes institucionais, com o tempo, esses ajustes podem se transformar em pacotes institucionais completos, capazes de criar uma direção verde.

A transformação verde da economia global requer políticas coordenadas tanto do lado da demanda quanto da oferta, com foco em tecnologias e práticas sustentáveis. No lado da demanda, é essencial promover subsídios para energias limpas, estabelecer requisitos ambientais em licitações públicas e criar cronogramas para eliminar o uso de combustíveis fósseis. Já do lado da oferta, políticas como impostos sobre carbono, apoio à pesquisa e desenvolvimento (P&D) verde, e investimentos diretos em tecnologias sustentáveis são fundamentais. Além disso, a criação de bens públicos, como

infraestrutura verde e projetos de pesquisa, é crucial para fomentar a economia circular e impulsionar a inovação.

Instituições internacionais desempenham um papel central, com acordos como o Acordo de Paris e os ODS da ONU, que definem metas e compromissos globais. No entanto, a transformação verde exige também uma revolução institucional mais profunda, que leve em conta as complexidades da governança global, as desigualdades econômicas e a urgência das mudanças climáticas. A transição verde precisa ser rápida, global e integrada aos sistemas econômicos, especialmente considerando o papel das grandes empresas de tecnologia que dominam o consumo de energia e materiais.

Para alcançar uma "idade de ouro verde", é necessário repensar o financiamento e a colaboração internacional, com propostas que incluem a criação de um imposto global e um fundo verde para impulsionar soluções tecnológicas sustentáveis, além da revisão das políticas da OMC que limitam o uso de subsídios e tarifas para proteger indústrias verdes emergentes. A criação de uma instituição global para monitoramento das métricas ESG e o desenvolvimento de padrões progressivos para produtos eletrônicos sustentáveis também são essenciais.

A transformação verde não é apenas uma necessidade ambiental, mas também uma oportunidade para redefinir o desenvolvimento econômico global de forma mais sustentável e inclusiva. Com políticas públicas eficazes, cooperação internacional e inovação tecnológica, é possível criar um futuro onde a economia circular, a energia limpa e a justiça social caminham juntas, permitindo uma transição justa e acelerada para um mundo mais sustentável.

Assim, é possível sonharmos em chegar na sexta revolução tecnológica onde a Economia verde seja mainstream, com o mercado verde está totalmente estabelecido, a industrialização com carbono zero, empresas adotam modelos de negócios circulares como parte do seu core business. Além disso, sistemas circulares totalmente desenvolvidos, produtos com fácil desmontagem, reciclagem ou reuso, e a cultura do "desperdício zero" seja realidade.

A adoção de veículos elétricos com a infraestrutura de recarga bem desenvolvida e a produção de baterias mais barata e eficiente. As montadoras de automóveis oferecem uma gama diversificada de modelos elétricos para consumidores e empresas.

As práticas de agricultura regenerativa, como a rotação de culturas, o uso de compostagem e a redução de pesticidas, amplamente adotadas. A construção de edifícios ecológicos e de baixo carbono padrão.

A transformação verde, que caracteriza a 6ª Revolução Tecnológica, exige não apenas a adoção de novas tecnologias, mas também um compromisso coletivo das sociedades, governos e empresas. A construção de um pacto social capaz de impulsionar as transformações necessárias para uma economia de baixa emissão de carbono é fundamental para que as tecnologias digitais se tornem eficazes na promoção de um futuro sustentável. Isso implica na superação de desafios institucionais e na criação de uma infraestrutura regulatória e de financiamento que favoreça a inovação e a implementação, assim como Carlota Perez em sua visão holista e realista, você acreditaria em um futuro próximo que a 6ª revolução tecnológica pode se tornar uma realidade ou é apenas uma utopia?

REFERÊNCIAS

- ABRAMOVAY, R. *Transição para uma Economia Verde: Desafios e Oportunidades*. São Paulo: Editora FGV, 2012.
- AHMED, E.; PATGIRI, R. The trends, challenges, and future of big data. *International Journal of Computer Applications*, v. 140, n. 4, p. 14-19, 2016.
- ALENCAR, A. *et al.* Impactos das queimadas e incêndios florestais na biodiversidade e no carbono da Amazônia. *Ciência & Ambiente*, v. 18, n. 1, p. 22-30, 2006.
- ALMEIDA, P. Desacoplamento Econômico e Políticas Públicas para uma Economia Verde. *Revista de Economia e Política Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 92-110, 2012.
- ALTENBURG, T.; CORROCHER, N.; MALERBA, F. *O salto da China na eletromobilidade*, 2022.
- APA. American Psychological Association. *The role of digitalization in the energy transition*. International Energy Agency (IEA), 2017a.
- ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* Environmental change and the carbon balance of Amazonian ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 28, n. 9, p. 902-917, 2014.
- ARMBRUST, M. *et al.* A View of Cloud Computing. *Communications of the ACM*, v. 53, n. 4, p. 50-58, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1721654.1721672>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- BAKKER, E.; WANG, F.; HUISMAN, J.; DEN HOLLANDER, M. (2014). Products that go round: Exploring product life extension through design. *Journal of Cleaner Production*, v. 69, p.10-16, 2014.
- BALLESTERO, M. *Economia Ecológica e Ambiental: Teoria e Prática*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008.
- BARON, D. *Public Finance and Public Policy: A Political Economy Perspective*. Prentice Hall, 1991.
- BBC BRASIL. *As emissões de CO2 no mundo, de 1950 até hoje: um crescimento exponencial*, 2021.
- BHAMIDIPATI, S.; HANSEN, L. *Small-scale renewable energy deployment in Sub-Saharan Africa: challenges and solutions*, 2021.
- BLOOMBERG. *Hydrogen and its potential role in future energy markets*, 2020.
- BOCKEN, N. M. P.; BAKKER, C.; DE PAUW, I. Circular Business Models: Exploring the Role of Technology in Sustainability. *Journal of Business Models*, v. 7, n. 1, p. 23-40, 2019.

BOCKEN, N. M. P.; DE PAUW, I.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B. Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). *Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa*. Brasília, 2009.

BRIGGS, Asa; BURKE, Peter. *Uma história social da mídia: de Gutenberg à Internet*. Tradução Maria Carmelita Pádua Dias. 2. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2006.

CALVÃO, F. e Archer, M. 'Extração digital: rastreabilidade de blockchain em cadeias de suprimentos minerais', *Geografia Política*, n. 87, p. 102-381, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2021.102381>. Acesso em: 02 jan. 2025.

CALVÃO, R.; ARCHER, D. Digital Technologies and Critical Mineral Extraction: New Opportunities for Sustainable Mining. *Sustainable Production and Consumption*, v. 27, p. 428-439, 2021.

CASTELLACCI, Fulvio. Innovation, diffusion and catching-up in the fifth long wave. *Futures*, n. 38, p. 841-863, 2006.

CASTELLS, Manuel [1996]. *A sociedade em rede*. A era da informação: economia, sociedade e cultura. Volume 1. São Paulo: Paz e Terra, 2011.

CASTELLS, Manuel. *A Galáxia da Internet* – reflexões sobre a internet, os negócios e a sociedade. São Paulo: Cortez, 2003.

CAVALCANTI, C. *Economia Ecológica: Uma Abordagem Interdisciplinar para a Sustentabilidade*. São Paulo: Editora Atlas, 2010.

CHENG, L. *et al.* Natural Resource Management and Green Development: Challenges and Opportunities for Sustainability. *Ecological Economics*, n. 180, 106865, 2021.

CICERONE, G. *et al.* «Inteligência artificial regional e geografia das tecnologias ambientais: o conhecimento local da IA ajuda a tecnologia verde regional especialização?», *Estudos Regionais*, v. 57, n. 2, p. 330–343, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00343404.2022.2092610>. Acesso em: 10 jan. 2025.

COCHRANE, M. A.; SCHULZE, M. D. Fire, vegetation, and the environment in the Amazon Basin. *Environmental Science & Technology*, v. 33, n. 8, p.1299-1303, 1999.

COHEN, J. *Between truth and power: the legal constructions of informational capitalism*.

CORTADA, J. W. The ENIAC's Influence on Business Computing, 1940s–1950s. *IEEE Annals of the History of Computing*, p. 26-28, 2006.

COYLE, D.; NGUYEN, D. Cloud computing, cross-border data flows and new challenges for measurement in economics. *National Institute Economic Review*, n. 249, p. 30-38, 2019.

CRISCUOLO, A.; LEANDRO, P. *Artificial intelligence and its application in hydrogen production: a case study of metal oxide catalysts*, 2024.

DAVENPORT, T; DYCHÉ, J. *Big Data in Big Companies*. Thomas H. Davenport and SAS Institute Inc, 2013.

DAVENPORT, T. H. *Big Data at Work: Dispelling the Myths, Uncovering the Opportunities*. *Harvard Business Review Press*, 2014.

DAVENPORT, T. H.; DYCHÉ, J. *Big Data in Big Companies*. International Institute for Analytics, 2013.

DAVENPORT, T; BARTH, P; BEAN, R. How 'Big Data' is Different. *MIT Sloan Management Review*, July, 30, 2012.

DEGRYSE, C. *Digitalisation of the Economy and its Impact on Labour Markets*. European Trade Union Institute (ETUI), 2016.

DOSI, G. *Innovation and economic change: The dynamics of industrial capitalism*. Oxford University Press, 1991.

DOSI, G. *Technical Change and Industrial Transformation*. London: MacMillan, 1984.

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.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Eficiência energética no Brasil: avanços e desafios*, 2022.

ESFARJANI, Keyvan. *Alinhando os esforços de sustentabilidade em toda a cadeia de valor de semicondutores*. Disponível em: <https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/newsroom/opinion/driving-sustainability-alignment-semiconductor-value-chain.html>. Acesso em: 15 out. 2024.

FREEMAN, C. *The Economics of Hope: Essays on Technical Change, Economic Growth and the Environment*. London: Pinter Publishers, 1992.

FREEMAN, C.; LOUÇÃ, F. *As Time Goes By: From the Industrial Revolutions to the Information Revolution*. Oxford University Press, 2001.

FREEMAN, C.; PEREZ, C. (1988). Structural crisis of adjustment: Business cycles and investment behavior. In: DOSI, G. et al. (Ed.). *Technical change and economic theory*. London: Pinter Publishers, 1988, p. 38-66.

FREEMAN, Christoph. *Technology policy and economic performance*. London: Pinter Publishers London and New York, 1987.

FREITAS, Juliana Nakamura de. *O modelo de paradigmas tecno-econômicos de Carlota Pérez e a difusão das tecnologias de informação e comunicação (TIC) no Brasil*, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) - Faculdade de Economia, Administração, Contábeis e Atuariais da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2011.

FRENKEN, K. *et al.* An Institutional Logics Perspective on the Gig Economy. In: MAURER, I., MAIR, J., OBERG, A. (ed.). *Theorizing the Sharing Economy: Variety and Trajectories of New Forms of Organizing*. Bingley, UK: Emerald Publishing Limited, 2020.

GANDOMI, A.; HAIDER, M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, v. 35, n. 2, p. 137-144, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401214001066>. Acesso em: 04 set. 2024.

GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, v. 52, n. 2, p. 143-150.

GOLDFARB, A.; TUCKER, C. Digital economics. *Journal of Economic Literature*, v. 57, n. 1, p. 3-43, 2019. DOI: doi.org/10.1257/jel.20171452.

GOMES, M.; SILVA, L. *A transição para uma economia verde: desafios e soluções*, 2017.

GOUVEIA, N. Impactos da disposição inadequada de resíduos na saúde pública. *Journal of Environmental Health*, v. 74, n. 1, p. 56-68, 20123.

GUIMARAES, M. *A ineficiência logística do setor de transportes brasileiro e seus impactos na competitividade nacional e internacional*, 2015.

GWEC (Global Wind Energy Council). *Global wind report: Annual market update*, 2022.

HÄMÄLÄINEN, T. Institutions, innovation and economic performance. In: *Institutions and economic change*. Routledge, 2003, p. 150-170.

HAUSMANN, R. The Global Economy and Renewable Energy: A New Energy Paradigm. *Energy Policy*, v. 163, 112730, 2023.

HURWITZ, J.; BLOOR, R.; KAUFMAN, M.; HALPER, F. *Cloud Computing for Dummies*. Wiley Publishing, 2010.

IEA - International Energy Agency (IEA). *Energy storage technology and market developments*. International Energy Agency, 2017a.

IEA - International Energy Agency (IEA). *Hydrogen in the energy transition: Progress report*, 2021c.

IEA - International Energy Agency (IEA). *The future of electric vehicles: Energy efficiency and carbon reduction potential*, 2022.

IEA -International Energy Agency (IEA). *Electric vehicles and renewable energy: A pathway to a carbon-neutral future*, 2023.

IPCC - INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2007: the physical science basis. Summary for policymakers*. IPCC: Genebra, 2007.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

IRENA - International Renewable Energy Agency. *Hydrogen and digitalization: Empowering sustainable energy solutions*, 2023.

IRENA - International Renewable Energy Agency. *Renewable energy statistics*, 2022.

KARJALAINEN, A.; BYRNE, R. (2021). *Renewable energy solutions and their role in reducing carbon footprints in sub-Saharan Africa*, 2021b.

KARJALAINEN, A.; BYRNE, R. M-KOPA: Providing affordable solar power to rural households in Africa. *Renewable Energy for Development*, v. 29, n. 2, p. 49-63, 2021a.

KENNEY, Martin; ZYSMAN, John. The rise of the platform economy. *Issues in science and technology*, v. 32, n. 3, p. 61-69, 2016.

KHAN, E. A.; QUADDUS, M. 'E-riquixás nas ruas urbanas: questões e políticas de sustentabilidade'. *Revista Internacional de Sociologia e Política Social*, v. 41, n. 7-8), p. 930-948, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJSSP-07-2020-0315/FULL/XML>. Acesso em: 15 set. 2024.

KHAN, M. A.; QUADDUS, M. The role of AI and digitalization in optimizing energy efficiency in transport systems. *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 14, n. 5, p. 433-450, 2020.

KINGIRI, A.; FU, Q. *Digital financial technologies in renewable energy solutions: The role of mobile money in solar access*, 2020.

KONDRATIEFF, Nikolai D. The long waves in economic life. *Review (Fernand Braudel Center)*, v. 2, n. 4, 1979.

LEE, K. *AI Super-powers: China, Silicon Valley and the New World Order*. Boston.

LEINER, Barry M. *et al.* The past and future history of the Internet. *Communications of the ACM*, v. 40, n. 2, p. 102-108, 1997.

LEMA, R.; FU, X.; RABELLOTTI, R. *Green Transformation and Global Environmental Change: Examining the Role of Innovation and Technology*. Oxford University Press, 2020.

LEMA, R.; KONDA, P.; WUTTKE, T. 'O setor de veículos elétricos no Brasil, Índia e África do Sul: existem janelas verdes de oportunidade?'. Em revisão [Pré-impressão], 2024.

LEMA, R.; RABELLOTTI, R. The Challenges of Green Innovation in Emerging Economies: A Study on Renewable Energy and Technology Adoption. *World Development*, v. 135, p. 202-215, 2023.

LEMA, Rasmus; PEREZ, Carlota. *The green transformation as a new direction for techno-economic development*, 2024.

LITVINENKO, A. et al. Digital Transformation in Mining: Applications for Sustainable Practices. *Resources Policy*, v. 74, 102455, 2022.

LITVINENKO, V. et al. (2022) 'Diretrizes e requisitos globais para competências profissionais de engenheiros de extração de recursos naturais: implicações para os princípios ESG e objetivos de desenvolvimento sustentável'. *Journal of Cleaner Production*, v. 338, p. 130530. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530>. Acesso em: 10 set. 2024.

LOVELOCK, J. *The Revenge of Gaia: Why the Earth Is Fighting Back – and How We Can Still Save Humanity*. Allen Lane, 2006.

LUNDAVALL, B.-Å.; JOSEPH, K. J.; CHAMINADE, C.; VANG, J. *The learning economy and the economics of hope*. Oxford University Press, 2002.

MACAZZATO.; MCPHERSON, M. *The Green New Deal: A bold missionoriented approach*. Institute for Innovation and Public Purpose, Policy Brief series (IIPP PB 04), Londres, 2018.

MACHADO, Gleysson B. *A promoção da educação ambiental e a gestão de resíduos sólidos*. 2023. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/manejo-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 20 dez. 2024.

MAGNANI, Leonne Augusto Coelho. *Ciclos ou ondas longas? O tratamento das flutuações de temporalidade longa em Kondratieff, Schumpeter e Mandel*. 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MÅNBERGER, A. The Resource Curse and Green Transformation: Is Sustainability a Path for Developing Countries? *World Development*, v. 138, 105287, 2021.

MANYIKA, J. et al. *Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition, and Productivity*. McKinsey Global Institute, 2011.

MANYIKA, J. et al. *Digital globalization: the new era of global flows*. New York: McKinsey Global Institute, 2016.

MANYIKA, J. et al. *Globalização digital: a nova era dos fluxos globais*. Nova York: McKinsey Global Institute, 2016.

MARTES, A. C. B. Weber e Schumpeter: a ação econômica do empreendedor. *Revista de Economia Política*, v. 30, n. 2(118), p. 254-70, abr./jun. 2010.

MARTÍNEZ-ALIER, J. *Ecology, Economy and the Environment: A Political Ecology Perspective*. Springer, 1998.

MATHEWS, J. A. *Greening the Economy: A Transformative Approach*. Oxford University Press, 2013.

MATTOS, L. A. *Os modos de transporte e seus impactos no uso de energia e na emissão de gases de efeito estufa*, 2001.

MAZZUCATO, M. *O Estado empreendedor – Desmascarando o mito do setor público vs. setor privado*. 1. ed. São Paulo: Portfolio-Penguim, 2014.

MAZZUCATO, M. What the Green Revolution Can Learn From the IT evolution. *IIPP Policy Brief*, 08 July 2019. Disponível em: https://www.ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/sites/public-purpose/files/iipp_policybrief_08_green_entrepreneurial.pdf. Acesso em: 09 jan. 2025.

MAZZUCATO, M.; PEREZ, C. Redirecting Growth: inclusive, sustainable and innovation-led. UCL Institute for Innovation and Public Purpose, *Working Paper Series*. IIPP WP, 2022, n. 16. Disponível em: <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/wp2022-16>. Acesso em: 10 abr. 2024.

MAZZUCATO, M; MCPHERSON, M. *The Green New Deal: A bold mission-oriented* McCarthy, J. Artificial Intelligence: The Science and Engineering of Making Intelligent Machines. In Artificial Intelligence (pp. 1-16). Springer, 2006.

MENENDEZ, R. *et al.* Green Transformations and the Role of Digital Technologies in Economic Development. *Environmental Economics and Policy Studies*, v. 25, n. 2, p. 297-314, 2023.

MISHRA, A.; HOPKINSON, P.; TIDRIDGE, D. Circular economy strategies: A framework for sustainable business practices. *Journal of Business Research*, v. 89, p. 472-481, 2018.

NELSON, R. R. *The sources of economic growth*. Harvard: Harvard University Press, 1995.

NETAFIM. *Tecnologias de irrigação e energia renovável na agricultura: Avanços e tendências*. Netafim, 2022.

NWAILA, G.T. et al. «A indústria dos minerais na era da transição digital: uma abordagem energeticamente eficiente e ambientalmente consciente». *Política de Recursos*, v. 78, p. 102851, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102851>. Acesso em: 15 dez. 2024.

O SALTO da China na eletromobilidade. Uma história de transformação verde que impulsiona a recuperação e a vantagem competitiva', *Previsão Tecnológica e Mudança Social*, v. 183, p. 121914, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2022.121914>.

PEREZ, C. Microelectronics, Long Waves and World Structural Change: New Perspectives for Developing Countries. *World Development*, v. 13, n. 3, p. 441-463, 1985.

PEREZ, C. *Reespecialização e implementação das Tics paradigma* – um ensaio sobre os desafios atuais da globalização, 2006.

PEREZ, C. *Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages*. New York: University of North Carolina Press, 1988.

PEREZ, Carlota – Technical Change and Opportunities for Development as a Moving Target. *Cepal Review*, n. 75, p. 109.130, Dez. 2001.

PEREZ, Carlota. *Capitalism, Technology and a Green Global Golden Age: The Role of History in Helping to Shape the Future* Carlota Perez, 2016. Disponível em: <https://carlotaperez.org/publications/>. Acesso em: 20 maio 2024.

PEREZ, Carlota. *Finance and technical change: A long-term view*. 2004c. Disponível em: <https://carlotaperez.org/publications/>. Acesso em: 05 maio 2024.

PEREZ, Carlota. *La Transición al Crecimiento Sostenible Digital: Las Lecciones de la Historia*, 2017.

PEREZ, Carlota. *Revoluciones tecnológicas y capital financiero: La dinámica de las grandes burbujas financieras y las épocas de bonanza*. México: Siglo XXI Editores, 2004a. Disponível em: <https://carlotaperez.org/publications/>. Acesso em: 15 maio 2024.

PEREZ, Carlota. *Structural Change and Assimilation of New Technologies in the Economic and Social Systems*, 1991.

PEREZ, Carlota. *Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages*. Cheltenham: Edward Elgar, 2002.

PEREZ, Carlota. *Technological Revolutions and Techno-Economic Paradigms*, 1982.

PEREZ, Carlota. Technological revolutions and techno-economic paradigms. Cambridge. *Journal of Economics*, v. 34, n. 1, p. 185-202, 2009.

PEREZ, Carlota. *Technological Revolutions, Paradigm Shifts and Socio-Institutional Change*. 2004b. Disponível em: <https://carlotaperez.org/publications/>. Acesso em: 15 maio 2024.

PNUMA. *Green Economy: A Concept for Sustainable Development*. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2011.

RIBEIRO, L. M.; ASSUNÇÃO, R. Queimadas e o impacto ambiental na Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 16, n. 45, p. 97-110, 2002.

SACRAMENTO, R. *A gestão de resíduos sólidos urbanos e os desafios para a sustentabilidade*. São Paulo: Editora FGV, 2014.

SCHUMPETER, J. (1942). *Capitalism, Socialism and Democracy*, George Allen & Unwin, 5th ed., 1981.

SCHUMPETER, J. A. “O Fenômeno Fundamental do Desenvolvimento Econômico”. In: *A Teoria do Desenvolvimento Econômico*. Rio de Janeiro: Nova Cultural, 1985.

SCHUMPETER, J. A. *A teoria do desenvolvimento econômico*. São Paulo: Nova Cultural, 1988.

SCHUMPETER, J. A. *A Teoria do Desenvolvimento Econômico: uma investigação sobre lucro, capital, crédito, juro e o ciclo econômico*. Rio de Janeiro: Nova Cultural, 1982.

SCHUMPETER, J. A. *Capitalism, socialism and democracy*. New York: Harper and Brothers, 1961.

SHARMA, V.; GHOSHAL, S. *The future of hydrogen in industrial applications and transportation*, 2015.

SILVA, A. *Computação em Nuvem: Conceitos, Tecnologias e Desafios*. São Paulo: Editora ABC, 2010.

SINGH, R.; MISHRA, S.; TRIPATHI, K. ‘Analysing acceptability of E-rickshaw as a public transport innovation in Delhi: A responsible innovation perspective’, *Technological Forecasting and Social Change*, v. 170, p. 120908, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2021.120908>.

SINGH, S. *et al.* 'Veículos elétricos para mobilidade urbana de baixa emissão: status atual e revisão de políticas para a Índia'. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 41, n. 9, p. 1323–1359, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14786451.2022.2050232>. Acesso em: 30 dez. 2024.

SMITH, P. *et al.* The role of fire in the carbon balance of tropical forests. *Global Change Biology*, v. 20, n. 7, p. 2677-2686, 2014.

SOARES, R. S.; HIGUCHI, M. L. Mudanças climáticas: Efeito estufa e suas implicações para o clima global. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 5, n. 1, p. 21-35, 2006.

SOARES; Terezinha de Jesus; HIGUCH, Niro. *The UN convention on climate change and the pertinent Brazilian legislation with emphasis on the environmental legislation in the State of Amazonas*, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000400021>. Acesso em: 10 dez. 2024.

STURGEON, T. Upgrading strategies for the digital economy. *Global Strategy Journal*, p.1-24, 2019. DOI: doi.org/10.1002/gsj.1364.

TIGRE, Paulo Bastos. *Gestão da inovação: a economia da tecnologia no Brasil*, 1997.

TIGRE, Paulo Bastos; 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: 05 maio 2024.

UNCTAD. *Digital Economy Report 2019*. Criação e captura de valor: implicações para países em desenvolvimento. Genebra: Nações Unidas, 2019.

UNCTAD. *World Investment Report 2017*. Investment and the Digital Economy. Geneva: United Nations, 2017.

UNIDO. *Organization United Nations Industrial Development. 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.

VICTO, José S. N.; BONACELLI, Maria B. M.; PACHECO, Américo. O Sistema Tecnológico Digital: inteligência artificial, computação em nuvem e Big Data. *Revista Brasileira de Inovação*, 2020. DOI: <http://doi.org/10.20396/rbi.v19i0.8658756>.

ZYSMAN, J.; KENNEY, M. The next phase in the digital revolution: intelligent tools. *Comunicações da ACM*, v. 61, n. 2, 2018. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3173550>