



## As transições entre paradigmas tecno-econômicos e as janelas de oportunidade: o emergente caso das energias renováveis

**Autores:** **Lucas Corrêa** é doutorando em Desenvolvimento Econômico no Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas (IE – Unicamp). **Silvio Antônio Ferraz Cario** é professor titular voluntário dos Programas de Pós-Graduação em Economia e de Administração da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

### Resumo

Este artigo discute os conceitos teórico-analíticos de paradigmas tecno-econômicos, revoluções tecnológicas e grandes surtos de desenvolvimento visando entender os processos de mudança tecnológica e destruição criativa em ondas sucessivas. Sobre essas bases, argumenta-se que as energias renováveis podem se tornar o insumo-chave de uma emergente revolução tecnológica, satisfazendo todos os critérios estabelecidos na literatura. Para os países em desenvolvimento, em específico, propõe-se o argumento de que as tecnologias renováveis podem representar uma janela de oportunidade em aberto neste período de transição entre paradigmas. Políticas de inovação em tecnologias renováveis devem, portanto, ser colocadas no centro das estratégias de desenvolvimento.

**Palavras-chave:** Revoluções tecnológicas; Paradigmas tecno-econômicos; Janelas de oportunidade; Carbon lock-in; Energias renováveis.

**JEC:** 025, 033, 042.

### Abstract

This article discusses the theoretical-analytical concepts of techno-economic paradigms, technological revolutions and great surges of development aiming to understand the processes of technological change and creative destruction in successive waves. On these bases, it is argued that renewable energies can become the key-input for an emergent technological revolution, satisfying all the criteria attributed in the literature. For developing countries, in particular, the argument is made that renewable technologies can represent an window of opportunity open in this period of transition between paradigms. Therefore, innovation policies in renewable technologies must be placed at the center of development strategies.

**Keywords:** Technological revolutions, Techno-economic paradigms, Windows of opportunity, Carbon lock-in, Renewable energy.

## Introdução

Desde a Revolução Industrial, a intensificação do uso de combustíveis fósseis conduziu a um rápido crescimento na concentração de  $CO_2$  na atmosfera terrestre (STERN, 2015). Dois séculos depois, essa elevada intensidade em carbono ainda é o modelo estabelecido para geração de energia: em 2015, por exemplo, cerca de 80% da energia global usada nos domicílios, nas indústrias, nos serviços e transportes foi obtida a partir da queima de combustíveis fósseis (WORLD BANK, 2019). Esse fenômeno é chamado de “*carbon lock-in*” (UNRUH, 2000, 2002) e é resultado de um processo de mudança tecnológica *path dependent* (DOSI, 1982, 1988; ARTHUR, 1989) em tecnologias intensivas em carbono e nocivas ao meio ambiente, reforçado pela inércia das instituições e das políticas, assim como pela resistência deliberada e coordenada de poderosos interesses estabelecidos.

Dessa dinâmica, tem-se hoje uma matriz energética na qual as energias renováveis possuem papel relativamente pequeno – 13,8%, em 2017, considerando todas as fontes renováveis – biocombustíveis e resíduos, hidrelétrica, eólica, solar, geotérmica etc. (IEA, 2020a) – apesar dos avanços tecnológicos atingidos. Muitas dessas tecnologias possuem custos relativos não-competitivos, especialmente por não terem se beneficiado dos retornos crescentes, como suas concorrentes sujas (FOXON, 2002), e por sofrerem com um sistema de preço enviesado – que não leva em conta as externalidades ambientais das tecnologias intensivas em carbono (KEMP; NEVER, 2017; MOWERY *et al.*, 2010) e que concede elevados subsídios aos combustíveis fósseis (IEA, 2020b; COADY *et al.*, 2019).

Segue-se Mathews (2013a) no entendimento de que o *carbon lock-in* é uma característica central do paradigma tecno-econômico do Petróleo, Automóvel e Produção em Massa, estendendo-se ao paradigma das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC). A quebra do *carbon lock-in* via processo de destruição criadora é um grande desafio para a emergência de um paradigma tecno-econômico baseado em energias renováveis (MATHEWS, 2013a). Deve-se promover o desenvolvimento e a introdução de novas soluções tecnológicas carbono-neutras, ao mesmo tempo que se lida com as transformações políticas e institucionais necessárias para quebrar a resistência tecnológica, social e institucional das indústrias existentes e estabelecidas.

Por outro lado, na questão climática, identificam-se não apenas desafios, mas também oportunidades, visto que combater os urgentes problemas ambientais requer uma extensa mudança na base tecnológica e na infraestrutura da economia, de forma a superar o *carbon lock-in*, o que coloca a ciência e a inovação tecnológica em posição de destaque (BOWEN; HEPBURN, 2014; FAGERBERG, 2018). Os recentes avanços tecnológicos na produção e consumo de energia, na organização das cidades e no uso da terra demonstram que os objetivos

de crescimento, desenvolvimento, mitigação e adaptação são compatíveis e que “*the portrayal of climate action as being in inexorable conflict with growth, poverty reduction, and radical improvements in human well-being is false and diversionary*” (STERN, 2015, p. xxvii). Segundo Stern (2015), a transição para uma economia de baixo carbono pode representar uma nova e promissora onda de investimento, inovação e prosperidade global.

Seguir a trajetória criada pela revolução tecnológica das energias renováveis requer inovações, radicais e em grande quantidade, em diversos setores (FAGERBERG, 2018), possibilitando o alinhamento de objetivos ambientais com objetivos econômicos e sociais (BUSCH *et al.*, 2018). Para Pegels e Lütkenhorst (2014), alinhar a proteção ambiental aos objetivos mais tradicionais das políticas industriais e de inovação, como competitividade e geração de emprego, permite conquistar maior apoio na e da sociedade. A proposta, então, é que os problemas ambientais sejam enfrentados com ciência, tecnologia e inovação, de forma a reorientar o crescimento econômico; não pará-lo.

Essa discussão apresenta importantes implicações para o caso específico dos países em desenvolvimento. Entende-se que o crescimento econômico é essencial para a criação de empregos e redução da pobreza (LEE; MATHEWS, 2015); e o crescimento na direção verde pode permitir que milhões de novos consumidores nesses países adotem melhores padrões de vida – ainda que diferentes da noção de “boa vida” do século XX (PEREZ, 2016). Nesse curso, torna-se necessário criar um sistema energético para alimentar o crescimento na manufatura, sendo os combustíveis fósseis a primeira opção – assim como ocorreu em todas as potências industriais –, porém a sua busca enfrenta sérios problemas nos limites da oferta e nas questões geopolíticas – bloqueios e guerras comerciais, guerras civis, revoluções e terrorismo. Isso implica a necessidade de se estabelecer um modelo de desenvolvimento baseado em indústria verde em larga escala – no qual as inovações nas indústrias energéticas são essenciais –, contrapondo-se ao modelo baseado em combustíveis fósseis. (MATHEWS, 2018).

Entende-se, ainda, que o *carbon lock-in* pode ser menos restritivo em economias em desenvolvimento e, por esse motivo, pode-se esperar que esses países tenham maior sucesso na revolução tecnológica das energias renováveis (MATHEWS; REINERT, 2014). Mais do que isso, no arcabouço teórico-analítico dos paradigmas tecno-econômicos (FREEMAN; PEREZ, 1988; PEREZ, 2002, 2010), argumenta-se que cada revolução tecnológica abre uma janela de oportunidade para que diferentes países realizem iniciativas para se emparelharem ou, até mesmo, tomarem liderança na trajetória de desenvolvimento. A oportunidade está dada, considerando que, como observa Mathews (2013a, 2013b), o emergente sexto paradigma tecno-econômico está em sua fase de gestação — ou nos estágios



iniciais de instalação –, no qual as energias renováveis constituem um conjunto de insumos-chave.

Atentando para esses aspectos, o presente artigo tem como objetivo discutir a problemática das inovações em tecnologias de energias renováveis com base na literatura neo-schumpeteriana, destacando seu papel central na emergente revolução tecnológica e apresentando argumentos que justificam a janela de oportunidade que se abre para os países em desenvolvimento, no momento de transição do paradigma tecno-econômico.

Assim sendo, estrutura-se o artigo em quatro seções. Na primeira seção, contextualiza-se o tema e apresenta-se o objetivo principal. Na segunda seção, discutem-se os conceitos de paradigma tecno-econômico, revoluções tecnológicas e grandes surtos de desenvolvimento, bem como as turbulências socioinstitucionais envolvidas nesses processos, com ênfase na discussão sobre as janelas de oportunidade que se abrem nos momentos iniciais de mudança de paradigma e as implicações desse fenômeno sobre as estratégias de desenvolvimento dos países atrasados. Na terceira seção, abordam-se questões relacionadas com as energias renováveis, em especial, argumenta-se que as energias renováveis podem se tornar o insumo-chave de uma próxima revolução tecnológica, de caráter “verde”, o que coloca o setor como uma potencial janela de oportunidade em aberto (por algum tempo) para países em desenvolvimento. E, por fim, na quarta seção, apresentam-se as considerações finais.

## 1. Revoluções tecnológicas e janelas de oportunidade

### 1.1. Revoluções tecnológicas, paradigmas tecno-econômicos e grandes surtos de desenvolvimento

Duas características são centrais para a definição de uma revolução tecnológica. Primeiro, as revoluções tecnológicas são um conjunto inter-relacionado de importantes inovações radicais, tanto de produto quanto de processo, que formam uma grande constelação de tecnologias interdependentes. A interação, coerência e sinergia dos sistemas tecnológicos dentro de uma revolução tecnológica implica que eles geram externalidades e mercados uns para os outros, influenciando as direções das inovações subsequentes (PEREZ, 2010). Essa característica vai de encontro com a ideia de que as inovações ocorrem em aglomerados ou *clusters* (SCHUMPETER, 1997), e distingue um conjunto de sistemas tecnológicos de uma revolução tecnológica. Mathews (2013a) argumenta que as revoluções tecnológicas permanecem à margem da teoria econômica neoclássica, pois contradiz a suposição de que a tecnologia é exógena e aleatória, sem a qual as funções de produção, equilíbrio e outros conceitos caem por terra.

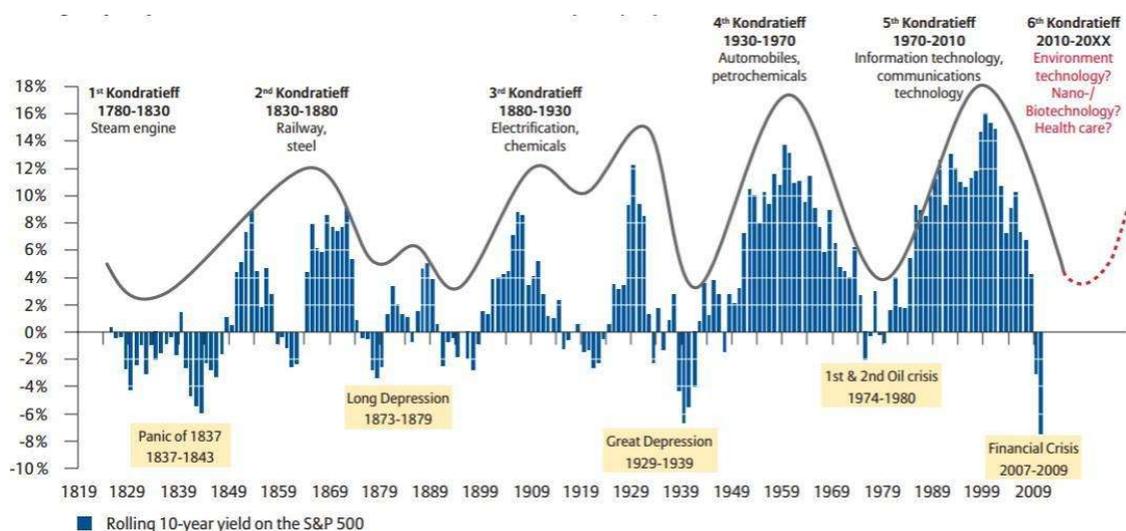
A segunda característica consiste em que as revoluções tecnológicas são mudanças nos sistemas tecnológicos que, por serem altamente pervasivas, não

apenas introduzem importantes produtos, serviços e indústrias totalmente novos, como também possuem potencial de redefinir e afetar, direta ou indiretamente, todos – ou quase todos – os outros setores da economia (FREEMAN; PEREZ, 1988; PEREZ, 2002). Uma revolução dá origem a um processo de multiplicação de inovações e sistemas tecnológicos, a montante e a jusante dos seus sistemas centrais, abrindo oportunidades lucrativas para a expansão e o crescimento (PEREZ, 2001). É essa característica que justifica a utilização do termo “revolução”.

A título de exemplo, ressalta-se o caso da atual revolução das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), a qual teve início como um sistema tecnológico ligado aos semicondutores integrados e microprocessadores – com uso inicial restrito a jogos, calculadoras, miniaturização e digitalização de instrumentos civis e militares –, e foi seguida por uma série de inovações radicais – minicomputadores, computadores pessoais, *software*, internet etc. –, que se interconectaram e continuaram se expandindo juntas, através de poderosos *feedbacks* positivos, tanto nas tecnologias quanto nos mercados (PEREZ, 2010).

Esse padrão fica bastante claro nos índices do mercado de ações, conforme ilustrado na Figura 1, onde se pode verificar cinco revoluções, desde a Revolução Industrial, e o início de uma sexta.

Figura 1 – Ciclos de Kondratieff evidenciada pelo rendimento de 10 anos na S&P 500 (%) – 1814-2009



Fonte: Allianz Global Investors (2010).

O aproveitamento do máximo potencial de criação de riqueza de cada revolução tecnológica foi possibilitado, em cada período de tempo, pelo estabelecimento de uma estrutura socio-institucional adequada (PEREZ, 2002). A revolução tecnológica é uma condição necessária para a ocorrência de um período



prolongado de crescimento econômico, porém não é condição suficiente, dado que é necessário, também, uma estrutura socio-institucional compatível com as novas tecnologias.

Cada revolução tecnológica conduziu uma profunda transformação do conjunto de tecnologias utilizadas, tanto pela simples substituição quanto pela modernização do equipamento e processos existentes. Além disso, cada uma dessas revoluções envolveu, ainda, uma profunda transformação nas pessoas, organizações e habilidades:

[...] each of these revolutions is accompanied by a set of 'best-practice' principles, in the form of a techno-economic paradigm, which breaks the existing organizational habits in technology, the economy, management and social institutions (PEREZ, 2002, p. 7).

O conceito de “paradigma tecno-econômico”, introduzido pela primeira vez em Perez (1985), representa as melhores práticas na utilização das novas tecnologias, nos setores novos e na modernização dos antigos, da maneira mais efetiva. É o conjunto de princípios mais bem-sucedidos e lucrativos em termos de tecnologias, métodos, estrutura organizacional e modelos de negócios, que representam um “senso comum” na tomada de decisão de investimento e inovação (PEREZ, 2010), ou seja, é um viés que direciona as inovações tecnológicas e organizacionais (PEREZ, 1985). Em outras palavras, é a articulação de modelos tecnológicos e organizacionais que tiram o máximo do potencial de uma revolução tecnológica e guiam sua difusão.

Nessa via, Perez (1985) elenca características relacionadas com o paradigma tecno-econômico baseado em microeletrônicos, em contraste com as características do paradigma do petróleo: a) intensidade de informação *versus* intensidade de energia e materiais: essa característica, provavelmente a responsável pelas mudanças mais profundas, foi possibilitada pela mudança da estrutura de custo relativo que tornou a manipulação de dados, através de microeletrônicos e comunicação digital, cada vez mais barata; b) produção flexível *versus* produção em massa: com o novo paradigma, alta produtividade pode ser alcançada com economias de escopo em mercados segmentados, através da produção de um conjunto diversificado de bens em quantidade reduzida, ao contrário da produção em altas quantidades de um bem homogêneo para mercados de massa; e c) novos conceitos de eficiência organizacional: para que as firmas tirem proveito do potencial de diversificação e flexibilidade aberto pelo paradigma das TIC.

É através da influência de uma revolução tecnológica sobre o paradigma tecno-econômico que esta exerce sua capacidade de transformar outros setores, multiplicando o impacto das novas tecnologias por toda a economia. Além de promover o crescimento por longos períodos com as novas indústrias, uma



revolução tecnológica é capaz de guiar uma reorganização nas indústrias preexistentes, impulsionando o aumento de produtividade e aumentando o potencial de criação de riqueza (PEREZ, 2010). Um novo paradigma tecno-econômico surge em um mundo ainda dominado pelo paradigma antigo e começa a apresentar sua vantagem comparativa em apenas um setor, ou em alguns deles (FREEMAN; PEREZ, 1988). As transformações proporcionadas pelas revoluções alcançam toda a economia e, com isso, as antigas indústrias revitalizadas passam a se comportar como as novas em termos de dinamismo, produtividade e lucratividade, através da abertura de oportunidades de inovação e da provisão de novas tecnologias, infraestruturas e princípios organizacionais (PEREZ, 2001, 2010).

As melhores práticas, ou paradigmas tecno-econômicos, evoluem através do uso de novas tecnologias, da superação de obstáculos e da procura por melhores processos e rotinas. O caminho aberto pelos agentes pioneiros torna-se mais atrativo aos seguidores por conta de externalidades e condicionamentos – por exemplo, experiência na produção e treinamento de consumidores – e o sucesso destes sinaliza as oportunidades mais lucrativas (PEREZ, 2002). Um paradigma é gradualmente internalizado pelos agentes e acaba por se tornar uma lógica compartilhada, ou “senso-comum”, enraizada na estrutura institucional, facilitando as inovações compatíveis e dificultando as incompatíveis (PEREZ, 2002). Esse processo caracteriza-se como auto-reforçador: por um lado, um paradigma tecno-econômico funciona como sinalizador das melhores direções para os investimentos e as inovações; por outro, a maior adoção de novas tecnologias e a maior propagação em uma determinada direção confirmam a sabedoria dos princípios compartilhados, fortalecendo o paradigma (PEREZ, 2010).

Um paradigma tecno-econômico é construído em três áreas simultâneas. A primeira dá-se através de vantagens na estrutura de custo relativo. Entre as novas indústrias que surgem numa revolução tecnológica, ressalta-se a tendência de surgir um insumo de baixo custo altamente pervasivo, “*often a source of energy, sometimes a crucial material, plus one or more new infrastructures*” (PEREZ, 2010, p. 191). Em cada revolução tecnológica, há sempre um insumo-chave, ou um conjunto de insumos-chave associados que possuem: a) percepção clara de custo relativo baixo e em rápido declínio; b) oferta virtualmente ilimitada e disponibilidade por longos períodos; c) aplicabilidade abrangente e potencial claro na sua utilização em diversos produtos ou processos ao longo de toda a economia, diretamente ou através de outras inovações. A existência de novos insumos-chave aumenta as oportunidades de investimento, nas indústrias que produzem e distribuem tal insumo e nas que o utilizam, gerando potencial para grandes aumentos de produtividade e lucratividade (FREEMAN; PEREZ, 1988).



A segunda manifesta-se através dos espaços percebidos de oportunidades lucrativas. No cerne das revoluções tecnológicas estão princípios científicos básicos e tecnologias genéricas que abrem um vasto espaço de novas possibilidades, até então inviáveis, tanto no progressivo desenvolvimento das novas tecnologias quanto na utilização destas de maneira vantajosa nas indústrias existentes (PEREZ, 2010).

E a terceira revela-se através de novos critérios e princípios organizacionais. A prática com novas tecnologias e novas condições de mercado contribui para o surgimento de novos modelos de organização, mais eficazes e eficientes no aproveitamento do potencial de lucros das novas tecnologias (PEREZ, 2010). Sugere-se que:

[...] for society to veer strongly in the direction of a new set of technologies, a highly visible 'attractor' needs to appear, symbolizing the whole new potential and capable of sparking the technological and business imagination of a cluster of pioneers. This attractor is not only a technical breakthrough. What makes it so powerful is that it is also cheap or that it makes it clear that business based on the associated innovations will be cost-competitive (PEREZ, 2002, p. 11).

Ao longo das revoluções tecnológicas, as indústrias produtoras dos insumos-chave baratos e altamente pervasivos, ou "*motive branches*", que podem ser identificadas são: força hidráulica, no primeiro paradigma tecno-econômico; carvão, no segundo; aço – e energia elétrica (MATHEWS, 2018) – no terceiro; petróleo e outros petroquímicos, no quarto; e semicondutores, no quinto (PEREZ, 1985, 2010). Perez (1985) ressalta que nenhum desses insumos era exatamente "novo", no seu sentido técnico, em seus respectivos períodos; o elemento novo, introduzido em cada revolução tecnológica, que os tornaram "insumos-chave", foi uma radical redução nos seus custos relativos resultantes de rupturas tecnológicas e/ou organizacionais. E aponta, ainda, que a eletrônica existe desde o início do século XX e os transistores, semicondutores e computadores eram tecnologias importantes nos anos 1960, contudo, foi somente em 1971, com o microprocessador, que o novo potencial da microeletrônica barata se tornou visível (PEREZ, 2002).

Esse período de "gestação" de uma revolução tecnológica estende-se por períodos indefinidos até o ponto de *big-bang* (Figura 2) e a oferta do insumo-chave cresce rapidamente antes que o novo paradigma se estabeleça como dominante (FREEMAN; PEREZ, 1988). Essas rupturas são mais prováveis de ocorrerem, serem exploradas e aplicadas, quando as tecnologias relacionadas com o insumo-chave corrente têm exaurido seus potenciais para aumento de produtividade (PEREZ, 1985).

Além das "*motive branches*", identificam-se, ainda, duas categorias de indústrias de cada revolução tecnológica, classificadas de acordo com seu papel na

condução da mudança. Primeiro, tem-se as indústrias que são as principais usuárias dos insumos-chave e que carregam a “palavra” sobre as novas oportunidades, formando uma constelação com alta sinergia e intensos efeitos de *feedbacks*, chamadas de “*carrier branches*”: maquinário têxtil, no primeiro paradigma; motores (de ferro) à vapor, no segundo; navios (de aço) à vapor, no terceiro; automóveis (com motor à combustão interna) e eletrodomésticos, no quarto; e computadores, *softwares* e celulares, no quinto. Segundo, têm-se as infraestruturas, que expandem os limites do mercado, aprofundando a penetração para todas as indústrias: canais, no primeiro paradigma; ferrovias nacionais, no segundo; ferrovias transcontinentais e rotas de navios à vapor, no terceiro; estradas e eletricidade, no quarto; e, a *Internet*, no quinto (PEREZ, 2002, 2010).

Um “grande surto de desenvolvimento” (*great surge of development*) é definido como o processo de instalação e implementação de uma revolução tecnológica e do seu paradigma tecno-econômico associado. Trata-se de propagação da revolução e seu paradigma por toda a economia; processo que promove profundas mudanças estruturais em diversos âmbitos da economia e da sociedade (PEREZ, 2002, 2010). Apesar de ter sido fonte de certa inspiração, Perez (1985, 2010) ressalta que esse conceito representa uma ruptura ao conceito de “ondas longas” de Schumpeter (1997) e Kondratieff (1935), isto é: enquanto estes últimos se detiveram em explicar as subidas e descidas do crescimento econômico e de outras variáveis agregadas, o conceito de grandes surtos se volta para a explicação de como as revoluções tecnológicas evoluem e se difundem e quais são seus impactos transformadores na economia e sociedade. Os grandes surtos referem-se a um fenômeno sistêmico, no qual fatores sociais e institucionais desempenham importantes papéis (PEREZ, 2002).

O fenômeno da mudança tecnológica é cíclico, com revoluções tecnológicas, paradigmas tecno-econômicos e grandes surtos de desenvolvimento sucessivos. Independente de quão poderoso é um paradigma tecno-econômico, seu potencial eventualmente será exaurido (PEREZ, 2002). O grande surto de desenvolvimento, o ciclo de vida das revoluções tecnológicas e seus paradigmas, segue a trajetória de uma curva logística, ao longo de mais ou menos meio século, com uma fase de rápido e pronunciado crescimento e uma fase de maturidade e estagnação (PEREZ, 2001).

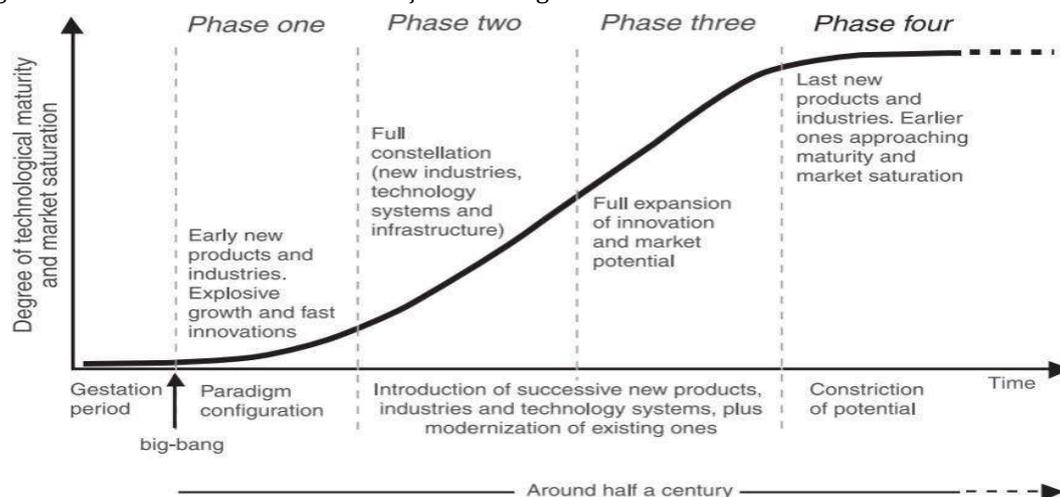
Quando se aproxima da fronteira de melhores práticas e as aplicações potenciais foram, em grande parte, aproveitadas, o processo de propagação do paradigma tecno-econômico se enfraquece, e as forças subjacentes ao surto de desenvolvimento mínguem (PEREZ, 1985). Nesse ponto, os limites do crescimento, a queda nos lucros, e o menor aumento na produtividade afetam, gradualmente, um setor atrás do outro. O processo de descoberta e redescoberta de novos elementos tecnológicos, contudo, dá início a um processo de abandono do

modelo exaurido e de propagação inicial de um modelo emergente (PEREZ, 1985). Em outras palavras:

When the potential of a paradigm begins to reach limits, when the space opened by a paradigm becomes constricted, productivity, growth and profits are seriously threatened. Thus the need and the effective demand appear for new solutions, for radical innovations, for stepping out of the well-trodden paths (PEREZ, 2002, p. 30).

Na Figura 2, apresenta-se uma versão estilizada, em quatro fases, do ciclo de vida de uma revolução tecnológica. A Fase 1, com início no *big-bang*, constitui um período de crescimento explosivo e rápidas inovações nas novas indústrias, revelando os princípios que definem o “senso comum” e guiam a propagação da revolução tecnológica; a Fase 2 é marcada por uma rápida difusão, dando origem a novas indústrias, sistemas tecnológicos e infraestruturas; a Fase 3 é marcada pelo rápido crescimento, alimentado pela implementação completa do paradigma por toda a estrutura produtiva; e a Fase 4 ocorre quando a revolução tecnológica chega a sua maturidade, e o dinamismo aproxima-se do ponto de exaustão, com a saturação dos mercados e os retornos decrescentes da inovação tecnológica.

Figura 2 – Ciclo de vida de uma revolução tecnológica



Fonte: Perez (2002).

Essas fases podem ser, ainda, classificadas em dois períodos, de mais ou menos trinta anos cada um: o primeiro, denominado período de instalação, marca a irrupção de novas tecnologias em uma economia em fase de maturidade, desestabilizando o antigo e difundindo formas novas, e superiores, de “se fazer as coisas”; o segundo, caracterizado como período de implementação, marca a renovação e reformulação de toda a economia através do poder modernizador do novo paradigma, possibilitando o aproveitamento do potencial máximo de geração de riqueza. Entre esses períodos, observa-se um “*turning point*”, no qual são

realizadas as mudanças regulatórias, necessárias para facilitar e moldar o período de implementação posterior – fortemente influenciado pela política, pela ideologia e pelo jogo de poderes –, possibilitando uma “era de ouro” e o completo aproveitamento do potencial da revolução tecnológica (PEREZ, 2002).

Entretanto, a trajetória de uma revolução tecnológica não é tão suave e contínua como na sua versão estilizada apresentada na Figura 2. O período de instalação de um novo paradigma é marcado por uma batalha contra o poder enraizado na estrutura produtiva, no ambiente socio-cultural e nas instituições, sendo esse embate, eventualmente, vencido pelo novo paradigma que, então, se difunde por toda a economia (PEREZ, 2002). É esse complexo processo de propagação de uma revolução tecnológica pela economia e sociedade, segundo Perez (2002), que torna o desenvolvimento um processo descontínuo.

## 1.2. Moving target e janelas de oportunidade

Ao longo da história, países que realizaram esforços com vistas a promover o desenvolvimento econômico apresentaram os mais variados graus de sucesso: desde os bem sucedidos, como Japão e Coreia do Sul, até os menos bem-sucedidos, como os países da África e da América do Sul. A razão para essa diferença nos resultados não pode ser explicada pela simples diferença entre políticas específicas e condições particulares de cada país. Em sua essência, essa diferença está conectada com a natureza das “janelas de oportunidades” e com a capacidade, intuitiva ou consciente, de aproveitamento dessas janelas (PEREZ, 2001). Existem diversos exemplos de esforços bem-sucedidos que ilustram a existência de janelas de oportunidade para o desenvolvimento de países atrasados. Por outro lado, *“their scarcity highlights how ‘non-automatic’ and exceptional such processes of effective technological catching up are”* (PEREZ; SOETE, 1988, p. 463). O ponto chave é de que esses importantes exemplos bem-sucedidos não devem ser seguidos como uma “receita de bolo”, mas como lições sobre as dinâmicas específicas que tornaram o desenvolvimento possível (PEREZ, 2001).

Em especial, ressalta-se que as sucessivas e descontínuas revoluções tecnológicas, conforme definidas na subseção anterior, implicam que os países em desenvolvimento se defrontam com uma fronteira tecnológica em constante movimento (*moving target*), que muda de direção mais ou menos a cada meio século (PEREZ, 2001). Sob essa ótica, pode-se afirmar que: *“[...] history is full of examples of how successful overtaking has been primarily based on running in a new direction”* (PEREZ; SOETE, 1988, p. 460).

Ao se analisar a história, devem-se distinguir as singularidades das recorrências, isto é: existem padrões de mudança técnica que se repetem em cada revolução tecnológica, porém cada uma dessas revoluções possui características que as tornam únicas e que não podem fugir da análise (PEREZ, 2001). Identificar



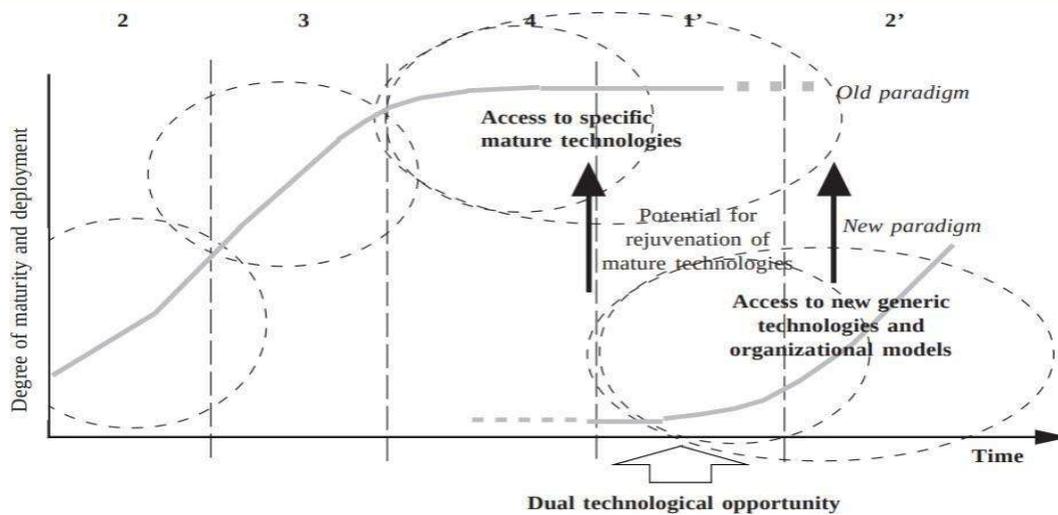
fenômenos recorrentes, entretanto, não é o mesmo que simplificar a história ou cair em alguma espécie de determinismo tecnológico, reduzindo a complexidade e a imprevisibilidade do processo inovativo. Serve, portanto, para atingir dois objetivos relacionados com políticas públicas, crescimento e desenvolvimento:

To help recognize the dynamic and changing nature of capitalism in order to avoid extrapolating any particular period – be it good or bad – as ‘the end of history’ or as the final crisis of capitalism or as the arrival of unstoppable progress or as any ‘new’ and permanent nature of the system, from then on. [...] To help see ahead to the next phase of the sequence, in order to design timely actions to make the best of the impending opportunities (PEREZ, 2002, p. 7).

Novas oportunidades de desenvolvimento surgem e se modificam com as sucessivas revoluções tecnológicas. A transição entre paradigmas tecno-econômicos representa um período no qual torna-se possível uma reestruturação da posição relativa dos países, em que: por um lado, abrem-se possibilidades para que países tomem a liderança (*forging ahead*) ou se emparelhem (*catching up*) com os países avançados, na trajetória do desenvolvimento; por outro, esse período é acompanhado da possibilidade de que países que não se engajarem na dinâmica da revolução emergente acabem ficando para trás (*falling behind*) (PEREZ, 2002). Engajar-se na nova dinâmica pode permitir que países em desenvolvimento reduzam o hiato tecnológico e econômico com relação aos países desenvolvidos, ao mesmo tempo em que permite que países já desenvolvidos permaneçam na liderança e não fiquem para trás.

Mais precisamente, ao longo do período de transição entre dois paradigmas, enquanto as tecnologias maduras e emergentes coexistem, ocorre a abertura de duas oportunidades tecnológicas simultâneas, nas quais as barreiras à entrada com as quais se defrontam os países atrasados são menores e, por isso, superáveis: uma no acesso a tecnologias maduras específicas, relacionadas ao paradigma antigo; e outra no acesso a novas tecnologias genéricas e novos modelos organizacionais, relacionados ao novo paradigma, conforme retratado na Figura 3.

Figura 3 – Janelas de oportunidades duais em momentos de transição entre paradigmas



Fonte: Perez (2001).

A primeira oportunidade está relacionada ao fato de que, devido a alta rotinização dos processos de produção, os requisitos de *know-how*, experiência administrativa e qualificação da força de trabalho são baixos; por outro lado, ironicamente, a entrada nesta fase implica significativos investimentos em unidades produtivas e aquisição de tecnologia, o que constitui um importante obstáculo para os países em desenvolvimento (PEREZ, 2001). Essa é uma estratégia relativamente mais segura; contudo, essa segurança tem duração comprometida pela emergência de uma nova tecnologia, superior e substituta à tecnologia madura (PEREZ; SOETE, 1988).

Perez (2001) argumenta que é muito improvável realizar, de maneira bem-sucedida, o *catch-up*, em termos de desenvolvimento, baseado em tecnologias maduras, já que estas tecnologias possuem reduzido potencial para geração de lucros, poucas oportunidades para aumento de produtividade e mercado estagnado. Escolher as tecnologias maduras como ponto de entrada para o processo de desenvolvimento implica um claro risco de ficar preso a um padrão de desenvolvimento de baixos salários e crescimento (PEREZ; SOETE, 1988). Nesse sentido, podem possibilitar crescimento por algum tempo, porém têm suas oportunidades de inovação, em grande medida, esgotadas e, por isso, apresentam baixo dinamismo.

A segunda oportunidade, por sua vez, está relacionada a fatores como: a produção não é capital intensiva; os requisitos de *know-how* e experiência são baixos; o conhecimento científico tende a estar em domínio público (por exemplo, nas universidades); e muitas das habilidades relacionadas às novas tecnologias precisam, ainda, ser elaboradas na prática (PEREZ; SOETE, 1988; PEREZ, 2001). As vantagens de entrar cedo em uma nova indústria inclui menores barreiras de direitos de propriedade intelectual e a ausência de líderes de mercado

estabelecidos (LEE; MATHEWS, 2015). A teoria dos retornos crescentes chama atenção para o *timing* no fomento das iniciativas de pesquisa em novas indústrias, argumentando que faz pouco sentido a entrada em mercado próximo do *lock-in*, no qual há poucas chances de sucesso (ARTHUR, 1990), devendo-se agir e buscar por soluções antes que escolhas tecnológicas fiquem aprisionadas em determinadas trajetórias.

Enquanto nas fases iniciais de uma nova revolução tecnológica a apropriabilidade da inovação é menor e o conhecimento científico está publicamente acessível, com o desenvolver do paradigma essas condições mudam e o conhecimento e as habilidades gerados ganham cada vez mais de caráter privado e não são comercializados entre concorrentes (PEREZ; SOETE, 1988), o que significa que a entrada de novos participantes no mercado é, progressivamente, dificultada. O tempo é uma variável importante, e sua irreversibilidade implica que países que não participem ativamente nos estágios iniciais de uma revolução tecnológica podem ficar excluídos dos estágios de rápido crescimento. Para que seja determinante para o desenvolvimento, a entrada na dinâmica da nova revolução tecnológica deve ocorrer no momento inicial – ou, no mínimo, o quanto mais cedo possível.

Argumenta-se que esta oportunidade proporciona maiores benefícios – por exemplo, alto potencial de lucro, amplo espaço para crescimento do mercado e da produtividade e, até investimentos em P&D menores do que os do inovador original – através de tecnologias genéricas e modelos organizacionais que podem ser aplicados na revitalização de indústrias maduras (PEREZ, 2001). As “janelas de oportunidade” para o desenvolvimento de mudanças de paradigmas referem-se: “*A paradigm shift opens the necessary windows of opportunity for forging ahead and catching up, while the front-runners are also learning*” (PEREZ, 2002, p. 21). A entrada nos estágios iniciais de uma revolução é envolta de incerteza e não há garantias de sucesso; ao contrário, essa estratégia requer fluxos de investimentos e esforços tecnológicos orientados à geração de conhecimentos científicos, à medida que os concorrentes avançam nas novas trajetórias (PEREZ; SOETE, 1988).

As revoluções tecnológicas, envolvendo descontinuidades e mudanças drásticas na direção do progresso tecnológico, se tornam janelas de oportunidade temporárias, através das quais os países em desenvolvimento podem “saltar”, de maneira a promover a revitalização da maior parte das indústrias ao custo de abandonar o “senso comum” com relação às melhores práticas (PEREZ, 2001). Dentre as mudanças drásticas requeridas pelas revoluções, têm-se as mudanças nos padrões de investimento, nos modelos organizacionais, nos mapas mentais dos agentes e nas instituições que regulam os processos sociais e econômicos (PEREZ, 2002). Mais ainda, podem envolver progresso em direções totalmente novas: o aprendizado do novo pode requerer o desaprendizado do velho, a acumulação



pode requerer desaccumulação, a capacidade instalada pode precisar vir a ser desinstalada, e o crescimento em determinados caminhos pode levar a becos sem saída (PEREZ, 2002).

Para os “recém-chegados” (*newcomers*), essas mudanças podem representar certa vantagem, que pode, ainda, ser reforçada por iniciativas realizadas em tempo. Países que não tenham tido sucesso com o paradigma anterior, podem redirecionar seus esforços de aprendizado relacionados às novas tecnologias, enquanto os países líderes precisam antes “desaprender” o velho para, então, adotar o novo (PEREZ, 2001). Nesse sentido, existem razões para se esperar que uma nova tecnologia se difunda mais lentamente em lugares onde há pesados investimentos em tecnologias maduras, elevada experiência em fazer as coisas “do jeito antigo” e contínuos esforços de pesquisa em melhorias destas tecnologias (aumentando a sua vida econômica e retardando a adoção do novo) (PEREZ; SOETE, 1988).

Tal ocorrência pode significar que a nova tecnologia se difunda mais rápido em outros lugares, onde haja menor comprometimento em termos de investimento, produção e habilidades relacionadas com as tecnologias antigas (PEREZ; SOETE, 1988). O acúmulo de grandes vantagens em tecnologias antigas e suplantadas implica crescentes custos de se desprender das experiências e externalidades do tipo “errado” e explica: “*why these periods of paradigm change have historically allowed some countries to catch up and even surpass the previous leaders* (PEREZ; SOETE, 1988, p. 477). Para os países em desenvolvimento existe a vantagem de não estarem significativamente *locked-in* em uma tecnologia existente, de produtividade alta e lucratividade certa, mas que se opõe ao novo (LEE; MATHEWS, 2015).

O rápido crescimento necessário para quebrar o círculo vicioso da condição de subdesenvolvimento deve estar baseado no dinamismo de novas tecnologias inter-relacionadas, na capacidade de realizar sucessivas melhorias num conjunto grande de tecnologias e na geração de externalidades para um conjunto de atividades relacionadas: “*So early entry into new technology systems is the crucial ingredient for the process of catching up*” (PEREZ; SOETE, 1988, p. 477). O aproveitamento das oportunidades de realizar o *catching up* tecnológico, entretanto, depende de diversos custos de entrada:

Locational and infrastructural advantages do not fall from heaven, nor does a particular country's endowment in scientific and technical personnel and skills. They result from the previous history of development, plus natural resources, and social, cultural and political factors. And, depending on the nature of the new paradigm, these can be excellent, very good, bad or hopelessly inadequate in any particular country. Further- more, taking advantage of new opportunities and favourable conditions requires the capacity to recognise them, the competence and



imagination to design an adequate strategy, and the social condition and political will to carry it through. [...] (PEREZ; SOETE, 1988, p. 477-478).

Por sua vez, a perspectiva de janelas de oportunidades possui importantes implicações:

The formulation of successful strategies therefore calls for a careful evaluation of the conditions and accumulated capacities of the country, region, enterprise or network in question, in order to take advantage of the next window of opportunity (not the window which is already closing), while at the same time recognizing, adopting and adapting the potential and features of the relevant paradigm (PEREZ, 2001, p. 124).

Ressalta-se o argumento de Perez (2001) por uma reformulação das políticas de ciência e tecnologia, onde o componente tecnológico passa a ser visto como central para as políticas de desenvolvimento. De acordo com a hipótese de grandes surtos, num momento de transição, a estratégia de desenvolvimento deve estar voltada para o enfrentamento de desafios e aproveitamento de oportunidades atuais, e não do passado. Entretanto, os países desenvolvidos podem ficar presos às políticas antiquadas, por conta da inércia criada pelos sucessos destas políticas no passado; os países em desenvolvimento, por sua vez, podem igualmente perder as oportunidades abertas pela transição, por conta da inércia criada pelos fracassos do passado (PEREZ, 1985). Novas áreas de conhecimento “*would have to be institutionally addressed and placed at the core, not at the side, of development thinking*” (PEREZ, 1985, p. 15).

Em especial, argumenta-se que o debate “mercado *versus* Estado” não é adequado para lidar com o aproveitamento das janelas de oportunidade, e que um Estado “forte” é necessário para lidar com a magnitude e complexidade do processo: “*The central national State can exercise its leadership by inducing the convergent actions of the various social actors towards a commonly agreed general direction of change*” (PEREZ, 2001, p. 126). Ressalta-se, assim, o papel do Estado na criação e no aumento das vantagens relativas e na superação das desvantagens, através de uma reavaliação das possibilidades reais e da construção de políticas adequadas (PEREZ, 1985). Nesse contexto, destaque deve ser dado às políticas de inovação *mission-oriented* e ao “Estado Empreendedor” (MAZZUCATO, 2014).

## 2. Energias renováveis como uma janela de oportunidade

Perez (2013a) argumenta que é importante antecipar as mudanças e identificar tendências promissoras, ainda que atualmente fracas, e, assim, estudá-las logo que surjam. Ainda segundo Perez (2013a), a economia e o meio ambiente necessitam de inovações verdes, pois, além de existir potencial tecnológico, existem inúmeras oportunidades para melhorar a qualidade de vida da camada mais pobre da sociedade de maneira “amigável” ao meio ambiente, inclusive



através de inovações relacionadas às energias renováveis. Além disso, conforme argumentam Mazzucato e Perez (2015), o crescimento verde, dentro do qual se inserem as energias renováveis, pode se tornar a próxima grande oportunidade tecnológica e de mercado. Para Busch *et al.* (2018), as tecnologias relacionadas às energias renováveis, enquanto investimento em infraestrutura, são oportunidades para o crescimento e possuem alto potencial gerador de benefícios econômicos e sociais.

A estrutura analítica das revoluções tecnológicas, dos paradigmas tecno-econômicos e dos grandes surtos de desenvolvimento mostra-se útil para avaliar esses casos. Cada revolução é constituída de um importante insumo-chave. Frequentemente, surge uma nova fonte de energia (por exemplo, petróleo ou carvão) ou um novo material (por exemplo, plásticos ou aço), como novas tecnologias, que redefinem as indústrias e infraestruturas (PEREZ, 2010), constituindo fatores que exercem seu poder transformador através da sua combinação com um paradigma tecno-econômico adequado (PEREZ, 1985). Cada paradigma é baseado em conjuntos inter-relacionados de inovações tecnológicas, organizacionais e institucionais, que guiam surtos de desenvolvimento – aumentos de produtividade, mudanças estruturais na produção e consumo, crescimento econômico de longo-prazo –, bem como importantes impactos políticos e culturais (PEREZ, 2002).

Ressalta-se, nesse sentido, o papel das tecnologias energéticas nos grandes surtos de desenvolvimento do passado. Enquanto os quatro primeiros surtos foram marcados pela exploração de novas fontes de energia – força hidráulica, no primeiro; energia à vapor baseado em carvão, no segundo; eletricidade, no terceiro; e petróleo e derivados, no quarto (PEREZ, 2002) –, no paradigma das TIC, ao menos não em sua fase de instalação, isso não ocorreu.

Uma explicação possível é a de que o desenvolvimento recente das energias renováveis foi possibilitado pela implementação das TIC, sendo a implementação de uma matriz energética baseada em fontes renováveis vista como um surto secundário do quinto paradigma. Do ciclo antes apresentado, na Figura 2, Perez (2013b, 2016, 2019) argumenta que nos encontramos atualmente no *turning point* do quinto grande surto de desenvolvimento, e que sua implementação completa só será obtida quando o potencial das TIC for combinado com o crescimento verde como direção para profundas inovações, transformando a produção e os estilos de vida e dando início a uma “era de ouro” inevitavelmente global e necessariamente sustentável.

Para tanto, tomando a história como guia, a atuação do Estado e as políticas públicas são cruciais, fazendo-se necessária uma reestruturação institucional, através do estabelecimento de um marco regulatório estritamente ambiental, nos níveis nacional e internacional, e incentivos na direção verde, bem como

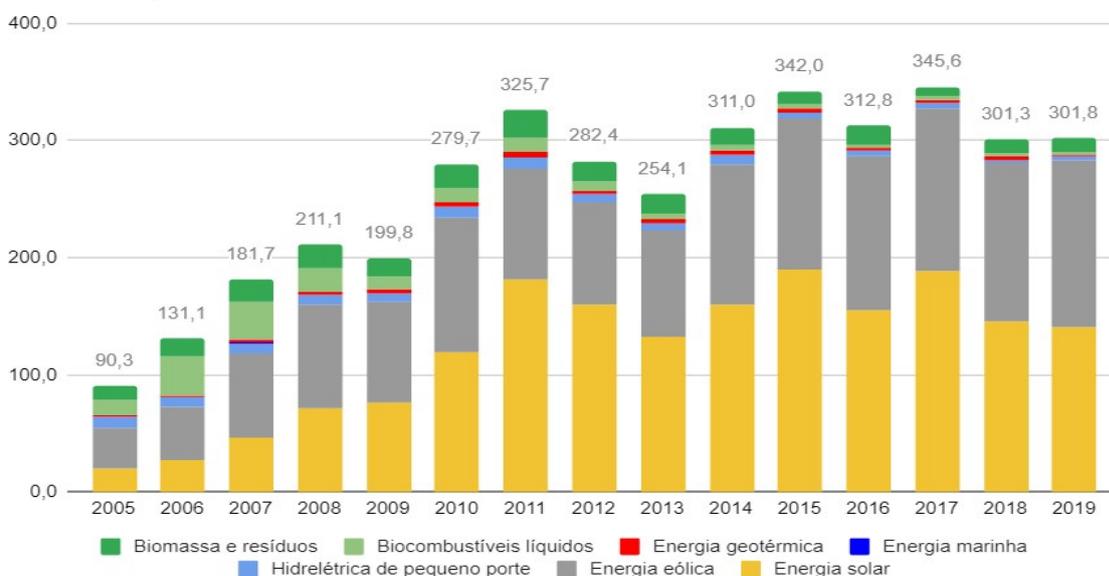
investimento em pesquisa pública e atuação direta e “empreendedora” do Estado (“*tilting the playing field*”), criando mercados e sinergias no âmbito das tecnologias verdes que devem ser implementadas nas próximas décadas, especialmente nas inovações de risco mais elevado (PEREZ, 2013b, 2016).

Em outra explicação, Mathews (2013a, 2013b) utiliza o conceito de paradigma tecno-econômico para argumentar que um emergente sexto paradigma baseado em energias renováveis está em sua fase de gestação – ou nos estágios iniciais de instalação:

The current surge in renewable energy and cleantech investments and capacity additions is real and is having real sociotechno-economic effects – particularly in China where its adoption is most intense. It is the harbinger of a sixth TEP, with REs as driving factor, where we see the new RE-driven TEP emerging from its gestation phase and entering the installation phase, where finance capital is more daring than productive capital (MATHEWS, 2013a, p. 19).

Uma evidência disso pode ser constatada na tendência global de investimentos em energias renováveis na Figura 4. Pode-se observar no gráfico um importante crescimento em termos reais nos níveis anuais de investimentos em energias renováveis. Em 2019 os investimentos foram de US\$ 301,8 bilhões, mais do que o triplo verificado em 2005 (90,3 bilhões, em dólares de 2019). Esse surto foi puxado pelas fontes eólica e solar, responsáveis pela quase totalidade dos investimentos. Por exemplo, essas duas fontes representaram, respectivamente, 47,3% e 46,7% dos investimentos em 2019.

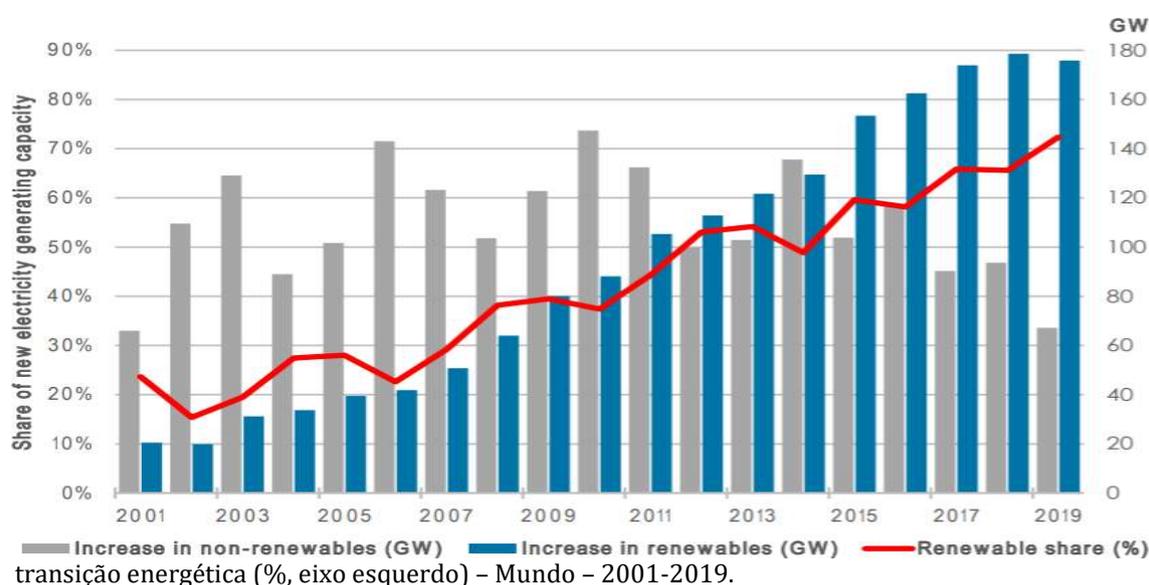
Figura 4 – Tendências globais de investimento em energias renováveis por tecnologia (bilhões de US\$ de 2019) – Mundo – 2005-2019



Fonte: IRENA (2020). Nota: valores deflacionados pela média anual do índice CPI-U.

Outra evidência pode ser vista no crescimento de novas capacidades de geração de energia renovável, particularmente quando comparadas com as novas instalações de fontes fósseis, como expressa a Figura 5. Nela, verifica-se uma clara tendência de aumento da participação das fontes renováveis nas novas instalações de capacidade de geração elétrica nas últimas duas décadas (linha vermelha do gráfico), superando as não-renováveis pela primeira vez em 2012 e representando mais de 70% da capacidade adicionada em 2019, o que indica um processo de transição energética.

Figura 5 – Nova capacidade de geração de eletricidade por tipo (GW, eixo direito) e indicador de



Fonte: IRENA (2020a).

A periodização dos sucessivos paradigmas tecno-econômicos nos coloca num momento de declínio do quinto paradigma, no qual os investimentos em TIC e indústrias de conhecimento, apesar de continuarem crescendo, não se espera que conduzam o mundo para novos níveis de prosperidade; novos insumos-chave são necessários para este fim (MATHEWS, 2018). O argumento central de Mathews (2013a, 2013b) é de que o complexo tecnológico das energias renováveis – capacitado pelas TIC (MATHEWS, 2018) – constitui um conjunto de insumos-chave de um sexto paradigma tecno-econômico. Desse modo, portanto, as energias renováveis podem se tornar um importante componente de geração de riqueza num próximo grande surto de desenvolvimento.

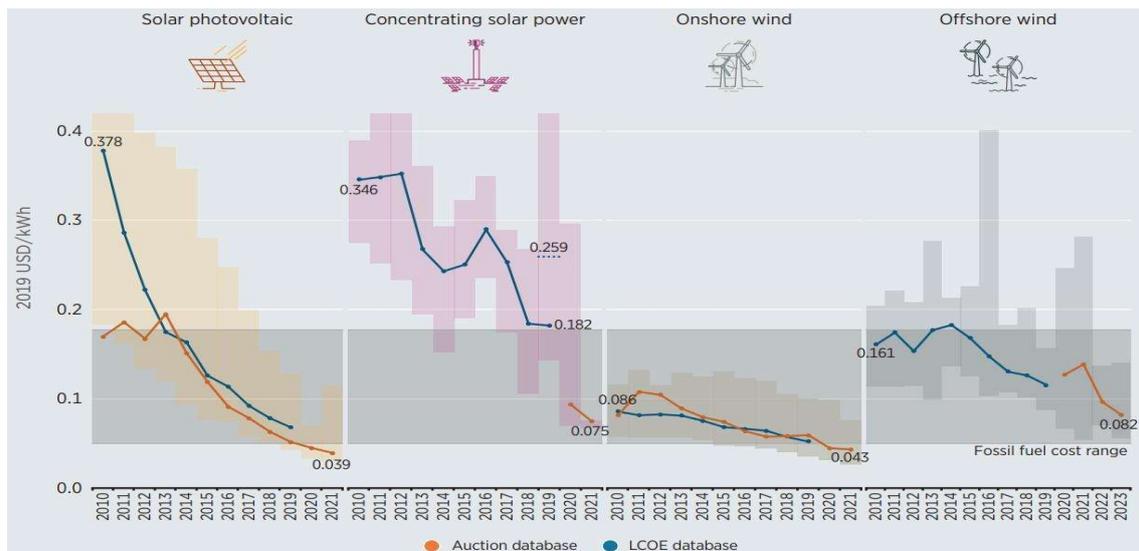
Com relação às características de um insumo-chave (FREEMAN; PEREZ, 1988), argumenta-se que as energias renováveis satisfazem os três critérios

estabelecidos. Em primeiro lugar, pode-se argumentar que a sua oferta, pela própria natureza “renovável” destes tipos de fonte de energia, em especial eólica e solar, é virtualmente ilimitada (MATHEWS, 2018).

Em segundo lugar, apesar de os custos relativos não serem claramente menores em diversas fontes de energias renováveis, custos relativos rapidamente declinantes derivados da curva de aprendizado podem ser verificados nos casos do biocombustível, energia eólica e, sobretudo, energia solar. Por outro lado, os custos relacionados aos combustíveis fósseis e à energia nuclear estão aumentando, tendência que se espera que se mantenha, à medida que os desafios de garantir a oferta aumentam, devido ao estoque limitado dessas fontes, e à demanda por energia que se intensifica (MATHEWS, 2013a, 2013b).

Entende-se que os preços podem influenciar em grande medida a escolha entre diferentes fontes de energia, reforçando a importância dos custos relativos entre elas. Historicamente, muitas das fontes de energia renováveis possuem custos relativos não-competitivos, especialmente por não terem se beneficiado dos retornos crescentes como suas concorrentes sujas (FOXON, 2002) e, conseqüentemente, muitas dessas tecnologias podem estar longe de atingir a maturidade comercial para competir com as alternativas estabelecidas (LEE; MATHEWS, 2015). Contudo, no que concerne os custos relativos na geração de eletricidade, verifica-se na Figura 6, tendência de queda entre 2010 e 2019, sobretudo entre a energia solar fotovoltaica e heliotérmica.

Figura 6 – Custo nivelado de energia elétrica (LCOE) e preço de leilões por tecnologia energia de renovável (US\$/kWh de 2019) – Mundo – 2010–2023



Fonte: IRENA (2020b). Nota: O LCOE de uma determinada tecnologia é a razão entre os custos e a geração de eletricidade, ao longo de toda a vida útil do sistema, descontados em um ano comum usando uma taxa de desconto que reflete o custo médio do capital. Os valores estão em dólares de 2019, e excluem qualquer suporte financeiro. As linhas grossas são o valor médio ponderado global



de LCOE para as plantas comissionadas, ou preços dos leilões, em cada ano. A banda única representa a faixa de custo de geração de energia a partir de combustíveis fósseis, enquanto as bandas de cada tecnologia e ano representam as bandas dos percentis 5 e 95 para projetos renováveis.

Atualmente, as energias geradas a partir de fontes solar fotovoltaica e eólica *onshore* (turbinas instaladas em terra) se encontram na parte inferior da faixa de custo dos combustíveis fósseis, de forma que permite que essas tecnologias concorram frente a frente com os combustíveis fósseis. Nesse quesito, estas fontes atingiram o *grid parity* – ponto em que seu custo nivelado de energia elétrica (LCOE) é igual ou menor que o custo dos combustíveis fósseis. Esse ponto, segundo (MATHEWS, 2013a), pode marcar o fim da fase de gestação e início da fase de instalação, na qual se pode antecipar que uma bolha especulativa conduza um período de investimento industrial sustentado em energia renovável e demais tecnologias limpas. Espera-se, assim, que as sucessivas quedas continuem no curto prazo e até 2030 e além, impulsionadas por melhorias contínuas na tecnologia, custos de fabricação reduzidos, maiores economias de escala, concorrência nas cadeias de suprimentos e pressões competitivas (IRENA, 2020b).

Em terceiro lugar, a aplicabilidade abrangente e o potencial claro na utilização das tecnologias das energias renováveis podem ser observados através do ritmo avançado da geração de oportunidades de negócios, tanto em tecnologias para a produção de energia de fontes renováveis (por exemplo, turbinas eólicas e módulos solares fotovoltaicos) e toda a cadeia de fornecedores envolvidos, quanto em novas áreas como transmissão de energia, transporte e infraestrutura associada (por exemplo, veículos elétricos e sistemas de recarga), edifícios e cidades verdes etc. Nesse sentido, as energias renováveis criam oportunidades, empreendedoras e financeiras, que não podem ser bloqueadas pelos interesses estabelecidos, fazendo parte de estratégias de “crescimento verde” (MATHEWS, 2013a, 2013b).

Por conta da queda nos custos, associada com a curva de experiência na manufatura, os insumos-chave da emergente revolução tecnológica podem ter efeitos generalizados, levando a energia elétrica renovável para mercados cada vez maiores e aumentando a segurança energética. Mathews (2018) identifica como *motive branches* as atividades envolvidas com a produção de dispositivos para geração de energia renovável – por exemplo, turbinas eólicas e módulos solares fotovoltaicos –; dispositivos de armazenamento de energia – e.g. baterias de íon-lítio – e dispositivos de rede elétrica – por exemplo, inversores –; os *carrier branches* que incluem os sistemas de veículos elétricos, também sujeitos à curva de experiência característica das atividades manufatureiras.

Os efeitos da destruição criadora da transição para um sistema energético renovável, segundo Mathews (2018), já podem ser vistos nas indústrias estabelecidas – indústria do carvão, petróleo e gás natural, bem como na indústria automobilística por conta de empresas como a *Tesla*. A transição não é somente a substituição de um produto por outro – por exemplo, energia elétrica gerada pelo carvão por energia elétrica eólica e solar. Trata-se, de fato, da transição de um sistema baseado em combustíveis fósseis por outro baseado em energia renovável, sendo que, como uma transição entre paradigmas tecno-econômicos, deve-se levar em conta não apenas os preços, mas também as tecnologias, a infraestrutura, o financiamento, as instituições, os modelos organizacionais e as políticas públicas (MATHEWS, 2018).

A contínua queda no custo das energias solar fotovoltaica e eólica *onshore*, complementada por declínios no custo de tecnologias de armazenamento de bateria, melhorias nas operações de distribuição e um conjunto emergente de tecnologias de eletrificação nos usos finais, pode fazer com que a geração de eletricidade renovável de baixo custo sustente uma transformação do setor de energia até 2050, descarbonizando o setor elétrico ao mesmo tempo em que aumenta a eletrificação (IRENA, 2019). Combinado com o desenvolvimento das energias renováveis, a eletrificação significa que o impacto das políticas em energias renováveis pode ser sentido em um grande segmento da economia. A porcentagem de eletrificação no total do consumo de energia final foi, em 2018, de apenas 19,4% (IEA, 2020a), o que significa uma grande margem potencial para expansão.

Os princípios organizacionais de um emergente sexto paradigma tecno-econômico envolvem, segundo Mathews (2013a, 2013b): paradigma energético dominante baseado em energias renováveis, a partir de múltiplas fontes; intensidade energética reduzida e eficiência aprimorada (energética e de recursos); aplicação de TI em tecnologia de distribuição de energia elétrica – por exemplo, *smart-grids* –, que são desenhados para acomodar a maior proporção de fontes renováveis na geração de energia e dar maior resiliência às redes; modelo de geração de energia descentralizada, possibilitado por aplicações como *smart-grids*, que podem diminuir o poder dos grandes oligopólios; comércio internacional competitivo de energia elétrica renovável; e financiamento ecologicamente direcionado.

Assim, o emergente sexto paradigma tecno-econômico não conflitua com o quinto, das TICs, sendo visto como uma continuação e realização deste. Contudo, está em fundamental conflito com o ainda estabelecido e obstrutivo quarto paradigma, baseado em combustíveis fósseis e na geração e distribuição centralizada de energia (MATHEWS, 2013a). É este último, bastante estabelecido, que funciona como obstáculo para o firmamento das energias renováveis. Deve-se



ressaltar essa qualificação como importante, pois: “*reinforces the case that the emergent 6th TEP may be recognized in the ‘secondary surge’ at the turn of the 5th TEP [...] and therefore as an extension and continuation of the 5th TEP, not as its opponent*” (MATHEWS, 2013a, p. 19). O interessante nisso, argumenta Mathews (2013a), é que as implicações políticas são, essencialmente, as mesmas, tanto na perspectiva de uma mudança para um sexto paradigma, quanto na perspectiva de um surto secundário no *turning point* do quinto paradigma. Ambas as perspectivas envolvem a direção do processo de inovação na direção verde e demandam políticas de inovação *mission-oriented*.

Para a argumentação sobre janelas de oportunidade, as implicações são também similares. Por um lado, ao colocar as energias renováveis como insumo-chave de um emergente sexto paradigma tecno-econômico, possibilita-se a aplicação direta da argumentação apresentada em Perez e Soete (1988). Por outro lado, ao colocar as energias renováveis como um dos componentes-chave da implementação completa do quinto paradigma na direção verde, a própria Perez (2014, p. 16) afirma: “*The direct leap to [...] alternative energies [...] are instances of technological leapfrogging*” em países em desenvolvimento. Reforçando esse argumento, Perez (2016, p. 201) adiciona que “[...] *the greatest window of opportunity of the present day is the possibility of overcoming the contextual legacy of the previous paradigm; in this case, the environmental degradation and resource scarcity brought about by the age of oil and mass production*”.

Perez (2014, p. 17) utiliza o termo “*paradigm shift*” para esse fenômeno, e afirma que, ao passo que os países desenvolvidos precisam renovar e abandonar velhos hábitos, os países em desenvolvimento se defrontam com a opção de copiar o século XX ou moverem-se diretamente para o século XXI. Desse modo, permite, o entendimento de que esse fenômeno representa uma janela de oportunidade para o *catching up* e *forging ahead*, dado que os países avançados também estão aprendendo.

Schot e Steinmueller (2018) argumentam que tanto o Sul Global quanto o Norte Global estão em posição para experimentar e contribuir para a transição sustentável. Não se devem supor, assim, que as inovações transformadoras surgirão, necessariamente, dos países desenvolvidos, como é tradicional se fazer, nem que o papel dos países em desenvolvimento será o de absorver, passivamente, as tecnologias oriundas dos países avançados (SCHOT; STEINMUELLER, 2018). Ao chamar atenção para a colaboração tecnológica entre Norte-Sul no desenvolvimento e implantação de soluções, Mowery *et al.* (2010) citam China e Índia como importantes parceiros. A liderança da China em investimentos, capacidade instalada, aumento de capacidade, e empresas no *top 10* – especialmente solar, eólica e *smart-grid* – pode ser vista como indicativo de mudança das características do paradigma tecno-econômico nos sistemas

energéticos globais. A China pode ser o primeiro país a estar quebrando o *carbon lock-in*, através da construção de uma indústria de energia renovável doméstica, promovida pela atuação empreendedora do Estado (MATHEWS, 2018).

Apesar da razoabilidade dessa argumentação “otimista”, existem obstáculos importantes, que dificultam o processo de evitar o *carbon lock-in* através do *leapfrogging* tecnológico. Segundo Unruh e Carrillo-Hermosilla (2006), tomando como base evidências de *leapfrogging* no setor de telecomunicações, os investimentos e a rápida adoção das tecnologias em países em desenvolvimento ocorrem somente após décadas de substanciais desenvolvimentos, refinamentos e comercialização em países líderes tecnológicos, que são, em geral, os já desenvolvidos. Seguindo essa linha, Unruh e Carrillo-Hermosilla (2006) argumentam que os países em desenvolvimento dependem, fortemente, de empresas multinacionais e da transferência tecnológica, para construir sua infraestrutura energética e de transporte, isto é, não possuem capacidades para desenvolvimento tecnológico autônomo e permanecem tecnologicamente dependentes.

Esses países estão sujeitos à perpetuação do *carbon lock-in* via: a) capacidades tecnológicas das empresas multinacionais, que são centradas no fornecimento de tecnologias padronizadas baseadas em carbono; b) preferências das organizações financiadoras, especialmente a preferência por projetos com maiores taxas de retorno esperadas – em geral, projetos baseados em carbono – por parte de atores privados; e c) políticas de desenvolvimento do país receptor dos investimentos, que enviesam a escolha por sistemas energéticos baseados em carbono, por serem soluções baratas e comprovadas para lidar com a demanda por energia para uma industrialização rápida. O *carbon lock-in* pode ter, assim, a tendência de se tornar globalizado, no sentido de que os países em desenvolvimento poderiam acabar se tornando “cópias de carbono” dos países industrializados (UNRUH; CARRILLO-HERMOSILLA, 2006).

Nesse contexto, o *carbon lock-in* impõe um grande desafio aos formuladores de políticas, portanto ao Estado, na mobilização de políticas de inovação que promovam transformações desejadas pela sociedade. Tratar de políticas de inovação no setor de energias renováveis necessita levar em conta os desafios de, por um lado, desestabelecer e superar o *carbon lock-in* e, por outro, implementar uma nova matriz energética, ambientalmente amigável e socialmente desejável. Na perspectiva utilizada nesse artigo, qual seja, da teoria neo-schumpeteriana, rejeita-se a ideia de uma trajetória de desenvolvimento ótima, determinada por um mercado perfeito. Pelo contrário, entende-se que a escolha entre trajetórias é, necessariamente, normativa, e um determinado resultado econômico e social desejado pode ser atingido através da criação e formação de mercados (BUSCH *et al.*, 2018).

A indústria verde – dentre as quais, as energias renováveis – encontra-se, ainda, em seus estágios iniciais e é caracterizada por elevada incerteza tecnológica e de mercado, a qual afasta o capital privado e dificulta o desenvolvimento desta indústria, unicamente, através de forças de mercado (MAZZUCATO, 2014). A convergência e articulação de esforços, necessárias para conduzir a sinergias entre fornecedores e mercados, de maneira a aumentar a viabilidade econômica e a lucratividade das tecnologias verdes, podem ser induzidas por meio do estabelecimento de uma clara direção comum: as forças de mercado não são capazes de alcançar esse resultado, mas um Estado ativo é (PEREZ, 2013a). Ressalta-se, portanto, o papel central e empreendedor do Estado na identificação de setores-chave que permitam realizar a transição para um emergente paradigma tecno-econômico de caráter verde, isto é, baseado em energias renováveis, bem como na condução de políticas de inovação *mission-oriented* nesta direção.

### Considerações finais

As revoluções tecnológicas quando acontecem, segundo a concepção teórica analítica neo-schumpeteriana, alteram os sistemas tecnológicos, multiplicando inovações não só nos sistemas centrais, como também irradiam a montante e a jusante, outras inovações, direta e indiretamente, relacionadas. Com isso, são geradas vastas oportunidades lucrativas em diferentes atividades econômicas, impulsionando a economia à expansão e ao crescimento. Nesse curso, cada revolução gera alterações nas tecnologias utilizadas, seja substituindo-as, seja modernizando-as. Ademais, possibilita a reorganização produtiva em segmentos econômicos existentes, bem como o surgimento de novas outras atividades econômicas; provoca mudanças organizacionais expressas nas estruturas, nos métodos e nas formas de gestão das empresas; além de gerar alterações na estrutura institucional da sociedade – regras, leis, normas, comportamento e valores – em linha com o novo padrão estabelecido.

Alinhada à referida abordagem, a revolução tecnológica sustenta-se sobre um determinado paradigma tecno-econômico, o qual exerce grande capacidade transformadora da economia. Esse novo paradigma surge competindo com o existente, em verdadeiro processo de destruição criadora schumpeterina, apresentando vantagens comparativas a ponto de se tornar dominante ao longo do seu desenvolvimento. Esse embate com o velho paradigma segue nos ambientes sociocultural e institucional, sendo vencido pelo novo à medida que solidifica-se de forma competitiva. No período de transição de paradigmas tecno-econômicos, abrem-se possibilidades de mudanças na posição de domínio ou de emparelhamento tecnológico dos países. Alguns países podem permanecer na liderança – *forging ahead* – e não ficarem, portanto, para trás, bem como, outros países, ao realizarem esforços domésticos, podem se emparelhar – *catching up* – aos que estão na fronteira, no desenvolvimento tecnológico.



Neste artigo, explorou-se o argumento de que as energias renováveis – aliadas às TICs – podem ser entendidas como um conjunto de insumos-chave de um emergente paradigma tecno-econômico, que conta com custos relativos rapidamente declinantes, oferta virtualmente ilimitada e aplicabilidade econômica abrangente. Abre-se, assim, a possibilidade de diferentes países aproveitarem o surto de desenvolvimento que as energias renováveis têm potencial de gerar, diante do fato de os países avançados estarem, também, em fase de aprendizagem. Adicionam-se, ainda, fatores como a apropriabilidade tecnológica baixa, ausência de propriedade intelectual, inexistência de líderes do mercado e o fato de que os países em desenvolvimento não estarem presos às políticas de promoção do paradigma anterior. No caso específico das energias renováveis, soma-se ainda a percepção de que o *carbon lock-in* pode ser menos restritivo em países em desenvolvimento. Tirar proveito dessa janela de oportunidade, contudo, não se constitui tarefa fácil, sobretudo em face de existirem barreiras a serem superadas – notadamente por conta da dependência tecnológica que os países em desenvolvimento possuem em relação aos países avançados, fazendo com que *carbon lock-in* tenha tendência de se tornar globalizado.

Nesse sentido, o aproveitamento das janelas de oportunidade pelos países em desenvolvimento, depende de iniciativas e ações direcionadas, principalmente por parte do Estado, desde o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas com as fontes renováveis de energia, até o desestabelecimento do *lock-in* das indústrias intensivas em carbono. Ressalta-se, assim, o papel estatal na identificação de setores-chave, que permitam realizar a transição para um emergente paradigma tecno-econômico de caráter verde, bem como na condução de políticas de inovação nessa direção. Se, por um lado, os esforços tecnológicos para a transição em direção de um paradigma baseado em energias renováveis envolvem maiores incertezas, tecnológicas e de mercado, por outro, têm potencial de permitir o *catch-up* e, até mesmo, o *forge ahead*, nos países em desenvolvimento. Nesse período inicial de experimentação, é muito importante a participação do Estado através de políticas de inovação visando capturar as oportunidades que se encontram em aberto.

Nesse curso, políticas de inovação devem ser desenhadas para acelerar esse processo; mais estudos, teóricos e empíricos, podem ser realizados para aprofundar o conhecimento neste ponto. Do lado teórico, podem-se explorar, em maiores detalhes, as características que as políticas de inovação devem possuir para promover, de forma bem-sucedida, a transição para um paradigma tecno-econômico baseado em fontes renováveis de energia, enfatizando tanto o desenvolvimento e a difusão de novas tecnologias quanto a superação da inércia institucional e a oposição de interesses estabelecidos. Do lado empírico, entende-se que o exame minucioso de experiências de políticas de inovação no âmbito das energias renováveis, pode resultar em importantes *insights*. Em especial, estudar



casos específicos de países em desenvolvimento – por exemplo, a China e a Índia são países em desenvolvimento que atualmente se destacam no setor –, em termos de desenho, condução e resultados de políticas de inovação, pode ser importante caminho para discutir as questões relacionadas à janela de oportunidade aberta pela revolução tecnológica das energias renováveis e seu aproveitamento.

### Referências

Allianz Global Investors. The sixth Kondratieff – long waves of prosperity. **Allianz Global Investors**, Frankfurt, 2010.

ARTHUR, W. B. Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. **The economic journal**, JSTOR, v. 99, n. 394, p. 116–131, 1989.

ARTHUR, W. B. Positive feedbacks in the economy. **Scientific American**, JSTOR, v. 262, n. 2, p. 92–99, 1990.

BOWEN, A.; HEPBURN, C. Green growth: an assessment. **Oxford Review of Economic Policy**, Oxford University Press UK, v. 30, n. 3, p. 407–422, 2014.

BUSCH, J.; FOXON, T. J.; TAYLOR, P. G. Designing industrial strategy for a low carbon transformation. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, Elsevier, v. 29, p. 114–125, 2018.

COADY, D.; PARRY, I.; LE, N.-P.; SHANG, B. *et al.* Global fossil fuel subsidies remain large: an update based on country-level estimates. **IMF Working Papers**, International Monetary Fund, v. 19, n. 89, p. 39, 2019.

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

DOSI, G. Sources, procedures, and microeconomic effects of innovation. **Journal of economic literature**, JSTOR, p. 1120–1171, 1988.

FAGERBERG, J. Mobilizing innovation for sustainability transitions: a comment on transformative innovation policy. **Research Policy**, Elsevier, v. 47, n. 9, p. 1568–1576, 2018.

FOXON, T. J. Technological and institutional ‘lock-in’ as a barrier to sustainable innovation. **Imperial College Centre for Policy and Technology Working Paper**, 2002.



FREEMAN, Christopher; PEREZ, Carlota. Structural crises of adjustment: business cycles. In: DOSI, G.; FREEMAN, C.; NELSON, R.; SILVERBERG, G.; SOETE, L. (Ed.). **Technical change and economic theory**. Pinter, London, p. 38–66, 1988.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=P13&uf=00>>. Acesso em: 09 jul. 2020.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**. International Energy Agency, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/>>. Acesso em: 02 mar. 2020.

IEA– INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy subsidies**. International Energy Agency, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/energy-subsidies/>>. Acesso em: 02 mar. 2020.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable power generation costs in 2018. **International Renewable Energy Agency**, 2019.

IRENA– INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Data and Statistics**. International Renewable Energy Agency, 2020. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

IRENA– INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable capacity highlights: 31 march 2020. **International Renewable Energy Agency**, 2020.

IRENA– INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable power generation costs in 2019. **International Renewable Energy Agency**, 2020.

KEMP, R.; NEVER, B. Green transition, industrial policy, and economic development. **Oxford Review of Economic Policy**, Oxford University Press UK, v. 33, n. 1, p. 66–84, 2017.

KONDRATIEFF, N. D. The long waves in economic life. **The Review of Economics and Statistics**, JSTOR, v. 17, n. 6, p. 105–115, 1935.

LEE, K.; MATHEWS, J. A. Toward new rules for science and technology policy for sustainable development. In: A., A. J.; OCAMPO, J. A. (Ed.). **Global governance and**



**rules for the post-2015 era: addressing emerging issues in the global environment.** London: Bloomsbury Publishing, 2015. p. 107–137.

MATHEWS, J. A. The renewable energies technology surge: A new techno-economic paradigm in the making? **Futures**, Elsevier, v. 46, p. 10–22, 2013.

MATHEWS, J. A. The sixth technoeconomic paradigm. In: **35th DRUID Celebration Conference**. Barcelona: DRUID, 2013. v. 19.

MATHEWS, J. A. Schumpeter in the twenty-first century: creative destruction and the global green shift. In: BURLAMAQUI, L.; KATTEL, R. (Ed.). **Schumpeter's Capitalism, Socialism and Democracy: A Twenty-First Century Agenda**. London: Routledge, 2018. p. 233–254.

MATHEWS, J. A.; REINERT, E. S. Renewables, manufacturing and green growth: energy strategies based on capturing increasing returns. **Futures**, Elsevier, v. 61, p. 13–22, 2014.

MAZZUCATO, M. **O Estado Empreendedor: desmascarando o mito do setor público vs. setor privado**. São Paulo: Portfolio-Penguin, 2014.

MAZZUCATO, M.; PENNA, C. C. R. **The brazilian innovation system: a mission-oriented policy proposal**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2016.

MAZZUCATO, M.; PEREZ, C. Innovation as growth policy: the challenge for europe. In: FAGERBERG, J.; LAESTADIUS, S.; MARTIN, B. R. (Ed.). **The triple challenge for Europe: Economic development, climate change, and governance**. Oxford: Oxford University Press, 2015. p. 229–264.

MOWERY, D. C.; NELSON, R. R.; MARTIN, B. R. Technology policy and global warming: why new policy models are needed (or why putting new wine in old bottles won't work). **Research Policy**, Elsevier, v. 39, n. 8, p. 1011–1023, 2010.

PEGELS, A.; LÜTKENHORST, W. Is Germany's energy transition a case of successful green industrial policy? Contrasting wind and solar PV. **Energy Policy**, Elsevier, v. 74, p. 522–534, 2014.

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. Technological change and opportunities for development as a moving target. *CEPAL Review*, v. 75, p. 109–130, 2001.

PEREZ, C. **Technological revolutions and financial capital: the dynamics of bubbles and golden ages**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002.

PEREZ, C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge journal of economics*, Oxford University Press, v. 34, n. 1, p. 185–202, 2010.

PEREZ, C. Innovation systems and policy for development in a changing world. In: FAGERBERG, J.; MARTIN, B. R.; ANDERSEN, E. S. (Ed.). **Innovation studies: evolution and future challenges**. Oxford: Oxford University Press, 2013. p. 90–110.

PEREZ, C. Unleashing a golden age after the financial collapse: Drawing lessons from history. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Elsevier, v. 6, p. 9–23, 2013.

PEREZ, C. **A green and socially equitable direction for the ICT paradigm**. Globelics – Global Network for Economics of Learning, Innovation, and Competence Building Systems, 2014.

PEREZ, C. Capitalism, technology and a green global golden age: the role of history in helping to shape the future. In: JACOBS, M.; MAZZUCATO, M. (Ed.). **Rethinking Capitalism: Economics and Policy for Sustainable and Inclusive Growth**. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2016.

PEREZ, C. Transitioning to smart green growth: lessons from history. In: FOUQUET, R. (Ed.). **Handbook on Green Growth**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2019. p. 447–463.

PEREZ, C.; SOETE, L. Catching up in technology: entry barriers and windows. In: DOSI, G.; FREEMAN, C.; NELSON, R.; SILVERBERG, G.; SOETE, L. (Ed.). **Technical change and economic theory**. London: Pinter, 1988. p. 458–479.

SCHOT, J.; STEINMUELLER, W. E. Three frames for innovation policy: R&d, systems of innovation and transformative change. *Research Policy*, Elsevier, v. 47, n. 9, p. 1554–1567, 2018.

SCHUMPETER, J. A. **Teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico**. São Paulo: Editora Nova Cultural, 1997.

STERN, N. **Why are we waiting?: the logic, urgency, and promise of tackling climate change**. Cambridge: MIT Press, 2015

UNRUH, G. C. Understanding carbon lock-in. **Energy policy**, Elsevier, v. 28, n. 12, p. 817–830, 2000.

UNRUH, G. C. Escaping carbon lock-in. **Energy policy**, Elsevier, v. 30, n. 4, p. 317–325, 2002.

UNRUH, G. C.; CARRILLO-HERMOSILLA, J. Globalizing carbon lock-in. **Energy Policy**, Elsevier, v. 34, n. 10, p. 1185–1197, 2006.

WORLD BANK. **Fossil fuel energy consumption (% of total)**. World Bank, 2019. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.FO.ZS>>. Acesso em: 21 nov. 2019.