

## **A inovação como fenômeno termodinâmico**

**Laercio Marzagão**

### **Resumo**

Há duas vertentes na história das teorias do desenvolvimento econômico. A primeira reúne as metáforas da biologia e a segunda as metáforas da física ou da mecânica. A teoria econômica predominante é considerada uma metáfora da mecânica. Este artigo investiga a inovação tecnológica – ou as mudanças estruturais na economia e tecnologia - como um fenômeno termodinâmico emergente em um sistema tecnoeconômico, aberto e fora de equilíbrio. O modelo proposto, ao tornar visíveis os mecanismos que regem as mudanças estruturais na economia e tecnologia, se pode ser bom instrumento para orientar a formulação de políticas de industrialização e de inovação. Além disso, pelas mesmas razões, representa um instrumento adequado para a construção de uma história da tecnologia.

### **Palavras-chave**

História da Ciência e da Tecnologia; Sistemas Complexos; Mudança Econômica Estrutural; Termodinâmica de Não Equilíbrio; Lei dos Rendimentos Crescentes.

### **Abstract**

There are two classes of theories of economic development. The first brings together the metaphors of biology and the second, the metaphors of physics and mechanics. Prevailing economics is regarded as a metaphor of mechanics. This article investigates technological innovation – or structural changes in the economy and technology – as an emergent thermodynamic phenomenon in an open and out-of-equilibrium techno-economic system. The proposed model, by making visible the mechanisms that govern structural changes in the economy and technology, can be a good instrument to guide the formulation of industrialization and innovation policies. Furthermore, for the same reasons, it represents a suitable instrument for constructing a history of technology.

### **Keywords**

History of Science and Technology; Complex Systems; Structural Economic Change; Non-Equilibrium Thermodynamics; Law of Increasing Returns.

## Introdução

Em meados da década de 1950, os economistas Robert Solow (1924-) e Moses Abramovitz (1912-2000) descobriram, comparando resultados empíricos com previsões teóricas, que a economia neoclássica era capaz de responder por cerca de apenas 15% do crescimento alcançado pelos Estados Unidos. Estados há mais de meio século. Abramovitz classificou essa lacuna entre teoria e prática como “do tamanho de nossa ignorância”.

A metáfora como método de construção de modelos e teorias é objeto de discussão neste texto. Erwin Fisher (1867-1947), economista norte-americano que como coorientador em sua tese de doutorado em economia o físico norte-americano Josiah Willard Gibbs (1839-1903), mapeia,<sup>1</sup> provavelmente por influência de Gibbs<sup>2</sup>, as equivalências formais entre grandezas da física newtoniana e da teoria econômica.<sup>3</sup>

Os economistas Erik Reinert (1949 -) e Jomo Kwame Sundaram (1952-)<sup>4</sup> estabelecem em 2005 uma taxonomia das teorias da evolução do pensamento sobre o crescimento econômico. Classificam as teorias em dois grupos: no primeiro, estão as metáforas da biologia (as teorias que tomam como base o corpo humano e a teoria da evolução das espécies); no segundo, estão as metáforas da física, que interpretam os processos econômicos como fenômenos regulados por uma mão invisível, tal qual o movimento dos planetas de Laplace (1749-1825).<sup>5</sup>

Este artigo explora inicialmente este poder da metáfora para elaborar uma crítica à teoria econômica do crescimento. A ideia de que a teoria econômica é uma metáfora da mecânica vem sendo discutida desde o final do século XIX por economistas como Fisher (1867-1947), Schumpeter (1883-1950), Veblen (1857-1929) e, mais recentemente, por Reinert (1949-) e Jomo (1952-). Este artigo, a partir dessa consideração, investiga o poder e as limitações da economia como reflexos do poder e das limitações da mecânica. As dificuldades da teoria econômica prevalente de compreender o crescimento econômico reside na sua condição de ser uma metáfora da mecânica newtoniana.

O papel do Estado, da tecnologia e do ambiente são investigados nas histórias de revoluções industriais do século XIX e também do século XX. Os conceitos de *tecnologia* e de *ambiente* são debatidos.

---

<sup>1</sup> Gibbs é um dos fundadores da mecânica estatística.

<sup>2</sup> Philip Mirowski. *More Heat than Light: Economics as Social Physics, Physics as Nature's Economic* (Cambridge: Cambridge University Press, 1989), 223.

<sup>3</sup> Idem, 9.

<sup>4</sup> Jomo K. Sundaram & Erik S. Reinert *Origens do Desenvolvimento Econômico* (São Paulo: Globo Editora, s.d.), 12.

<sup>5</sup> Pierre Simon de Laplace foi um matemático francês. Em sua obra *Mechanique Celeste* busca uma solução completa para o problema mecânico apresentado pelo Sistema Solar e fazer com que a teoria coincida tanto com a observação que equações empíricas não mais encontrem lugar em tabelas astronômicas.

Com o objetivo de desenvolver uma proposta para um modelo de desenvolvimento tecnoeconômico este artigo considera que a transformação, e não o equilíbrio, deve ser o fundamento teórico deste modelo.

As transformações estruturais na natureza são reguladas pelo segundo princípio da termodinâmica, que é uma lei assimétrica que produz desequilíbrio e gera entropia. Segundo Prigogine (1917-2003), é devido à natureza assimétrica e irreversível dessa lei, que fenômenos emergentes e imprevisíveis podem ocorrer em sistemas abertos que se encontram deslocados do equilíbrio. Prigogine chamou esses fenômenos de estruturas dissipativas.

Por outro lado, as transformações econômicas estruturais são regidas pela lei dos retornos econômicos crescentes. Esta lei, que também é assimétrica, produz desequilíbrios e riqueza. Na construção do modelo de inovação proposto, os conceitos de tecnologia, mudança tecnológica e economia são emprestados dos trabalhos do economista Brian Arthur (1945-). Nessa visão, os sistemas tecnológico e econômico são inseparáveis, ambos formam um sistema tecnoeconômico.

Este artigo investiga a inovação tecnológica como um fenômeno termodinâmico emergente em um sistema complexo tecnoeconômico aberto e fora de equilíbrio.

### O Estado, a tecnologia e o ambiente

Os estudos sobre a criação de riqueza, sua natureza e suas origens datam de muito tempo. O estudioso Antonio Serra, napolitano formado em Direito, publicou sua obra *Breve Tratado das causas que podem fazer os reinos desprovidos de minas ter abundância de ouro e prata*, em 1613 enquanto se encontrava na prisão. No seu livro, Serra indaga por que Veneza – uma cidade implantada em um brejo – é tão rica, enquanto Nápoles, a despeito das terras férteis que a cercam, permanece tão pobre.<sup>6</sup> Segundo Eric Reinert<sup>7</sup>, o napolitano Antonio Serra teria observado em 1613 a importância de um projeto “nacional” que, com a direção do rei, criasse as condições para a criação de riqueza.

O tema continua atual. Uma fonte de informações e dados sobre a inovação são as revoluções industriais, fenômenos de longa duração que representam, contudo, a mudança na qualidade e dimensão da geração de riqueza. Os Gráficos I e II ilustram essa transformação.

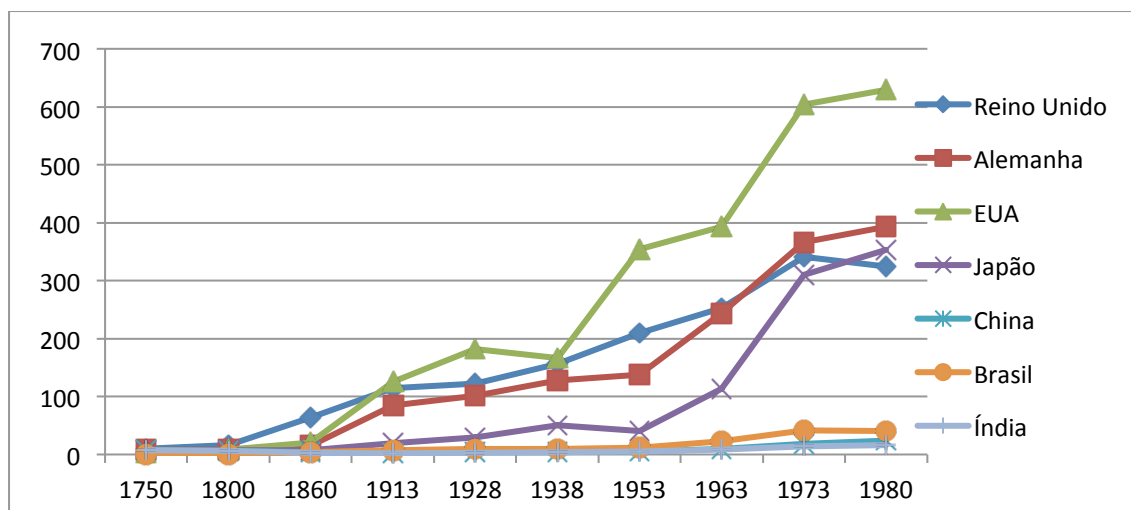
Nossa investigação histórica é conduzida segundo três perspectivas ou esferas. Primeiro, indaga-se o papel do Estado no processo de industrialização; segundo, discute-se o significado da mudança tecnológica na revolução industrial; terceiro, observa-se a importância do ambiente na industrialização de um país.<sup>8</sup>

---

<sup>6</sup> Antonio Serra, *Breve Tratado das Causas que Podem Fazer os Reinos Desprovidos de Minas terem Abundância de Ouro e Prata* (Curitiba: Segesta, 2002).

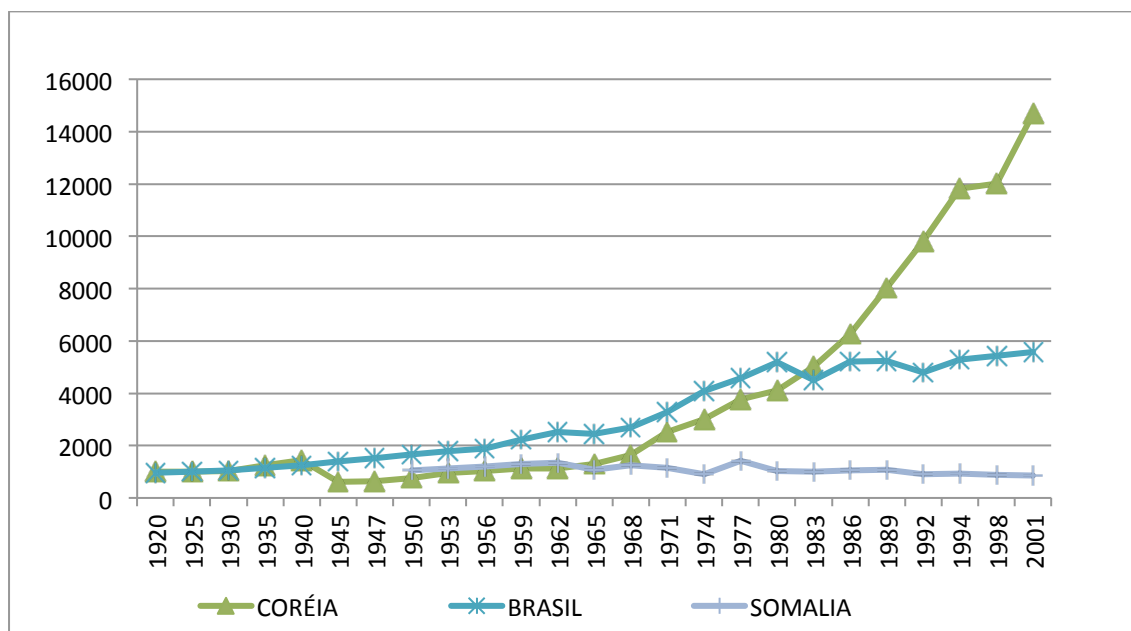
<sup>7</sup> Reinert, Erik S. *Como Países Ricos Ficaram Ricos... e por que os Países Pobres Continuam Pobres* (Rio de Janeiro: Contraponto, 2016).

<sup>8</sup> Laercio Antonio Marzagão “A inovação como fenômeno histórico: uma abordagem pela complexidade” (tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2022).



**Gráfico 1 - A revolução Industrial e o surgimento do terceiro mundo**

Níveis per capita de industrialização – eixo vertical - (normalizado para Reino Unido em 1900=100). Fonte: Paul Bairoch. "International Industrialization Levels from 1750 to 1980".  
Dados organizados pelo pesquisador



**Gráfico 2 - A evolução do PIB da Coreia, do Brasil e da Somália**

Fonte dos dados: Maddison, The World Economy. Gráfico elaborado pelo pesquisador

Nosso estudo abrange as revoluções industriais de três países no século XIX: a inglesa, a alemã e a norte-americana, e dois no século XX no Brasil e da Coreia do Sul. As revoluções industriais que ocorreram no século XX são chamadas de *industrializações tardias*<sup>9</sup>.

Bresser-Pereira entende que o ano de 1930 marca o início da revolução industrial brasileira e vê o impacto da crise internacional no café e, portanto, no comércio exterior brasileiro o gatilho desta transformação.<sup>10</sup> O ex-ministro do Planejamento durante os governos Médici, de 1969-1974 e Geisel, de 1974 a 1979, João Paulo dos Reis Velloso (1931-2019) ratifica essa visão e resume: “antes de 1930 a economia brasileira era muito simples”<sup>11</sup>. O PIB é então cerca de 5% do que viria a ser em 1984. O Brasil era um país agrário, onde 36% da população vive nas cidades.<sup>12</sup> Na época de Vargas (1951-1954) e de Juscelino Kubitschek (1955-1960) a indústria cresceu 262% enquanto a agricultura 87%.<sup>13</sup> Desde o final da Segunda Guerra Mundial até 1961 o Brasil consolidou a sua estrutura industrial e atingiu o apogeu da arrancada de industrialização<sup>14</sup>. Durante o período de Kubitschek houve extraordinário desenvolvimento brasileiro que coroou o processo iniciado na década de 1930: a indústria automobilística, a de equipamentos industriais e a naval ganhavam novo impulso. A partir de 1953 a industrialização provoca “mudanças estruturais dramáticas. Mais que nunca, o motor do crescimento econômico era constituído pela industrialização, voltada pela substituição de importações”<sup>15</sup>. Como consequência desta política de industrialização, o PIB cresceu, entre 1947 e 1961, 160% e o produto industrial, 255%. A riqueza mudou de mão.

Na Coreia, um evento político ocorrido em 16 de maio de 1961 é fundamental para o entendimento da mudança de rumos do país. Um golpe militar depõe o então presidente Syngman Rhee, do Partido Liberal, e Park Chung-hee assume o governo do país. Permanece como presidente até seu assassinato em 1979.<sup>16</sup> Diferentemente de seu antecessor, Chung-hee é “um verdadeiro crente na ciência moderna”<sup>17</sup>.

O processo de industrialização implica na mudança do centro de gravidade do poder econômico na sociedade e, como tal, é de se supor que seja objeto de disputas políticas. As

---

<sup>9</sup> João Manuel Cardoso de Mello, *O Capitalismo Tardio* (São Paulo: Editora Brasiliense, 1995).

<sup>10</sup> Luiz Carlos Bresser Pereira, *Desenvolvimento e Crise no Brasil: 1930- 1967* (Rio de Janeiro: Zahar), 196.

<sup>11</sup> João Paulo dos Reis Velloso, *O Último Trem para Paris: De Getúlio à Sarney: Milagres, Choques e Crises do Brasil Moderno* (Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986), 21.

<sup>12</sup> Ibid.

<sup>13</sup> Carl J. Dahlman & Claudio R. Frischtak, National Systems Supporting Technical Advance in Industry: The Brazilian Experience”, in *National Innovation Systems: A Comparative Analysis*, ed. Richard R. Nelson (New York e Oxford: Oxford University Press, 1993), 414-450.

<sup>14</sup> Ou “spur”, conceito elaborado por Alexander Gershenkron que indica o salto, ou arrancada, no processo de industrialização realizado por países atrasados.

<sup>15</sup> Velloso, 102-103.

<sup>16</sup> Byung-Kook Kim & Ezra F. Vogel, eds., *The Park Chung Hee Era: The Transformation of South Korea* (Cambridge, MA e London: Harvard University Press), 2011.

<sup>17</sup> Stuart W Leslie & Robert H. Kargon. “Selling the Silicon Valley: Frederick Terman’s Model for Regional Advantage”, *The Business History Review* 70, nº 4 (1996): 435-472.

Frederick Terman, o fomentador desde antes da Segunda Guerra Mundial do que seria mais tarde o Vale do Silício, trabalhou na Coreia como consultor para o desenvolvimento da ciência e tecnologia naquele país.

cinco revoluções industriais estudadas confirmam essa hipótese<sup>18</sup> e o Estado surge como protagonista, por meio de projeto político.

A disputa é visível na luta entre Henrique VII e a aristocracia rural inglesa do século XV; nos debates entre Alexander Hamilton (1755-1804)<sup>19</sup> e Thomas Jefferson (1743-1826)<sup>20</sup> nos Estados Unidos e, ainda, na Guerra Civil norte-americana. Na Alemanha a industrialização é precedida por sua unificação política, conforme havia prescrito Friedrich List (1789-1846)<sup>21</sup>. No Brasil, na primeira metade do século XX, a disputa é simbolizada nos debates entre Roberto Simonsen (1889-1948) e Eugenio Gudín (1886-1986).<sup>22</sup> A história mostra que a industrialização não resulta da ação de mãos invisíveis.

Uma ruptura na trajetória de desenvolvimento brasileiro ocorre a partir da década de 1980. Enquanto a Coreia do Sul continua a sua trajetória de crescimento e desenvolvimento econômico, o Brasil se estagna. Este fenômeno tem sido objeto de discussão.<sup>23</sup> Na perspectiva da história, é possível que esteja na mudança nas políticas econômicas que ocorreu no Brasil a partir da década de 1980 a raiz da questão.

Além do poder do Estado, o significado de tecnologia passa por um novo olhar. Brian Arthur (1945)<sup>24</sup> é economista de Stanford e busca saber o que haveria de comum entre as tecnologias mais distintas, como a do martelo, do laser, do parafuso ou do avião a jato. E, nesta direção, busca entender como as tecnologias se estruturam. Ou seja, é fundamental que se reconheça a *estrutura* da tecnologia. Arthur desenvolve um modelo de tecnológica para entender princípios, vislumbrar “alguma lógica comum que daria à tecnologia uma estrutura que explicasse o seu progresso”. Brian Arthur efetivamente busca uma “teoria geral da tecnologia”.<sup>25</sup> O seu estudo inova. Para evitar ambiguidades propõe três significados para tecnologia. Essas três visões de tecnologia importam porque as suas evoluções diferem.

<sup>18</sup> Laercio Antonio Marzagão. “A inovação como fenômeno histórico: uma perspectiva da complexidade”(tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2022).

<sup>19</sup> Alexander Hamilton é um dos “Pais Fundadores” da nação norte-americana e o primeiro Secretário do Tesouro dos Estados Unidos. Defendia um poder central forte e o apoio à manufatura. No seu *Relatório sobre as Manufaturas* Hamilton demonstra as vantagens da manufatura sobre a agricultura na criação de riqueza.

<sup>20</sup> Thomas Jefferson era, ao contrário de Hamilton, um defensor da vida simples da fazenda e se opunha a Hamilton quanto à importância da manufatura. Ver, “Jefferson and Hamilton: The Rivalry that Forged a Nation”

<sup>21</sup> Georg Friedrich List foi o teórico da industrialização alemã. descreve amplamente a situação da Europa, e da Alemanha em particular, em seu livro *Sistema Nacional de Economia Política*, publicado em 1841. List colocava a unificação dos povos de língua germânica como pré-requisito para a industrialização. Viveu nos Estados Unidos e conheceu a obra de Hamilton. O termo “nacional” no título de seu livro não é por acaso. List, ao contrário de Defoe, não é um historiador ou cronista. É um economista e político que elabora e ressalta em seus estudos a importância da unificação dos territórios de língua alemã como um pré-requisito do desenvolvimento do capitalismo e do crescimento econômico alemão.

<sup>22</sup> Eugênio Gudín foi um economista brasileiro de corte liberal que entendia que o Brasil deveria seguir sua vocação natural, que seria a agricultura.

<sup>23</sup> Uallace Moreira Lima, “O debate sobre o processo de desenvolvimento econômico da Coreia do Sul”. *Economia e Sociedade*. V. 26, n.3 (2017): 585-631.

<sup>24</sup> Willian Brian Arthur é um dos protagonistas no estudo da economia da complexidade, relacionando os processos econômicos à mudança tecnológica. Com a idade de 37 anos se tornou o mais jovem titular de uma “endowed chair” – uma cadeira que é provida de recursos financeiros e materiais, o que significa grande liberdade de pesquisa a - em Stanford.

<sup>25</sup> Willian B. Arthur, *The Nature of Technology: What it is and How it Evolves* (London: Penguin Books, 2009). 16-19

Este trabalho adota as três definições para tecnologia propostas por Brian Arthur e suas respectivas estruturas. A distinção é importante, uma vez que as respectivas evoluções são diferentes.

A primeira definição trata a tecnologia *no singular*. Nesta instância, tecnologia é definida “como os meios e recursos por meio dos quais se atende as necessidades humanas”.<sup>26</sup> Nesse caso, a tecnologia é uma estrutura que se transforma, é formada de partes e subpartes que são, por sua vez, tecnologias, ou seja, a estrutura da tecnologia no singular é recursiva. Além disso, cada tecnologia é baseada em um ou mais fenômenos naturais. São esses fenômenos, ou seus “efeitos”, que trazem a eficácia necessária à tecnologia para o atendimento às necessidades humanas ou sociais.<sup>27</sup> Na visão de Arthur, um martelo e uma refinaria de petróleo podem ser analisados da mesma forma, segundo as respectivas estruturas.

O segundo significado atribui um sentido *coletivo* à tecnologia. Nesse caso, a “tecnologia [no coletivo] é um conjunto de práticas e de componentes”.<sup>28</sup> Quando alguém se refere à tecnologia eletrônica ou à tecnologia aeroespacial é à tecnologia no sentido coletivo que se refere. Estas tecnologias significam um conjunto de práticas e componentes, construídas no entorno de certos fenômenos naturais. Pode-se, assim, falar de tecnologia hospitalar neste segundo significado de tecnologia<sup>29</sup>. Não há hierarquia nessa definição.

Uma terceira definição apresentada por Brian Arthur é mais ampla e abstrata. Nela, a “tecnologia é a coleção completa de dispositivos e práticas de engenharia disponíveis a uma cultura”.<sup>30</sup> Esta definição relaciona a tecnologia à sociedade e sua cultura material. Quando se diz que o bem-estar da sociedade moderna se deve à tecnologia, alude-se a esse terceiro significado.

Ao falarmos de revolução industrial, referimo-nos a mudanças na estrutura econômica (como indica os Gráficos I e II) e tecnológica. Brian Arthur pontua que mudança estrutural é um objeto que raramente a teoria econômica convencional aborda.<sup>31</sup> E acrescenta: “é um território habitado por historiadores, historiadores econômicos”<sup>32</sup>.

Uma vez definidas as várias tecnologias, Arthur define economia como “um conjunto de atividades e arranjos por meio do qual a sociedade satisfaz suas necessidades”<sup>33</sup> e o estudo desse fenômeno econômico é o objeto da ciência econômica. Diante das definições de tecnologia apresentadas por Brian Arthur a relação de economia e tecnologia se torna visível. Os *arranjos* mencionados por Arthur são de fato meios de produção, agora com sentido ampliado, mais adequado ao século XX, como assinala, que não se restringe aos instrumentos e às máquinas de produção fabril do século XIX.

---

<sup>26</sup> William B. Arthur *The Nature of Technology: What it is and How it Evolves* (London: Penguin Books, 2009)

33

<sup>27</sup> Ibid. 121

<sup>28</sup> Ibid., 28.

<sup>29</sup> O significado coletivo de tecnologia é basicamente o que se estuda nas escolas de engenharia de produção ou administração de negócios.

<sup>30</sup> Arthur, 28.

<sup>31</sup> Ibid, 217.

<sup>32</sup> Ibid. 217.

<sup>33</sup> Ibid, 214.

Os arranjos por meio dos quais a sociedade satisfaz suas necessidades são tecnológicas no sentido coletivo. Nesse sentido, um hospital é um meio de produção e é uma tecnologia. A negociação que leva a um determinado contrato é uma atividade econômica, enquanto o contrato resultante é um meio de produção e também é, segundo Brian Arthur, uma tecnologia<sup>34</sup>.

Diante da nova definição de economia e de tecnologia, a da conseqüente inseparabilidade da tecnologia, um novo conceito pode ser enunciado, que é o *sistema tecnoeconômico*. Este sistema, com identidade própria, consagra a ideia de que mudança tecnológica e mudança econômica não podem ser tratadas separadamente.

O conhecimento de uma tecnologia no singular não se traduz em impactos econômicos significativos para a sociedade. A evolução do corpo de tecnologias, ao contrário, afeta a economia mais profundamente<sup>35</sup>. Quando a tecnologia no sentido coletivo – um corpo de tecnologias – evolui, esta “pode se transmutar em futuro poder político e econômico”<sup>36</sup>. Enquanto uma tecnologia no singular surge a partir de um ato criativo, que envolve um ou mais participantes, um corpo de tecnologia não é uma invenção, ele emerge a partir do momento em que uma nova tecnologia se insinua na economia. Em conseqüência, indústrias podem ser criadas, outras, destruídas. Novas tecnologias, que subsidiam a primeira, tornam-se necessárias; outras, obsoletas. Em um processo iterativo, pautado por necessidades humanas, sociais e também tecnológicas, a economia e a tecnologia se transformam como um organismo vivo, em uma escala de tempo que não é medida em anos, mas, em décadas.<sup>37</sup> Os elementos de um corpo de tecnologias se agregam, criam uma unidade, seja porque partilham uma teoria comum ou porque têm um objetivo comum. Pode-se dizer, por exemplo, que o Brasil a tecnologia da agricultura do ecossistema tropical<sup>38</sup>.

Depois do papel do Estado e da mudança tecnológica, a terceira perspectiva adotada nesta pesquisa para abordar as revoluções industriais é o papel do *ambiente*, o lugar onde o processo de industrialização se desenvolve.

A importância do lugar no processo de inovação é, por exemplo, assinalada por Michel Porter (1947)<sup>39</sup>. Este autor, considera que, a despeito da globalização econômica, a inovação tecnológica continua a ser um fenômeno local<sup>40</sup>. Há mais de um século Alfred Marshall (1842-1924) sublinhava a importância do lugar para o florescimento da indústria. Em

---

<sup>34</sup> William B. Arthur *The Nature of Technology: What it is and How it Evolves* (London: Penguin Books, 2009), 7, 213.

<sup>35</sup> *Ibid.*, 7, 162.

<sup>36</sup> *Ibid.*, 7, 81.

<sup>37</sup> No segundo semestre de 1973, uma nova concepção de centrais telefônicas era objeto do curso. O professor Jim Rudolf escreve na lousa, no primeiro dia de aula, a seguinte sentença: “the world is going to digital”. Por aquela época a revolução digital era ainda uma promessa ousada. E a revolução continua, meio século depois.

<sup>38</sup> Marzagão, “A física do estado sólido no Brasil: relação entre ciência, indústria e sociedade” (dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2017). A Entrevista com o professor Silvio Crestana mostra as atividades da Embrapa.

<sup>39</sup> Michael Porter é professor em Harvard e se dedica ao estudo da competitividade empresarial. Em um de seus artigos Porter analisa o papel do ambiente na inovação e assinala a importância do lugar, do ambiente, no processo de inovação, a despeito da globalização econômica, o ambiente mantém sua importância.

<sup>40</sup> Michael E Porter, “Clusters and the New Economics of Competition,” *Harvard Business Review* (November-December 1998): 77-90.



seu livro, “Princípios de Economia”, escreve: “[no distrito industrial] os mistérios do ofício se desfazem”.

A noção de ambiente é elaborada neste artigo. Em primeiro lugar, distinguimos o conceito de *ambiente* do conceito de *contexto*. Esse último é o meio externo com o qual o sistema tecnoeconômico troca energia, matéria e informação. O *ambiente*, por outro lado, é o elemento que condiciona a evolução do sistema tecnoeconômico e se assemelha à noção de nicho. Peter Hall & Robert Wylie e J. Schot & F. W. Geels justificam a importância do conceito de “nichos”<sup>41</sup> e ponderam que “a despeito de sua importância na biologia evolucionária, o potencial transformador do isolamento não tem recebido a devida atenção na economia evolucionária”<sup>42</sup>.

Como algo que é relativamente isolado, os autores caracterizam um ambiente segundo três “distâncias”, que são de ordem espacial, social e cognitiva. A distância de ordem social inclui a política, a geopolítica, o capital social e humano, as necessidades sociais específicas. A de ordem espacial considera as características geográficas do ambiente, as “distâncias” internas, como são os desertos, florestas, lagos, os vazios de qualquer ordem, e as externas (o isolamento propriamente dito). O clima, o solo, as limitações e abundâncias de recursos naturais pertencem à distância espacial. Finalmente, a distância cognitiva, que significa o domínio do conhecimento do mercado, dos recursos naturais, dos hábitos e particularidades da sociedade. As três distâncias podem ser entendidas como propriedades que delimitam e qualificam o ambiente. Com base na teoria do isolamento, Wylie e Hall elaboram dois estudos de caso de desenvolvimento tecnológico.<sup>43</sup> O primeiro explora as características da ionosfera australiana - utiliza a refração na ionosfera de certas faixas de frequência de radar - de modo que a ionosfera possa atuar como um espelho, permitindo a monitoração da grande extensão do território australiano. O segundo estudo é sueco. Trata-se de um radar que não é instalado no solo, mas, sim, a bordo de uma aeronave. A proximidade da União Soviética e a condição de ser um país neutro no contexto da Guerra Fria - este sistema foi desenvolvido em fins dos anos 1970 - compeliu o governo sueco a desenvolver sua própria tecnologia para a área militar, ao invés de utilizar soluções exógenas.

Esse conceito de ambiente está presente nas revoluções industriais analisadas. O historiador francês Fernand Braudel (1902-1985) ao se referir à Inglaterra denomina o período entre 1453 e 1558<sup>44</sup> como aquele em que a “Inglaterra se tornou uma ilha”.<sup>45</sup> Braudel justifica sua afirmação assinalando que “até então, [a Inglaterra] era mais ou menos uma das províncias da França”<sup>46</sup>, e, ao longo deste período se transforma numa “ilha”, com identidade própria. Em seu livro *A Dinâmica do Capitalismo*, Braudel reitera que a “insularidade ajudou a

---

<sup>41</sup> Hall, Peter & Robert Wylie. “Isolation and Technological Innovation”, in *The Evolution of Economics and Innovation Systems*, (eds.), Andreas Pyka & John Foster Economic (Complexity and Evolution, Springer, edition 127, number 978-3-319-13299-0, December. 2015).

<sup>42</sup> Ibid.

<sup>43</sup> Ibid., 366.

<sup>44</sup> Braudel caracteriza este período com o final da Guerra dos Cem Anos e a recuperação de Calais por Francisco de Guise (1519-1596).

<sup>45</sup> Fernand Braudel, *Civilization and Capitalism, 15th-18th Century: The Perspective of the World*. Vol. 3, trad. Siân Reynolds. (London: Williams Collins Sons & Co Ltd, Glasgow, 1984). 353-85.

<sup>46</sup> Ibid.

Inglaterra a desprender-se da ingerência do capitalismo estrangeiro”.<sup>47</sup> Braudel mostra que distâncias podem ser construídas.

As políticas aduaneiras e outras formas de restrições legais são adotadas na Inglaterra, nos Estados Unidos, na Alemanha. No Brasil, na Coreia do Sul no século XX e na Inglaterra do século XVI a “substituição de importação” acompanhada de políticas aduaneiras foram utilizadas. Estas são distâncias *social/política*.

No Brasil, a distância de ordem espacial representada pelo ecossistema tropical dificulta ou impede a importação de soluções tecnológicas do mercado mundial para uso na agricultura. Essa distância, associada a um projeto político da época (distância social), levou à fundação da Embrapa no ano de 1973. Esse instituto de pesquisas agronômicas transformou o Brasil em um dos líderes mundiais na agricultura e pecuária<sup>48</sup>.

### Os experimentos de Solow e Abramovitz

Na seção anterior apresentamos a importância da técnica nos diversos processos de industrialização desde o século XIX. A medida dessa importância, contudo, só foi realizada nos meados dos anos 1950. Nesta data os economistas norte-americanos, Robert Solow (1924-)<sup>49</sup> e Moses Abramovitz (1912-2000), trabalhando independentemente, levantaram as estatísticas históricas do crescimento dos Estados Unidos ao longo de mais de meio século anterior. Compararam o resultado real com aquele obtido por meio da teoria econômica e concluíram que apenas cerca de 15% da evolução do Produto Interno Bruto (PIB) norte-americano poderia ser justificado pela teoria econômica. A este desvio de 85%, tecnicamente conhecido como “Total Factor Productivity”, Abramovitz referiu-se como sendo “a medida de nossa ignorância sobre as causas do crescimento econômico”<sup>50</sup>. Ajustes na equação do produto foram realizados, novos fatores, como a própria tecnologia e o capital humano foram incluídos. Solow atribuiu essa discrepância à contribuição da tecnologia, ou seja, que a mudança técnica responderia pelos 85% de crescimento econômico. Contudo, como assinala Richard Nelson (1930-), um dos líderes atuais na busca de uma teoria econômica evolucionária, nas ciências da natureza, diante de uma discrepância desta ordem, conclui-se que algo está errado com a teoria, com o experimento ou com ambos. Nelson entende que a falha nesse caso está na teoria. Nelson e Winter, propõem que a “reconstrução dos fundamentos teóricos de nossa disciplina constitui uma pré-condição para um significativo entendimento da mudança econômica.”<sup>51</sup>

<sup>47</sup> Fernand Braudel, *A Dinâmica do Capitalismo*, trad. Álvaro Cabra (Rio de Janeiro: Rocco, 1987), 83 e 84

<sup>48</sup> Marzagão, “A Física do Estado Sólido no Brasil: relações entre a ciência, a indústria e a sociedade” (dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2017), 132-149.

<sup>49</sup> Robert Solow recebeu o Nobel em Economia em 1987.

<sup>50</sup> Moses Abramovitz, *Thinking about growth and other essays on Economic Growth and Welfare*. (Cambridge: University of Cambridge Press, 1989), 15, 133.

<sup>51</sup> Richard Nelson & Sidney G. Winter *Uma Teoria Evolucionária da Mudança Econômica* (Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2005), 18.

O fato de as dificuldades mencionadas atingirem os conceitos fundamentais da teoria econômica gera resistências entre os economistas, diz Nelson. Contudo, acrescenta, “alguns de nossos colegas compartilham o sentimento de mal-estar que aflige a teoria econômica contemporânea”<sup>52</sup> e, assim, alguma coisa vem sendo feita. Uma atenção maior às imperfeições do mercado e da concorrência, aos retornos econômicos crescentes e às indivisibilidades tem sido dada.<sup>53</sup> Contudo, muitas das novas explorações teóricas encaram a tecnologia e a mudança técnica como um fator exógeno: “enxertam variáveis relativas ao avanço técnico na teoria ortodoxa<sup>54</sup>”, afirmam Nelson e Winter. Falta encontrar ainda o caminho que “leve a um avanço coerente e sustentado para além do território intelectual reivindicado pela moderna teoria do equilíbrio geral”.<sup>55</sup>

### As metáforas e a ciência

A presença da metáfora na criação científica é comum. George Basalla (1928-) defende o uso de metáforas ao abordar a evolução da tecnologia<sup>56</sup> e argumenta que “metáforas ou analogias estão no coração de todo pensamento crítico analítico”. Basalla acrescenta: “sem a metáfora, a literatura seria estéril, a ciência e a filosofia mal existiriam e a história se reduziria a uma crônica de eventos”.<sup>57</sup> Tomás Langer<sup>58</sup> coloca que “uma metáfora não é somente uma forma de expressão por meio de meras palavras, mas, é uma maneira de projetar estruturas internas de um domínio fonte dentro de um domínio alvo. A interação metafórica entre dois domínios de conhecimento, um bem conhecido e outro a ser explorado, pode se resumir conforme abaixo:

{x} se comporta como se fosse {y}<sup>59</sup>

O instrumento articulador da metáfora, “como se”, relaciona o domínio parcamente conhecido, que é {x}, ao domínio conhecido, que é {y}, que pode ser um conjunto de propriedades ou proposições, tal como uma teoria científica.

Há, por certo, semelhanças e dissemelhanças entre os dois domínios. Arthur I. Miller e Max Black entendem que as dissemelhanças imediatas entre {x} e {y} produzem tensão entre os domínios. Esta é uma tensão criadora, pois, os esforços para a sua superação gera conhecimento. Segundo Miller, “quanto maior a tensão, maior o poder criativo da metáfora”.<sup>60</sup> São essas tensões que, por meio de formulações sucessivas de novas metáforas, produ-

---

<sup>52</sup> Ibid., 19-20.

<sup>53</sup> Ibid., 20.

<sup>54</sup> Ibid., 51.

<sup>55</sup> Ibid., 19.

<sup>56</sup> George Basalla, *The Evolution of Technology*. (Cambridge: Cambridge University Press, 1998).

<sup>57</sup> Ibid., 133/ 4850.

<sup>58</sup> Tomás Langer, “Metaphors in Economics: Conceptual Mapping Possibilities in the Lectures of Economics”, *Procedia Economics and Finance* 25 (2015): 308-317.

<sup>59</sup> Arthur I. Miller, *Insights of Genius: Imagery and Creativity in Science and Art*. (New York: Copernicus; Springer-Verlag, 1996), 221.

<sup>60</sup> Arthur I. Miller, *Insights of Genius*, 221.

zem o desenvolvimento da ciência<sup>61</sup>, pois, “cada metáfora é a ponta de um modelo submerso”.<sup>62</sup>

O poder estruturante da metáfora do movimento circular se verifica no modelo do átomo de Niels Bohr (1885-1962). No seu primeiro artigo, “On the Constitution of Atoms and Molecules”, de 1913, o físico dinamarquês enfatiza que, a despeito de os princípios da mecânica newtoniana serem violados em seu modelo, a imagem proporcionada é útil para a compreensão de certos aspectos do átomo<sup>63</sup>.

O átomo se comporta como se fosse um minúsculo sistema solar<sup>64</sup>

A dissemelhança imediata é a dissipação de energia dos elétrons que, neste modelo levaria ao colapso do átomo ali representado. A criatividade disruptiva surge quando Bohr, ao invés de buscar explicações para a estabilidade do átomo “newtoniano”, considerou esta estabilidade um fato dado e estabeleceu regras inusitadas para definir as condições desta estabilidade. Estabeleceu órbitas eletrônicas específicas onde a estabilidade ocorreria e as definiu através de outra ousadia recentemente formulada: a constante de Planck. As órbitas estacionárias, aquelas onde os elétrons não emitiriam energia, são tais que o momento angular do elétron é múltiplo inteiro da constante de Planck.

A metáfora está presente na descoberta em 1900 dos *quanta* por Max Planck, quando este expressou seu modelo de radiação do corpo negro<sup>65</sup> imaginando que “os elétrons que recobrem as paredes da cavidade radiante se comportam **como se** fossem partículas carregadas oscilantes.”<sup>66</sup>. O uso de metáforas também se verifica na construção da teoria eletromagnética. James Clerk Maxwell (1831-1879) imagina – ou metaforiza – o campo eletromagnético como se este fora, nas palavras de Miller, uma “coleção de rodas, polias e fluidos”. Segundo Miller, essa metáfora de Maxwell é um modelo.<sup>67</sup>

Conforme já adiantado, os economistas Erik Reinert (1949 -) e Jomo Kwame Sundaram (1952-)<sup>68</sup> classificam as teorias do crescimento econômico em dois grupos: no primeiro, estão as metáforas da biologia (as teorias que tomam como base o corpo humano e a teoria da evolução das espécies); no segundo, estão as metáforas da física, que interpretam os processos econômicos como fenômenos regulados por uma mão invisível, tal qual o movimento dos planetas de Laplace (1749-1825).<sup>69</sup> A teoria econômica predominante é uma metáfora da

<sup>61</sup> Ibid., 223.

<sup>62</sup> Ibid.

<sup>63</sup> O elétron foi descoberto em 1897 por Joseph J. Thomson. A argumentação envolvendo o “modelo newtoniano” de Niels Bohr, suas vantagens e limitações, pode ser apreciada em Miller, 224-226.

<sup>64</sup> Arthur I. Miller, *Insights of Genius, Insights of Genius: Imagery and Creativity in Science and Art*. (New York: Copernicus; Spring-Verlag, 1996), 225.

<sup>65</sup> *Corpos negros* são corpos cujas superfícies absorvem toda a radiação térmica incidente.

<sup>66</sup> Miller, *Insights of Genius*, 224.

<sup>67</sup> Ibid., 222.

<sup>68</sup> Jomo K. Sundaram & Erik S. Reinert *Origens do Desenvolvimento Econômico* (São Paulo: Globo Editora, s.d.), 12.

<sup>69</sup> Pierre Simon de Laplace busca em sua obra *Mechanique Celeste* uma solução completa para o problema mecânico apresentado pelo Sistema Solar. Busca fazer com que a teoria coincida tanto com a observação que equações empíricas não mais encontrem lugar em tabelas astronômicas.

mecânica de Newton. Esta suposição é útil para a realização da análise crítica da teoria econômica.

### A mecânica e o equilíbrio

Em 1773, Pierre-Simon, Marquês de Laplace ao estudar os desvios verificados nas órbitas dos planetas deduz que esses desvios se devem à presença de outros corpos no Sistema Solar. Parece que as órbitas planetárias são estáveis, corrigidas a longo prazo<sup>70</sup> por uma mão invisível – ou pelo demônio de Laplace.

A mecânica não é somente estável<sup>71</sup>, ela é também objetiva, ela exclui o homem da investigação dos fenômenos da natureza. Segundo Ilya Prigogine (1917-2003), laureado Nobel de Química em 1977 por suas pesquisas na termodinâmica dos processos irreversíveis e pela formulação da teoria das estruturas dissipativas, “qualquer que seja a linguagem que, até aqui, a física tenha emprestado à natureza, essa linguagem sempre definiu um mundo natural onde o homem é excluído”.<sup>72</sup> E ele continua: “complexidade e história: estas duas dimensões estão igualmente ausentes do mundo contemplado pelo demônio de Laplace”.<sup>73</sup> Finalmente, “a natureza, conforme vista pela dinâmica clássica, é uma natureza sem relevo, plana e homogênea”.<sup>74</sup> Todas essas propriedades da mecânica estão associadas a duas leis simples e poderosas, que são a lei da conservação da energia mecânica e a lei da conservação do momento<sup>75</sup>.

### A economia e o equilíbrio

É sobre o sucesso da mecânica, que inspirou tantas teorias, que a economia neoclássica é construída. Por volta do terceiro quarto do século XIX, três economistas buscaram formular uma teoria econômica objetiva – e, portanto, científica.

O francês radicado na Suíça, Léon Walras (1834-1910), o inglês William S. Jevons (1835-1882) e o austríaco Carl Menger (1840-1921) criam uma teoria econômica que se espelha na mecânica newtoniana. A nova ciência econômica seria objetiva, não se contaminaria com a política e outras forças sociais estranhas à racionalidade econômica.<sup>76</sup>

O equilíbrio entre oferta e demanda era inspirador. Tal como no movimento dos planetas, os preços se estabilizariam diante de algum evento que deslocasse o sistema econômico do equilíbrio. A nova teoria econômica se estruturaria como metáfora da mecânica. Assim, os agentes econômicos – sejam empresas ou pessoas – são movidos por forças naturais,

---

<sup>70</sup> Pierre-Simon Laplace, *Mechanism of the Heavens*, trad. Mary Sommerville, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

<sup>71</sup> Há limites para essa estabilidade, como mais tarde mostra Poincaré.

<sup>72</sup> Ilya Prigogine & Isabelle Stengers, *A Nova Aliança: Metamorfose da Ciência*. 3ª ed. trad. Miguel Faria & Maria J. M. Trincheira. (Brasília: Universidade de Brasília, 1997). 61

<sup>73</sup> Ibid.

<sup>74</sup> Ibid.

<sup>75</sup> Trata-se da grandeza física denominada “momento” ou “quantidade de movimento”.

<sup>76</sup> Emery K Hunt, *História do Pensamento, História do Pensamento Econômico: Uma Perspectiva Crítica*. (Rio de Janeiro: Campus, 1981). Este é um período político e socialmente conturbado na Europa. Ocorrem as unificações políticas da Itália e Alemanha e começa em 1873 a chamada Longa Depressão, que se estende até os anos 1890.

como o egoísmo e a busca do prazer<sup>77</sup>, e atuam sempre e legitimamente na busca individual de maior riqueza. O campo onde este jogo acontece é o mercado, que é o lugar onde a compra e a venda se concretizam e as forças se equilibram.

Walras assim se expressa a respeito do mercado e do ajuste de preços:

“Os mercados mais bem organizados do ponto de vista da concorrência são aqueles em que as compras e as vendas são feitas por pregões, por meio de agentes, tais como agentes de câmbio, corretores de comércio e zangões, que as centralizam de tal modo que nenhuma troca é feita sem que sejam anunciadas e conhecidas as condições e sem que os vendedores possam oferecer em liquidação e os compradores possam aumentar os lances.”<sup>78</sup>

O demônio de Laplace<sup>79</sup> e o leiloeiro de Walras<sup>80</sup> se equivalem na onisciência. Ambos se encontram em mundos racionais e em equilíbrio.

O sucesso e poder da mecânica é inegável. Contudo, há revezes. A simetria no tempo, que é equivalente ao equilíbrio, produz resultados inverossímeis, às vezes muito distantes da realidade. Tudo porque, ao contrário do que garante a mecânica, o movimento de um pêndulo não é eterno; o leite derramado não retorna à vasilha e a história de Benjamin Button, da novela de Scott Fitzgerald, é fantástica. Se o tempo fosse de fato reversível, o leite derramado retornaria à vasilha, a história de Benjamin Button faria parte do cotidiano e o pêndulo oscilaria eternamente.<sup>81</sup> A vida, na perspectiva da mecânica, seria um filme que visto do fim ao começo faria todo o sentido.<sup>82</sup>

Onde e quando o equilíbrio é uma hipótese válida passa a ser a questão importante. Afinal, a teoria econômica do equilíbrio deve ter espaço de aplicação. Na chamada teoria dos sistemas se aprende que a estabilidade de um sistema é sempre garantida pelas realimentações negativas que possam existir neste sistema.<sup>83</sup> Esta é a base da *teoria do controle*, que, como o próprio nome indica, busca fazer com que sistemas cheguem a bom termo<sup>84</sup>, ao equilíbrio desejado.

<sup>77</sup> A busca do prazer, da filosofia utilitarista de Jeremy Bentham, é um conceito importado pela teoria neoclássica.

<sup>78</sup> Walras, 34.

<sup>79</sup> O *demônio de Laplace* é capaz de observar num determinado momento a posição, a velocidade de cada partícula constituinte do Universo. Esta condição lhe permite conhecer o futuro ou o passado. A mecânica newtoniana não tem história.

<sup>80</sup> O *leiloeiro de Walras* é o nome que os seguidores do economista atribuíram ao agente imaginado por Walras, que seria capaz de conhecer todas as intenções de compra e venda num dado instante.

<sup>81</sup> A propósito da reversibilidade e seus contrassensos, os vários livros e artigos de Ilya Prigogine fornecem de argumentos e exemplos.

<sup>82</sup> Kauffmann, *A World Beyond Physics*; ver também Schrödinger, “O que é Vida”; e Koestler & Smythies, eds., *Beyond Reductionism*. O artigo de Schneider & Kay, “Life as a Manifestation of the Second”, atualiza a proposta de Schrödinger com as contribuições de Prigogine.

<sup>83</sup> A realimentação ocorre quando o resultado (saída) de um sistema também atua como fator de entrada do mesmo sistema..

<sup>84</sup> Norbert Wiener, *Cibernética: Ou o Controle e Comunicação no Animal e na Máquina*, Trad. Gita K. Guinsburg (São Paulo: Perspectiva, 2017).

No reino da economia, o equivalente às realimentações negativas existem, são as atividades econômicas de retornos decrescentes, que trazem o sistema de volta ao equilíbrio. É a partir da existência de retornos decrescentes que a estabilidade da teoria econômica neoclássica se concretiza, pois, nas palavras de Brian Arthur, “o equilíbrio define a ótima alocação de recursos naquelas circunstâncias”.<sup>85</sup>

A concorrência perfeita está associada a uma condição de rendimentos decrescentes. A onisciência do leiloeiro de Walras se realiza, pois, neste caso, o preço não é controlado pelo seu produtor, será aquele que o mercado está disposto a pagar. Tipicamente, este fenômeno ocorre com os produtos de origem extrativista, como o petróleo, os minérios ou mesmo produtos agrícolas. Estes mercados apresentam rendimentos decrescentes: são as commodities. Diante de qualquer perturbação, como um conflito no Oriente Médio ou no Sudeste Asiático, os leiloeiros de Walras entram em campo para *tatear*<sup>86</sup>, para “descobrir” o novo ponto de equilíbrio para os preços do petróleo ou do arroz. Porque há equilíbrio, a mão invisível atua e o sistema econômico é automaticamente ajustado da mesma forma que o Sistema Solar de Laplace. A aplicação da teoria neoclássica nestes mercados é bem-sucedida, pois, como assinala Arthur<sup>87</sup>, prevalece nesses mercados a lei dos rendimentos econômicos decrescentes.

As simetrias e os equilíbrios correspondentes, além do reducionismo, facilitam a tematização de uma ciência, como ocorre com a mecânica e também com a teoria econômica convencional. Contudo, na economia, da mesma forma que na mecânica, a hipótese do equilíbrio pode levar a resultados inverossímeis, distantes da realidade.<sup>88</sup> Fatalmente, esta hipótese falha quando surge uma nova tecnologia, um novo produto, ou um novo patamar de demanda (que sempre demanda mudanças tecnológicas, por simples que sejam). Esses eventos quebram as simetrias e geram deformações no mercado, a riqueza muda de mão ou muda a participação relativa de mercado entre os participantes. Esta nova condição provoca reações. Novos desequilíbrios ocorrem e se sucedem. Em todo este processo os rendimentos crescentes estão presentes, reduzindo os custos unitários. E todo esse percurso é marcado pela ação da mudança tecnológica.

Ora, se são as imperfeições de mercado – os desequilíbrios – que produzem o crescimento econômico, é razoável deduzir que uma teoria econômica construída sobre os alicerces do equilíbrio não pode compreender o crescimento. Joseph Schumpeter percebia o mesmo há um século ao afirmar que as “lentes estáticas” da teoria neoclássica limitam a compreensão do desenvolvimento econômico. Atualmente esse entendimento é reiterado por Brian Arthur quando diz que as mudanças estruturais na economia são invisíveis para a teoria econômica neoclássica.

---

<sup>85</sup> William B. Arthur, “Positive Feedbacks in the Economy,” in *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, (Michigan: University of Michigan Press, 1994).

<sup>86</sup> O termo *tâtonnement*, que significa tatear, é utilizado por Walras.

<sup>87</sup> William B. Arthur, “Positive Feedbacks in the Economy,” in *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy* (Michigan: University of Michigan Press, 1994).

<sup>88</sup> Ver os argumentos de William Brian Arthur, adiante.

### Os sistemas econômicos e a realimentação positiva

Por volta das décadas de 1920 e 1930 Ludwig von Bertalanffy começa a questionar a visão reducionista emprestada da mecânica, que se mostrava insuficiente para o estudo da biologia evolucionária.<sup>89</sup>

No final da década de 1960, seu livro “Teoria Geral dos Sistemas” enfatiza a necessidade de se construir uma alternativa aos métodos reducionistas da ciência. Novos métodos de investigação são considerados. Ao invés da certeza, enfatiza-se a conectividade entre os elementos de um sistema, o seu contexto e as realimentações existentes. O pesquisador muda o caráter de suas indagações. Agora busca identificar e explicar as relações, as interações e os padrões. O conhecimento das propriedades dos elementos do sistema é buscada no todo, ao invés de isoladamente. A teoria dos sistemas, que primeiramente foi desenvolvida como resposta aos métodos mecanicistas utilizados na biologia, foi mais tarde utilizada na Guerra Fria para desenvolver sistemas na área militar, como os de controle de mísseis, de logística etc. Atualmente os conceitos de sistemas tem sido bastante utilizados na economia e na administração de negócios.<sup>90</sup>

Prigogine e outros mostraram em 1946 que em sistemas complexos, abertos e longe do equilíbrio termodinâmico emergem, sob determinadas condições de contorno, estados estacionários. Estes estados organizacionais não são homeostáticos, mas, ao contrário, são mantidos em equilíbrio dinâmico por conta do fluxo de energia e/ou matéria oriunda do seu contexto.

Situações complexas envolvem incertezas e surpresas. “Essencialmente, a complexidade é caracterizada por situações em que são possíveis diferentes e coerentes cenários futuros<sup>91</sup>” Um fenômeno chave nestes sistemas é o da realimentação positiva. Brian Arthur<sup>92</sup>, do Instituto Santa Fé e Stanford, afirma em um de seus artigos que “por ser um economista graduado em engenharia elétrica, a noção de realimentação positiva era bastante familiar para mim”.<sup>93</sup> Duas longas citações de Brian Arthur são aqui reproduzidas como se fossem um manifesto. Foram extraídas de um artigo publicado em 1990 na *Scientific American* onde o autor tece considerações sobre a teoria econômica convencional, a neoclássica:

A teoria econômica convencional é construída sob a hipótese de retornos [econômicos] decrescentes. [Nesta hipótese] as ações econômicas engendram realimentações negativas que levam a um previsível equilíbrio para os preços e participações de mercado. Essas realimentações tendem a estabilizar a economia porque qualquer mudança importante será contrabalanceada pelas próprias reações que

<sup>89</sup> James J. Kay, “An Introduction to Systems Thinking”. In *The Ecosystem Approach: Complexity, Uncertainty, and Managing for Sustainability*, eds. David Waltner-Toews, James J. Kay, & Nina-Marie E. Lister (New York: Columbia University Press, 2008), 15.

<sup>90</sup> *Ibid.*, 16.

<sup>91</sup> *Ibid.*, 11.

<sup>92</sup> Brian Arthur é de Stanford e colaborador do Santa Fe Institute, um organismo independente que desenvolve pesquisas sobre a economia e os sistemas complexos.

<sup>93</sup> Arthur, prefácio para *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy* (Michigan: University of Michigan Press, 1994).



produzem... De acordo com a teoria convencional, o equilíbrio sinaliza o melhor resultado possível dentro das circunstâncias: ou seja, o mais eficiente uso e alocação de recursos.<sup>94</sup>

Em seguida, no mesmo artigo, Brian Arthur mostra as limitações da teoria e a razão destas limitações:

Esse retrato agradável frequentemente violenta a realidade. Em muitas áreas da economia, as forças estabilizadoras parecem não funcionar. Ao contrário, realimentações positivas ampliam os efeitos provocados por pequenas perturbações. O modelo econômico que descreve esses efeitos diferem drasticamente dos modelos convencionais. Retornos decrescentes implicam em um único equilíbrio para a economia, porém, a realimentação positiva – os retornos crescentes – tornam possíveis muitos pontos de equilíbrio. Não há garantia nenhuma que um ponto de equilíbrio em particular seja selecionado, entre tantas alternativas, por ser “ótimo”.<sup>95</sup>

Trinta anos mais tarde, em fevereiro de 2021, Brian Arthur apresenta na revista *Nature Physics* a sua visão sobre uma teoria econômica que ele denomina economia da complexidade. O economista faz uma crítica da teoria convencional para, em seguida, justificar essa nova abordagem. A crítica se resume a seguir:

A teoria econômica neoclássica assume agentes perfeitamente racionais (empresas, consumidores, investidores) que enfrentam problemas bem definidos e com comportamento ótimo consistente com – [ou seja,] em equilíbrio com – o resultado global causado por esse comportamento. Esse sistema racional e equilibrado produz uma economia elegante, mas, que é restritiva e muitas vezes é irreal...<sup>96</sup>

Brian Arthur está afirmando que a situação harmoniosa das revoluções dos planetas em torno do Sol não é tão frequente na vida econômica real.

### **A termodinâmica, os gradientes e as estruturas dissipativas**

Os sistemas complexos, quando submetidos a gradientes termodinâmicos (como os de temperatura, concentração química, pressão) reagem a esse gradiente buscando reduzi-los e, para tanto, criam as estruturas dissipativas de Prigogine.

James J. Kay (1954-2004) e Eric Schneider (1934-2022) denominam essa reação à aplicação do gradiente termodinâmico como a “segunda lei reformulada da termodinâmica”. Estas estruturas se formam dissipando a energia – por isso o adjetivo dissipativas - fornecida através do gradiente imposto e exportam entropia para o meio externo, o contexto. Com esta

---

<sup>94</sup> Arthur, *Positive Feedbacks*, 92.

<sup>95</sup> Ibid.

<sup>96</sup> W. Brian Arthur, “Foundations of Complexity Economics.” *Nature Review Physics*, vol 3, nº 2 (fevereiro 2021): 136-145.

exportação, a entropia do sistema se torna mínima, mas, respeitando o segundo princípio, a entropia total, a entropia do contexto somada à do sistema, aumenta. Um exemplo clássico de formação de estruturas dissipativas são as células de Bénard. O gradiente de temperatura entre as duas superfícies de um líquido é dissipado, a partir de determinado grau, através de forma inusitada de convecção, que são as células de Bénard. Mas, há outras, como o laser, o tornado. Todos buscam dissipar os gradientes termodinâmicos.

Os seres vivos, como células e ecossistemas, dependem do fluxo de energia recebida de fora. É esta energia, na forma de um gradiente, que mantém a organização e o desenvolvimento destes organismos.

Em analogia com os gradientes termodinâmicos tradicionais, este artigo propõe a existência de outro tipo de gradiente, que é aqui denominado de “gradiente econômico”. É o gradiente econômico que faz movimentar a economia, que fazem surgir uma fábrica ou o desenvolvimento de um novo processo administrativo. É o gradiente econômico que, na forma de um contrato, faz uma fábrica já existente produzir uma quantidade de equipamentos. É o gradiente econômico que aproxima os fornecedores e compradores. Os fornecedores de novas tecnologias encontram-se com as oportunidades de uso de novas tecnologia. Os fornecedores de máquinas e equipamentos encontram-se com construtores de fábricas. Como num processo metabólico, o sistema tecnoeconômico se desenvolve. A riqueza é gerada, novas organizações se criam.

Os gradientes econômicos podem ser de natureza pública ou privada. Se o *projeto de industrialização* existe e os recursos privados não acorrem, o Estado deve ser a posição de protagonista. Quando o presidente Biden dos Estados Unidos anuncia um programa da ordem de cinco trilhões de dólares para ativar e atualizar a indústria norte americana, ele está aplicando um gradiente econômico sobre o sistema tecnoeconômico norte americano. O programa do presidente Biden motivará muitas empresas a investirem no desenvolvimento de novos produtos e serviços relativos à energia limpa e os recursos então privados. Haverá contratos que garantem retornos. As universidades desenvolverão programas de pesquisas, aplicadas ou básicas. No final deste programa, os Estados Unidos serão possivelmente líderes de uma nova tecnologia, no sentido coletivo, e é possível que muito mais que os cinco trilhões de dólares dispendidos no programa serão acrescidos no PIB daquele país. As transformações estruturais tecnoeconômicas resultam de gradientes econômicos aplicados ao sistema.

### **Um sistema de inovação: sua estrutura, contexto e ambiente**

Conforme já apresentado, o modelo de inovação proposta nesta pesquisa aborda os processos de inovação e de crescimento econômico como fenômenos emergentes num sistema tecnoeconômico, complexo, aberto, longe do equilíbrio. Também foi assinalado que o fato econômico que anima a assimilação do processo de inovação a processos termodinâmicos é a lei dos rendimentos econômicos crescentes. Da mesma maneira que o segundo princípio da termodinâmica atua nos sistemas conhecidos da natureza, vivos ou não, a lei dos rendimentos crescentes, age no reino da economia. Da mesma forma que a termodinâmica do não-equilíbrio, em determinadas condições de contorno, produz as estruturas dissipati-

vas, a lei dos rendimentos crescentes produz, no âmbito da economia, desequilíbrios e as consequentes transformações estruturais no sistema tecnoeconômico.

Esse processo é evolucionário. Transformações estruturais no sistema tecnoeconômico se traduzem em transformações no corpo de tecnologias e, portanto, na estrutura econômica. Os historiadores percebem que a introdução da nova tecnologia não se resume a um ajuste pontual acompanhado de impactos associados, mas, apenas o início de uma cadeia de transformações estruturais no sistema tecnoeconômico. Diz Arthur: “uma nova tecnologia pode demandar novas indústrias; novas estruturas organizacionais e gerar novos problemas técnicos, sociais ou econômicos”.<sup>97</sup> Quando uma nova tecnologia se incorpora ao sistema tecnoeconômico, e caso exista o gradiente econômico - cadeia de transformações se desenrola na estrutura econômica, ou seja, nos meios de produção. Como um organismo, o sistema tecnoeconômico se desenvolve e se recia. E não é simplesmente uma cadeia de transformações.

A Tabela 1 a seguir resume e esquematiza essa transformação. A evolução tecnológica é imediatamente associada ao desenvolvimento econômico correspondente. Trata-se no fim das contas, da transformação do sistema tecnoeconômico.

EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA	DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO
Uma nova tecnologia entra na coleção de tecnologias ativas, na estrutura tecnológica e se torna um novo elemento desse conjunto. (ex.: o transistor)	São produzidos novos produtos ou serviços. (ex.: equipamentos e dispositivos auriculares, impossíveis com válvulas).
A nova tecnologia torna obsoletos antigas tecnologias presentes no corpo de tecnologias ativas (Ex.: as válvulas eletrônicas)	indústrias associadas às antigas tecnologias saem do mercado. Equipamentos de rádio podem ser produzidos utilizando baterias.
A nova tecnologia gera novas necessidades ou oportunidades para apoiar. As novas tecnologias e meios de produção. São denominados de nichos de oportunidade. (Ex.: as tecnologias de metalurgia necessárias para produzir o transistor)	A nova tecnologia demanda novas tecnologias. Novos problemas técnicos, econômicos e sociais podem ocorrer. Novas necessidades demandam novas tecnologias.
Se as velhas tecnologias desaparecem do coletivo de tecnologias ativas, as oportunidades a elas associadas também desaparecem.	Caso as tecnologias sejam desativadas, as indústrias correlatas igualmente o serão.
O novo elemento é disponível como componente potencial em outras tecnologias e outros elementos. (ex.: o transistor passa a ser utilizado em computadores eletrônicos).	A nova tecnologia provê um novo elemento, que pode ser utilizado em novas tecnologias. Pode surgir nova organização que contém esse elemento.

<sup>97</sup> Arthur, *The nature of Technology*. 217.

A economia como um todo se reajusta. Os custos e preços se ajustam, diminuem, e viabilizam novas tecnologias.	A nova tecnologia provoca mudança estrutural na economia.
---	---

**Tabela 1 - relaciona as fases de evolução tecnológica e transformações econômicas.**<sup>98</sup>

A Tabela 1, esquematiza a evolução do sistema tecnoeconômico. De cada uma dessas fases podem brotar evoluções “horizontais”, focos, que ocorrem tanto no âmbito da tecnologia (já discutido na seção correspondente) como no da economia. Novas empresas e indústrias, que geram novas demandas e soluções tecnológicas.

As fases 3 e 5 apresentam particular e grande potencial de desdobramentos, de mudanças estruturais, tal como ocorreu com o microcomputador e a produção de software. Nestas fases surgem novas organizações industriais e novos modos de produção. O aumento da produtividade e a consequente abertura de novos mercados demandam novas necessidades tecnológicas, de um lado, e mudanças estruturais na economia, de outro<sup>99</sup>. Cada uma das etapas da Tabela acima é potencialmente origem para um novo processo, um foco a partir do qual uma nova cadeia se desenvolverá. E esse mecanismo se desenrola de maneira não mecânica.

Aparentemente, a “máquina” se move por si só. Afinal, a criação endógena de riqueza é o insumo para maior criação, endógena, de riqueza. além do gradiente econômico, é necessário que haja um *ambiente* propício, conforme definido no início deste artigo, para que o processo de industrialização surja e se mantenha. Manter o ambiente, criando novas leis, novas estruturas educacionais e de pesquisa, novas instalações fabris, é uma atividade humana. Mas, não só o ambiente deve ser cultivado, ser cuidado, ser transformado para que novas fases de industrialização ocorram. É necessário que o *contexto*, que fornece o gradiente econômico, a matéria prima, a informação esteja atuante. Manter essa máquina funcionando de acordo com as expectativas colocadas no projeto exige esforço, que será discutido a seguir.

### **O desenho de um sistema tecnoeconômico**

Brian Arthur argumenta que a sociedade e a própria tecnologia, não só a economia, geram necessidades, e sugere, por ser mais abrangente, o termo *oportunidades*, ao invés de demandas, para nominar essas necessidades. A sociedade, seja através do Estado ou do mercado, deve buscar os meios, deve se esforçar, para aproximar as ofertas de tecnologia existentes das oportunidades econômicas para essas tecnologias.

A tecnologia ofertada somente só se transformará em riqueza e dará início ao processo descrito na seção anterior caso haja “oportunidades”. As forças de mercado e/ou as ações de Estado são necessárias nesta aproximação. As primeiras se limitam tipicamente a inova-

<sup>98</sup> William B. Arthur. *The Nature of Technology: What it is and How it Evolves* (London: Penguin Books, 2009): 198 - 199. 217

<sup>99</sup> Mudanças importantes e fundamentais na sociedade também foram induzidas pela mudança estrutural na economia. Surgiram as cidades industriais, que reuniam concorrentes, fornecedores, clientes e trabalhadores. Novas demandas tecnológicas surgiam destes novos ambientes.

ções que oferecem baixo risco. São aquelas cujas consequências a teoria ortodoxa é capaz de analisar, de prever seus impactos. Contudo, aquelas inovações que promovem mudanças estruturais escapam à análise convencional, pois, suas consequências não são visíveis por uma teoria baseada no equilíbrio. O Estado deve se ocupar da geração de ofertas de novas tecnologias bem como das oportunidades de utilização dessas novas tecnologias. Essas decisões fazem parte do projeto de industrialização. E deve aproximar as duas pontas: a oferta de tecnologias e as oportunidades para novas tecnologias.

Novamente, quando o presidente Biden anuncia investimentos da ordem de cinco trilhões de dólares para ativar e atualizar a indústria norte americana, ele está promovendo este encontro. A ação de Biden é também exemplar no sentido de buscar o desenvolvimento de novas formas de geração de energia: a busca de soluções para problemas gerados pela própria tecnologia.

Alimentado pelo gradiente econômico, o sistema tecnoeconômico evolui conforme a tabela apresentada, que é “repassada” continuamente. Novos sistemas tecnoeconômicos se formarão “sobre” o anterior. O ambiente, segundo as “três distâncias”, se modifica; o contexto se altera com novas tecnologias, materiais, informações e fontes de gradientes econômicos. Os novos sistemas tecnoeconômicos, que incluem os anteriores, apontam para o desenvolvimento econômico e tecnológico.

### Conclusões

A condução de um projeto de industrialização pode ser resumida na gestão (das transformações) do *ambiente* e (das transformações) do *contexto*, a partir de um projeto e de uma condição real. Esta condição é a evolução, o desdobramento, do sistema tecnoeconômico. Entender como evolui este sistema esse processo é fundamental para o projeto de industrialização.

De acordo com os mecanismos da termodinâmica fora do equilíbrio, assim como a floresta necessita da energia solar se desenvolver, se transformar e se diversificar, a evolução tecnoeconômica sustentável só pode suceder caso haja gradientes econômicos, com recursos públicos ou privados, que desloquem o sistema do equilíbrio e produzam as transformações estruturais, como fenômenos emergentes, do sistema tecnoeconômico.

Esta provisão de recursos não se resume ao fomento à inovação, que é importante, pois representa a oferta de novas tecnologias. Tampouco se resume ao apoio a indústrias, sejam grandes ou pequenas. O projeto de industrialização de prever e prover os recursos, tal comovem fazendo o presidente Biden, necessários para que as duas pontas, a oferta e a procura, se unam. Um sistema tecnoeconômico ao ser submetido a gradientes econômicos faz emergir fenômenos tecnoeconômicos, que as novas indústrias as novas tecnologias e a criação de riqueza.

O modelo proposto torna visíveis os mecanismos que regem as mudanças estruturais e, portanto, é eficaz para orientar a formulação e acompanhamento de políticas de industrialização e de inovação. Além disso, ao destacar as transformações e seus mecanismos, o mo-

delo dirige nosso olhar para os momentos de mudança, de bifurcação, e, portanto, viabiliza a elaboração de perguntas adequadas para a construção de uma história da tecnologia.

Por fim, o conhecimento da dinâmica das transformações no sistema tecnoeconômico certamente reduzirá o “tamanho de nossa ignorância”.