

REVOLUÇÕES TECNOLÓGICAS E SISTEMAS COMPLEXOS: UM QUADRO TEÓRICO PARA ESTUDO DA DINÂMICA CENTRO-PERIFERIA

Lídia Magyar¹

RESUMO: O objetivo deste artigo é elaborar um quadro teórico que fundamente a investigação da dinâmica centro-periferia e suas transformações tecnológicas com a linguagem de sistemas complexos. Para isso, foi feita uma revisão sistemática de três vertentes: Perez e outros autores neoschumpeterianos que discutem as mudanças tecnológicas de longo prazo; Furtado, que apresenta a visão das forças expansivas vindas do centro e; Cohen e Levinthal, que formulam o conceito de capacidade de assimilação. Ao combinar esta literatura com a teoria de sistemas complexos, revisamos os avanços que já foram feitos e os desafios que esta agenda de pesquisa enfrenta.

Palavras-Chaves: Revoluções tecnológicas; Periferia; Sistemas complexos

ABSTRACT: The objective of this article is to develop a theoretical framework to underpin the investigation of center-periphery dynamics and their technological transformations using the language of complex systems. To this end, a systematic review was conducted of three strands: Perez and other neo-Schumpeterian authors who discuss long-term technological changes; Furtado, who presents the view of expansive forces coming from the center; and Cohen and Levinthal, who formulate the concept of absorptive capacity. By combining this literature with complex systems theory, we review the advances that have been made and the challenges this research agenda faces.

Key-words: Technological revolutions, Periphery, Complex systems

Área temática: Economia.

¹ Doutoranda em Economia no CEDEPLAR/UFMG. E-mail: lidia.magyar@gmail.com

INTRODUÇÃO

As mudanças tecnológicas na dinâmica de longo prazo do capitalismo foram amplamente estudadas por teóricos neo-schumpeterianos. A contribuição deles foi importante para consolidar a inovação tecnológica como elemento central que empurra o crescimento econômico, além de embasar teoricamente políticas nacionais de catch-up (alcançamento tecnológico) e de industrialização.

Na literatura que versa sobre as transformações de longo prazo no sistema capitalista global, Celso Furtado, por sua vez, também foi um importante teórico do catch-up. Em sua fase mais madura, apresentou o conceito de “metamorfoses do capitalismo”. Sob esta definição, o autor entende que o capitalismo é um sistema econômico dinâmico e flexível, capaz de redefinir permanente e persistentemente os desafios para a periferia dentro da divisão internacional do trabalho (Furtado, 2002).

A noção de metamorfoses do capitalismo furtadiana pode ser integrada ao arcabouço teórico de sistemas complexos. Como será visto adiante, a teoria de complexidade econômica descarta os pressupostos neoclássicos convencionais de agentes homogêneos e racionais que tomam decisões e alcançam um sistema em equilíbrio estável. A complexidade econômica assume que os agentes são heterogêneos, possuem informação imperfeita e procuram se adaptar ao ambiente que se encontram o tempo todo. Por isso, pode ser que o equilíbrio nunca seja alcançado (ARTHUR, 2021).

É exatamente por retratar a economia de forma orgânica, dinâmica, como algo que está sempre evoluindo – de forma não previsível e determinística – que a teoria de sistemas complexos se aproxima da lógica de Furtado. O próprio sistema centro-periferia pode ser entendido como um sistema complexo, já que é formado por agentes heterogêneos que interagem entre si de forma não-linear gerando feedbacks positivos e negativos um para o outro.

Alguns trabalhos como de Marques (2015), Ribeiro et al. (2006), Ribeiro et al. (2017), Cimini et al. (2020) e Melo (2023) já fizeram avanços importantes demonstrando que: i) a periferia está se tornando cada vez mais complexa; ii) o sistema capitalista no centro tende a apresentar um comportamento auto-organizado, enquanto a periferia tende a apresentar comportamento aleatório.

Com o intuito de embasar teoricamente a agenda de pesquisa que busca ampliar a aplicação a linguagem de sistemas complexos para análise da dinâmica centro periferia, o objetivo deste artigo é propor um diálogo entre as literaturas neo-schumpeterianas de revoluções tecnológicas, sistemas complexos e a contribuição furtadiana de sua percepção do sistema centro-periferia. Para isso, este trabalho conta com três seções, além desta introdução e da conclusão.

As seções 1 e 2 apresentam as duas partes do quadro teórico que este artigo propõe discutir. A primeira seção é subdividida em quatro partes e busca realizar um diálogo entre três tradições tecnológicas, à maneira sugerida por Albuquerque (2023). Elas sintetizam as forças expansivas vindas do centro dinâmico do capitalismo global, enquanto a periferia assimila as tecnologias geradas exogenamente a ela.

A segunda seção versa sobre a teoria de sistemas complexos: como ela surgiu e como ela pode ajudar a compreendermos a dinâmica econômica de longo prazo?

Por fim, uma vez apresentado todo o quadro teórico, a terceira seção busca debater os avanços na literatura feitos até agora. Neles, o nosso quadro teórico pode ser aplicado e algumas reflexões pertinentes surgem.

1. REVOLUÇÕES TECNOLÓGICAS E A DINÂMICA CENTRO-PERIFERIA

1.1. As revoluções tecnológicas

Nikolai Kondratiev é um precursor e, ao mesmo tempo, contemporâneo de Schumpeter. O trabalho do economista russo desempenhou um papel importante na elaboração schumpeteriana. Com o seu artigo *“The Long Waves in Economic Life”* (1926) ele ficou conhecido pela apresentação da hipótese de ondas longas no desenvolvimento capitalista. Uma onda é um movimento de expansão seguido de depressão, ocorridas uma seguida da outra. Este autor aplicou um novo método estatístico com o objetivo de provar a existência destes padrões de comportamento. Com base em diversas séries temporais - preços, produção, salários, entre outros - foi possível notar a existência de três ondas longas. O autor levantou a duração aproximada, as datas de ascensão e queda e as mudanças tecnológicas associadas a cada uma (Kondratiev, 1926).

Schumpeter endossa e incorpora a elaboração do Kondratiev em sua explicação sobre o papel da tecnologia nas ondas longas. Em *“Teoria do Desenvolvimento Econômico”* (1911) já estava claro que a introdução de inovações determina a dinâmica cíclica da economia. Em *“Business Cycles”* (1939), é investigado as particularidades das inovações e suas tipologias. Schumpeter percebe que nem todas as inovações são iguais: algumas são mais importantes do que outras; algumas demoram mais para ser absorvidas do que outras. Se os ciclos são dados pela introdução de inovações, então cada ciclo é diferente do outro, já que a economia irá gestar e absorver a nova tecnologia em intervalos de tempo peculiares. O economista austríaco avançou no debate trazendo o seu foco para a descrição qualitativa das três ondas longas kondratievianas.

Dessa forma, Schumpeter e Kondratiev foram capazes de *“observar fenômenos estatísticos, históricos e econômicos que exigiram novas [...] metodologias para captar a pulsação da vida*

econômica no capitalismo” (Albuquerque, 2019, p. 62) logo nas décadas iniciais do século XX. Do final da Segunda Guerra Mundial até os anos 1970, os países centrais viveram uma fase de expansão econômica. Com a crise decorrente da desaceleração do ritmo de crescimento econômico e do aumento de desemprego, a discussão sobre ondas longas no capitalismo é estimulada novamente. Chris Freeman, Richard Nelson, Nathan Rosenberg, Keith Pavitt, Giovanni Dosi e Carlota Perez são alguns dos autores que representam a ressurgência do interesse nas publicações de Schumpeter e são conhecidos como neo-schumpeterianos. Nos próximos parágrafos, será feita uma breve taxonomia de conceitos concebidos por eles.

A instigação pelos movimentos das ondas longas fomentou os estudos sobre processos de mudança tecnológica. Para isso, foi preciso estudar a inovação dentro de um sentido dinâmico (Perez, 2010, p. 186). Dosi (1982) fez uma importante contribuição buscando compreender por que algumas inovações tecnológicas prosperam - e outras não - e quais são as regularidades no processo de geração e progresso delas. Neste texto, o autor introduz os conceitos de *paradigma tecnológico* e de *trajetória tecnológica*. Podemos entender um paradigma tecnológico como um padrão de solução para determinados problemas tecnológicos, baseado em determinados princípios das ciências naturais e em determinados materiais tecnológicos. Já a trajetória individual de uma tecnologia pode ser entendida como o “progresso” de um paradigma ao longo do tempo (Dosi, 1982, p. 152).

Assim, fica claro que nem todas as inovações possuem o mesmo efeito. A diferença entre inovações *incrementais* e inovações *radicais* são ideias introduzidas por Rosenberg (1976), Patel e Pavitt (1994). As inovações incrementais ocorrem na trajetória de progresso de uma inovação radical de maneira relativamente contínua. Elas geralmente não geram efeitos dramáticos no sistema e podem até passar despercebidas. As inovações radicais, por sua vez, são eventos descontínuos e trazem consigo mudanças estruturais. Em termos de impacto no agregado da economia, elas podem ser relativamente pequenas e localizadas, como foi o caso do nylon e da pílula anticoncepcional. Mas caso essa inovação radical esteja atrelada ao surgimento de novas indústrias e serviços, ela pode trazer grande impacto no agregado. As inovações radicais possuem um papel importante na determinação de novos investimentos e do crescimento econômico, mas a expansão depende das inovações incrementais (Freeman e Perez, 1988).

Freeman e Perez (1988) é um texto teórico que incorpora “a dinâmica das inovações tecnológicas no centro dos movimentos de longo prazo da econômica capitalista” (Albuquerque, 2019, p. 64). Além disso, ele já absorve as elaborações sobre paradigmas tecnológicos, trajetória tecnológica e inovações incrementais e radicais mencionadas anteriormente. No entanto, os autores utilizam a expressão paradigma econômico-tecnológico (“*techno-economic paradigm*”) ao invés do paradigma tecnológico empregado por Dosi em 1982. Esta escolha ocorre para explicitar que as

mudanças envolvidas quando um novo paradigma surge vão além das tecnológicas e afetam também a estrutura de custos de todos os insumos da produção e distribuição do sistema. Dessa forma, trata-se de um conceito mais amplo, pois refere-se a uma combinação de produtos e processos interrelacionados com inovações técnicas, organizacionais e administrativas, representando assim um salto de produtividade significativo para toda ou quase toda a economia. Isto é, emergem vantagens técnicas e econômicas e, portanto, novas oportunidades de investimento. Cada paradigma tecno-econômico possui um insumo ou um conjunto de insumos que é considerado o seu “fator-chave”. Os fatores-chaves são caracterizados por possuírem: i) baixos custos; ii) oferta abundante por longos períodos de tempo; iii) alto potencial de uso ou incorporação em diversos produtos e processos na economia.

Feitas estas ponderações, define-se uma revolução tecnológica como uma mudança no paradigma tecno-econômico. Isto é, trata-se de uma mudança no sistema tecnológico tão profunda que seus efeitos reverberam no comportamento de toda a economia. Dito isso, os autores organizam um painel histórico das quatro revoluções tecnológicas ocorridas até 1988, utilizando uma periodização inspirada em Kondratiev (Freeman e Perez, 1988, p. 50-57). O painel possui dezessete colunas e cinco linhas, sendo cada linha representativa de uma revolução tecnológica. As colunas dizem respeito às características de cada revolução, como sua periodização aproximada, os fatores chaves, suas limitações, formas de organização das firmas e de competição, países líderes tecnológicos e países com indústrias novas crescendo, regimes nacionais e internacionais de regulação, entre outros. A quinta revolução tecnológica ainda é tratada como meramente especulativa neste texto. Dessa forma, ao fazer esta síntese, o texto também pode ser considerado de história econômica (Freeman e Perez, 1988; Albuquerque, 2019).

Assim como Schumpeter, Freeman e Perez (1988) são simpáticos às noções de ondas longas de Kondratiev – isto é, focam a análise dos altos e baixos do crescimento econômico. Perez (2010), por sua vez, rompe com o autor russo e propõe focar no processo de difusão de cada revolução tecnológica e seus impactos transformativos em todos os aspectos da economia e sociedade – inclusive o ritmo de crescimento. Esta reorientação levou a uma periodização diferente das revoluções tecnológicas. A data que interessa para esta abordagem é o ano em que ocorreu o *big-bang* da revolução tecnológica. O *big-bang* é um evento tecnológico que abre um universo de oportunidades de inovações rentáveis. Desta forma, Perez avança no debate fazendo uma tabela elencando quatro características das cinco revoluções tecnológicas: o seu nome popular, o *big-bang* que inicia a revolução, o ano que o *big-bang* ocorreu e os principais países envolvidos (ver tabela 1).

Sob o ponto de vista do trabalho de Perez (2010), é possível identificar uma série de regularidades nos padrões de difusão tecnológica. Não só isso, como se torna mais plausível analisar

a interconexão entre as tecnologias de cada revolução. Ou seja, se torna possível analisar como as tecnologias que surgiram em seguida modificaram as anteriores. Esta abordagem é possível pois, diferente de Kondratiev e Schumpeter, o foco dela não é analisar os movimentos de altos e baixos no crescimento econômico, e sim o processo de difusão das tecnologias no tempo e no espaço.

Assim como Perez, Nathan Rosenberg adotou uma postura cética sobre a teoria das ondas longas, cobrando elaborações mais aprofundadas a respeito das causalidades, temporalidade, repercussões econômicas das inovações e recorrência das ondas. Sob a influência destas reflexões, emerge o conceito de “general purpose technologies” (GPTs). Helpman (1998) afirma que uma inovação radical é concebida como uma GPT se ela tem potencial de uso difundido em diversos setores, de forma a alterar drasticamente os seus modos de operação. O autor ainda complementa que uma GPT se caracteriza por possuir: i) muito escopo para melhorias iniciais; ii) usos variados diversos; iii) aplicabilidade em muitas partes da economia e; iv) forte complementariedade com outras tecnologias. A autoria da expressão de GPTs é atribuída à Bresnahan e Trajtenberg (1995) (Albuquerque, 2021, p. 65-66).

Tabela 1 – Os cinco “*Big Bangs*”

Revolução tecnológica	Nome popular	“ <i>Big Bang</i> ” inicial	Ano	País líder
1 ^a	Revolução industrial	Moinho de Arkwright é aberto em Cromford	1771	Grã-Bretanha
2 ^a	Era do vapor e das ferrovias	Teste do Rocket, locomotiva a vapor na ferrovia Liverpool-Manchester	1829	Grã-Bretanha (espalhando para a Europa e EUA)
3 ^a	Era do aço, da eletricidade e da engenharia pesada	Carnegie Bessemer, fábrica de aço é inaugurada em Pittsburg, PA	1875	EUA e Alemanha avançam para a fronteira tecnológica, ultrapassando a GB
4 ^a	Era do petróleo, do automóvel e da produção em massa	Primeiro modelo-T sai do papel na Ford	1908	EUA (disputando com a Alemanha a liderança), posterior difusão para a Europa

5 ^a	Era da informação e da telecomunicação	Microprocessador da Intel é anunciado em Santa Clara, CA	1971	EUA (posterior difusão para a Europa e Ásia)
----------------	--	--	------	--

Fonte: Perez (2010, p. 190).

Dosi e Nelson (2010, p. 66) apontam que as GPTs são diferentes do conceito de paradigma econômico-tecnológico (“techno-economic paradigm” ou TEP) de Perez (2010) e Freeman e Perez (1988), posto que o segundo representa uma definição mais “macro”. Um TEP pode ser entendido, portanto, como uma constelação de diversos GPTs. Perez (2010, p. 194) estabelece que um TEP é um conjunto de práticas bem-sucedidas e lucrativas em termos de escolha de insumos, de métodos, tecnologias, estruturas organizacionais, modelos de negócio e estratégias.

A elaboração das GPTs, por sua vez, possibilita captar a múltiplas fontes para inovações radicais, que tem como subproduto um conjunto maior de possibilidades de feedbacks positivos entre diversas instituições em diversos países. Empiricamente, é um elemento novo não captado anteriormente, expresso através de um número maior de invenções com impactos revolucionários em setores econômicos específicos. Dessa forma, as GPTs, podem se justapor temporalmente e se manter espacialmente distantes (Albuquerque, 2021, p.68).

A introdução da definição das GPTs na literatura pode ser vista como um refinamento teórico, pois possibilita examinar o papel da complementariedade entre as tecnologias e a importância da complementariedade entre indústrias. Dessa forma, o escopo das mudanças tecnológicas radicais é ampliado, ao mesmo tempo que mantém a noção de que as tecnologias se complementam e surgem de forma combinada e interdependente. Esta elaboração descreve um cenário mais caótico e turbulento da economia no longo prazo na medida em que enfatiza as múltiplas de fontes para inovações radicais, expressas em um número maior de invenções de grande impacto em setores específicos² (Albuquerque, 2021, p. 67).

Até agora, vimos em Perez (2010) que o *big-bang* é marcado pela introdução de uma inovação radical no mercado, sendo entendido como inaugurador de uma série de eventos. Assim como as GPTs, estas categorias de análise possibilitam investigar a difusão das tecnologias de maneira mais completa, já que estes conceitos concebem a possibilidade de justaposição temporal. Isto é, uma mesma tecnologia pode apresentar múltiplos efeitos ao mesmo tempo, dependendo das características da região ou da firma em que ela é introduzida.

² O aspecto turbulento da economia fica evidente ao analisar a literatura sobre o potencial da *www* na geração de novas tecnologias. Devido aos resultados e dos eventos desencadeados pela invenção desta tecnologia em 1991 – com presença de efeitos para frente para trás nas cadeias industriais econômicas – Albuquerque (2019, p. 70) e Pinheiro (2022) defendem que a *www* é uma inovação radical e GPT, o que representaria o sexto *big-bang*.

1.2. Furtado: forças expansivas e metamorfoses do capitalismo

Em consonância com Perez (2010), para a elaboração de Celso Furtado é fundamental notar que a força expansiva irradiada no centro dinâmico do capitalismo é, essencialmente, o progresso tecnológico. No debate sobre a mudança tecnológica de longo prazo, Furtado introduz o ponto de vista da periferia. Enquanto o crescimento econômico dos países centrais é resultado da acumulação de novos conhecimentos científicos e do avanço em aplicações deste conhecimento, o dos países subdesenvolvidos é resultado da assimilação das tecnologias já existentes. A força expansiva do centro na Primeira Revolução Tecnológica foi tão forte que redesenhou a estrutura da economia global, levando à realocação dos recursos e de como eles eram usados. Nas economias periféricas, a mudança do sistema de produção foi induzida externamente (Furtado, 1987).

Assim, o primeiro núcleo industrial a irradiar força expansiva é a Inglaterra e o Reino Unido. O Reino Unido representou, durante aproximadamente 100 anos, a vanguarda tecnológica do sistema global. No entanto, entre o final do século XIX e o começo do século XX, a hegemonia inglesa foi transferida para os Estados Unidos, país dotado de grande capacidade tecnológica. Os motivos pelos quais esta transição se deu não cabem neste artigo, mas Furtado nota que o “sistema econômico internacional que surgiu sob a hegemonia norte-americana é essencialmente distinto daquele que se formara no século XIX sob a preeminência britânica” (Furtado, 1986). Enquanto o poderio britânico se sustentava na divisão internacional do trabalho, os EUA basearam sua expansão através da projeção internacional de grandes empresas (Furtado, 1986).

Dessa forma, o autor nota que o quadro histórico moldado pela revolução industrial é reconfigurado de maneira persistente. As forças expansivas da dinâmica capitalista redesenham permanentemente a estrutura da economia global. Ou seja, o sistema não permanece o mesmo. Ao receber o título de *Doutor Honoris Causa* pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2002, Furtado dá um discurso intitulado “Metamorfoses do capitalismo” (Furtado, 2002). Nesta fala, ele apresenta uma espécie de maturação de sua trajetória intelectual voltada à sistematização de mudanças do sistema econômico global. Em todas essas transformações o subdesenvolvimento e a dinâmica centro-periferia se mantiveram. O perfil da dependência externa mudou, mas ainda persiste. As transformações tecnológicas dadas pelo centro modificaram o cenário econômico enquanto a periferia reconfigurava permanentemente seus esforços de assimilação delas (de Paula e Albuquerque, 2020).

1.3. Cohen e Levinthal: capacidade de assimilação

Como foi visto com Furtado, a forma de propagação do progresso tecnológico constitui a raiz da explicação pela qual existem diferenças estruturais enormes entre países desenvolvidos e

subdesenvolvidos. Neste arcabouço teórico, a periferia não gera tecnologias, mas apenas assimila as que são geradas no centro. O conceito de assimilação tecnológica foi aprofundado por Cohen e Levinthal (1989, 1990). A pesquisa deles foi feita pensando na capacidade de assimilação de tecnologia de firmas estado-unidenses e faz uma importante contribuição ao refletir sobre a capacidade de absorção tecnológica delas. Esta “absorção” pode ser entendida como um tipo especial de aprendizado - aquele que a firma faz ao adquirir conhecimento externo. Ter um setor pesquisa e desenvolvimento interno à firma corrobora na sua capacidade de assimilar conhecimento externo. Para ter capacidade de absorver conhecimento, a firma deve ser também capaz de gerar dele. Em outras palavras, um conhecimento basal prévio é necessário para a firma reconhecer que existe um outro conhecimento externo mais avançado disponível para uso. Por isso, os autores afirmam que a pesquisa e desenvolvimento possui duas faces: a de gerar conhecimento e a de ampliar a capacidade de absorvê-lo (Albuquerque, 2023).

Originalmente o conceito é destinado ao estudo do sistema de inovação estado unidense, mas Albuquerque (2023) argumenta que ele se tornou essencial para a compreensão dos movimentos de catch-up na periferia. Ou seja, com este conceito passa a ser possível investigar o processo de assimilação de tecnologias e conhecimento em firmas de regiões ou países periféricos. Albuquerque (2023) também sugere que o conceito introduzido por Cohen e Levinthal pode ser integrado com o de Freeman (1982) de sistemas nacionais de inovação:

“Since national innovation systems and their institutions depend on political initiatives, a connection with analysis of political institutions seems to be necessary to understand preconditions for absorptive capacity. Analyzing the spread of mechanize textile technologies, Beckert (2014, p. 156) highlights that “the map of modern states corresponds almost perfectly to the map of the regions that saw early cotton industrialization””.

O sistema de inovação nacional, através das universidades e firmas, busca meios de absorver conhecimento externo. Assim, pode-se entender que a absorção de tecnologia é desigual entre os países, já que cada sistema nacional de inovação possui suas características particulares. Em suma, a difusão de tecnologia entre os países não é uniforme. A própria literatura de sistemas de inovação é repleta de exemplos de como países (que buscavam fazer catch-up) constituíram suas capacidades de absorção (China, Coreia do Sul, Rússia, etc).

1.4. A combinação das forças expansivas e assimilatórias

Inspirada nos trabalhos de Kondratiev e Schumpeter, Perez (2010) mostra a dinâmica de transformações tecnológicas ao longo dos anos, associado ao crescimento econômico liderado pelas inovações introduzidas no mercado. Para inclusão da periferia no quadro apresentado pela autora (ver

tabela 1), Albuquerque (2023) sugere a integração com as interpretações de Furtado e Cohen e Levinthal.

Por um lado, Furtado contribui ao acrescentar a camada global, isto é, da dinâmica centro-periferia, dentro das mudanças tecnológicas de longo prazo. Com ele, podemos ver que o centro é dotado da força expansiva impulsionada pela inovação tecnológica e possibilitada através da acumulação prévia de capital. Cabe à periferia identificar, assimilar e explorar o conhecimento tecnológico gerado no centro.

Para Cohen e Levinthal, por outro lado, ao formalizar o conceito de capacidade de absorção, colaboram para compreender as dimensões necessárias para a assimilação tecnológica na periferia. O próprio modelo proposto por eles permite uma integração teórica com o conceito de sistemas de inovação, extrapolando assim a interpretação dos autores não só para firmas, mas também para países.

A combinação destas três contribuições fundamenta a análise dinâmica que este artigo propõe para as revoluções tecnológicas e o sistema centro-periferia. Este quadro teórico é capaz de incorporar explicações para a propagação de novas tecnologias em todos os estágios do desenvolvimento. A partir das elaborações de Perez, Furtado e Cohen e Levinthal, é possível lidar com mudanças dinâmicas nas forças expansivas do capitalismo e na capacidade de absorção da periferia. Cada big bang representa a propagação de uma tecnologia em uma escala global. A periferia, por sua vez, é composta por países em diversos estágios diferentes de formação do sistema nacional de inovação. As forças assimilatórias da periferia são a principal forma de propagação das tecnologias irradiadas pelos big bangs (Albuquerque, 2023). A capacidade de absorção da periferia depende das condições institucionais e políticas do seu sistema nacional de inovação.

Entre o primeiro e o último big bang, a presença de firmas e universidades na periferia mudou, com a construção de uma capacidade maior de absorção. Ao mesmo tempo, os países periféricos absorveram o conhecimento de maneira desigual. O impacto dos big bangs não é sentido da mesma forma por toda a periferia. O resultado é uma superposição e justaposição de diversos ciclos econômicos de diferentes durações. A periferia é, essencialmente, heterogênea, em decorrência de suas singularidades nas suas capacidades de absorção. Existem diversos processos de mudança tecnológicas ocorrendo simultaneamente em ritmos diferentes. No agregado, a evolução do capitalismo é dada em um cenário caótico de dinâmicas superpostas.

Este fenômeno não é apenas teórico, já que podemos encontrar evidências empíricas em Ribeiro et al (2017), através da decomposição da série da taxa de lucro dos EUA entre 1870 e 2011. Neste artigo, obtém-se a superposição de um conjunto de ciclos na dinâmica de longo prazo dos EUA no período analisado. Com um importante peso estatístico existem ciclos de 23, 20, 35 anos e um

conjunto de ciclos menores ao mesmo tempo. Com menos significância estatística existe um ciclo de 70 anos. Ou seja, um único ciclo praticamente não existe, mas sim a combinação de diversos ciclos de durações distintas, que “parece ser recorrente da introdução simultânea de diversas inovações tecnológicas de impactos diferenciados”³ (Albuquerque, 2021, p. 68).

A revelação empírica de diversos ciclos simultâneos de Ribeiro et al. (2017) dialoga com Slutsky (1927), que já havia suspeitado a existência de um padrão de ciclos de diferentes oscilações sobrepostos quanto trabalhou com Kondratiev no Instituto de Conjectura de Moscow. Portanto, apesar dos recursos computacionais limitados à época, pode-se afirmar que é possível encontrar noções de complexidade em Slutsky e Kondratiev (Albuquerque, 2023; Franco et al. 2022).

2. SISTEMAS COMPLEXOS

2.1. Uma nova forma de entender a economia

A teoria dos sistemas complexos possui raízes nos desenvolvimentos contemporâneos na física e na química, em particular termodinâmica de não-equilíbrio (Cerqueira, 2002, p. 68). O que é preciso saber para compreender do que ela se trata é o seguinte: um sistema pode ser categorizado de várias maneiras. Uma delas diz respeito à troca com o ambiente. Um sistema é considerado aberto se ele efetua troca de matéria, energia ou informação com o ambiente que está inserido, enquanto o fechado não troca. Por isso, os fechados tendem a um equilíbrio correspondente a um grau máximo de aleatoriedade (entropia). Um exemplo seria uma caixa com moléculas de gases hermeticamente fechada. Os sistemas abertos, por sua vez, podem não tender ao equilíbrio, mas sim a estados estacionários. Um mesmo estado pode ser mantido durante um tempo devido à troca de matéria e energia com o ambiente. Um exemplo deste último seria o sistema climático, composto por diversas massas de ar com diferentes densidades, temperatura e pressão. Assim, quando um sistema aberto é submetido a interações com o seu ambiente, ele tende a se modificar em resposta. Conforme as interações se intensificam, o sistema passa por um momento de transição que pode resultar em múltiplos estados estacionários. É como se o sistema se encontrasse em uma bifurcação e precisasse escolher para qual ramo irá seguir⁴. Trata-se de um sistema essencialmente indeterminado e imprevisível. A termodinâmica de não-equilíbrio se aplica a sistemas abertos.

Os sistemas podem também ser categorizados como lineares ou não-lineares. Tradicionalmente a física lidava com sistemas lineares, isto é, que reagem de maneira proporcional à intensidade da perturbação que é submetida. Recentemente, a física passou a lidar também com os não-lineares, isto é, com aqueles que reagem de maneira desproporcional à intensidade da perturbação

³ Esta observação é importante para possibilitar a caracterização do funcionamento da economia como um sistema complexo.

⁴ Uma ilustração desta bifurcação é apresentada em Saviotti e Metcalfe (1991, p. 7).

inicial. Como indaga o clássico texto inaugural de Lorenz (1972) sobre sistemas climáticos: “poderia o bater das asas de uma borboleta no Brasil causar um tufão no Texas?⁵”.

A esta altura, importa assinalar que nem todo sistema não-linear é aberto. Existem sistemas fechados não-lineares, como um pêndulo em um ambiente hermeticamente fechado à vácuo (sem atrito). Assim como existem sistemas fechados não-lineares, como é o caso da caixa gasosa hermeticamente fechada, já que suas moléculas se movimentam de maneira caótica e aleatória. Mas a tendência observada na natureza é que sistemas abertos sejam não-lineares. Os sistemas complexos são aqueles que são abertos e não-lineares, sendo que esta não-linearidade se dá não apenas pelo formato da equação que os regem, mas devido “à forma com que os entes que o compõem se organizam” (Ribeiro, 2022, p. 166). Em outras palavras, os elementos indivisíveis que compõem o sistema complexo interagem entre si gerando “organizações diferentes em escala de agregação diferentes”. Sob esta definição, um gás confinado em uma caixa não é um sistema complexo por que não existem escalas de agregação diferentes – os átomos e moléculas colidem entre si de maneira aleatória, mesmo se forem submetidos à uma agitação térmica - mas o sistema climático é.

Outros exemplos de sistemas complexos que podemos citar são: o corpo humano, o cérebro, o sistema imunológico, as células, a cadeia alimentar, uma colônia de insetos, a floresta amazônica e a *World Wide Web* (Mitchell, 2009; Ribeiro, 2022). O que eles têm em comum? A presença de propriedades emergentes:

“como o sistema apresenta essas organizações diferentes em escalas de agregação diferentes, tendo formas de interação entre os elementos específicas para cada nível de agregação, teremos também comportamentos diferentes quando olhamos o sistema nessas diferentes agregações. [...] Chamamos de propriedades emergentes esses comportamentos que surgem quando o sistema é estudado de forma mais agregada e que não existem quando o sistema é estudado de forma mais desagregada. [...] A dinâmica do sistema complexo será então definida por essa intrincada cadeia de relação entre os seus entes indivisíveis e as estruturas mesoscópicas que surgem à medida que ele vai sendo agregado até chegarmos ao sistema macroscópico. É essa intrincada cadeia de interações que leva à não linearidade do sistema” (Ribeiro, 2022, p. 167-8).

Uma característica importante nos sistemas complexos é a existência de avalanches. Elas podem ser entendidas “como uma mudança de grande escala em um curto período de tempo na série temporal do sistema complexo”. A avalanche existe devido ao alto grau de interação entre os elementos em diversos níveis de agregação.

⁵ Traduzido do original em inglês.

Feitas essas ponderações, é notável como a teoria de sistemas complexos pode ser aplicada em diversas áreas do conhecimento. Seus conceitos são vistos principalmente na física, química e biologia, mas também é possível trazê-los para as ciências sociais e econômicas. Em um sistema econômico, o elemento indivisível pode ser entendido como as pessoas. Estes indivíduos podem se agregar em empresas, governos, universidades, países e intermediar suas relações através de mercados e leis.

“No entanto, o sistema econômico apresenta uma grande peculiaridade que diferencia a sua dinâmica dos demais sistemas complexos vindos da física, que é o fato de o ente indivisível da economia pensar e ter intencionalidade. Desse modo, ele pode mudar dinamicamente o seu comportamento como resposta a alguma alteração que houve no sistema econômico” (Ribeiro, 2022, p. 174).

Não só o agente individual, mas isto também se aplica às organizações de maior grau de agregação. “Com essa peculiaridade do sistema econômico, que o diferencia dos demais sistemas complexos estudados na física, temos uma limitada capacidade de fazer projeções futuras nesse sistema através de extrapolações da dinâmica passada” (Ribeiro, 2022, p.179).

Como é possível verificar pelos elementos apontados acima, a análise da economia sob a ótica de sistemas complexos se situa longe da noção de equilíbrio da economia neoclássica. Enquanto estes desenvolvimentos se davam na física, alguns economistas manifestavam incômodos em relação à teoria econômica convencional. Sob a perspectiva da teoria de sistemas complexos, pode-se argumentar que a teoria neoclássica apresenta limitações teóricas, pois ela não estuda os desdobramentos dos padrões de comportamento adotados pelos agentes. Assume-se que, uma vez no equilíbrio, os agentes não são induzidos a tomar outro tipo de ação. Em suma, debruça-se sobre padrões estáticos que resultam em equilíbrios estáveis (ARTHUR, 1999).

Dessa forma, a teoria econômica convencional passou a ser vista por alguns economistas com insuficiências teóricas para análise de determinados problemas. Assim surge motivação para a convocação de economistas com o intuito de “discutir a ideia da economia como um sistema complexo e em evolução⁶” (Arthur, 2010, p. 150). A pedido de John Reed do Citibank, Kenneth Arrow convidou dez economistas e Philip W. Anderson, representante dos físicos, convidou mais dez cientistas da física, biologia e ciências da computação. Neste contexto, o Instituto Santa Fe (*Santa Fe Institute* ou SFI) fundou o seu programa de pesquisa “*Economy as an Evolving, Complex System*” em 1988 após a reunião destes pesquisadores e cientistas motivados a pensar novas maneiras de se compreender problemas econômicos⁷. Conforme relata Arthur (2010), algumas ideias já borbulhavam

⁶ Traduzido do original em inglês.

⁷ Para se aprofundar na história da fundação do ISF e da complexidade enquanto ciência, ver Fontana (2010).

nas ciências naturais e esperava-se que este encontro pudesse estimular o pensamento da economia de novas maneiras.

Em oposição aos pressupostos irrealistas e simplistas praticados pela teoria convencional, foi criada esta nova abordagem que pensa como ações, estratégias e expectativas dos agentes reagem (talvez até endogenamente) aos seus próprios padrões de comportamento. Para Arthur (1999):

“[...] I want to argue that this movement is not a minor ad junct to neoclassical economics; it is something more than this. It is a shift from looking at economic problems at equilibrium to looking at such problems out of equilibrium, a shift to a more general economics - to a non-equilibrium economics”.

O autor também contextualiza que a complexidade, em termos gerais, não é uma ciência, mas sim um movimento dentro da comunidade científica, que estuda como os elementos que interagem dentro de um sistema criam padrões e como estes padrões, por sua vez, fazem os elementos mudarem ou se adaptarem em reação a eles. Por isso, é um tópico multidisciplinar, que pode ser aplicado para o entendimento não só de sistemas econômicos, mas também outros, como biológicos e físicos (Arthur, 2021).

É central para o nosso quadro teórico o abandono o pressuposto de equilíbrio – entendido como o resultado agregado coerente com o comportamento dos agentes e sem incentivo para mudanças – e partir da ideia que a economia está fora do equilíbrio e aberta a mudanças. As premissas que assumem racionalidade dos agentes e informação perfeita também são rejeitadas. Um dos motivos para isso é nossa compreensão do papel da inovação tecnológica dentro do sistema capitalista (ARTHUR, 2015). Como vimos na seção anterior, a mudança tecnológica é entendida como uma fonte de perturbações para o sistema. Assim, a economia passa a ser vista como uma ecologia de crenças, princípios organizacionais e comportamentos que estão sempre mudando e se adaptando ao ambiente (ARTHUR, 2021).

2.2. Modelos computacionais de simulação

Com o intuito de captar o comportamento dos agentes neste ambiente de incertezas e em constante evolução, a complexidade adota a abordagem algorítmica. Este tratamento permite admitir que os agentes não necessariamente agem de maneira idêntica o tempo todo (ARTHUR, 2010). Além disso, o emprego de algoritmos para modelagem de problemas econômicos permite assumir funções não-lineares, já que são usados métodos computacionais para tal (ARTHUR, 2021). Não-linearidades aparecem com frequência em sistemas complexos, e muitas vezes na forma de feedbacks positivos. Na economia, feedbacks positivos se manifestam através de retornos crescentes (Arthur, 1999, p. 108). A teoria econômica convencional geralmente admite retornos decrescentes, para que um único

e previsível equilíbrio seja alcançado. Assumir retornos crescentes geram consequências diferenciadas, que incluem: múltiplas soluções potenciais; resultados não previsíveis e que não são os mais eficientes; presença de *lock-in*, trajetórias dependentes e assimetrias. Estes fenômenos também são observados no estudo da física não-linear, onde feedbacks positivos se fazem presentes.

Sendo assim, as situações com presença de retornos crescentes devem ser modeladas não como problemas estáticos e determinísticos, mas sim como processos dinâmicos baseados em eventos aleatórios e não-linearidades. Isto implica que, um mesmo processo pode às vezes ter um resultado e em outra ocasião (sob as mesmas condições), um desfecho distinto. Não há nada que garanta o mesmo resultado sob as mesmas condições. Disto, podemos inferir que, economias inicialmente iguais, com setores importantes apresentando retornos crescentes, não necessariamente seguem a mesma trajetória. Mecanismos de retornos crescentes também podem elucidar como algumas economias ficam presas (*locked-in*) em trajetórias de desenvolvimento inferiores e difíceis de sair (ARTHUR, 1990).

Modelos computacionais que utilizam algoritmos também podem ser utilizados para abordar a questão das expectativas dos agentes, criando um mercado artificial para simulações. A hipótese de expectativas racionais é renunciada pois ela contém uma indeterminação intrínseca: assume-se que os agentes deduzem com antecedência qual será o modelo de previsão adotado pelos outros agentes e que todos sabem como usar este modelo (ARTHUR, 2010). Um exemplo ilustrativo desta indeterminação é o problema do El Farol Bar⁸.

Logo, o agente individual não sabe como os outros irão tomar suas decisões e sua própria decisão depende disso. Como a complexidade econômica lida com este caso? Toma-se como ponto de partida que os agentes agem de maneira indutiva, como se fossem estatísticos. Cada indivíduo adota um modelo de previsão diferente. A cada semana que passa, eles testam este modelo. Forma-se uma “ecologia” de comportamentos: cada agente possui a sua previsão, crenças e estratégias que são testadas. O termo “ecologia” é utilizado pois os agentes atuam como as espécies que lutam pela sobrevivência, se adaptando mutuamente e coevoluindo, até chegar em uma estrutura. De qualquer maneira, na complexidade econômica, a “solução” do modelo é frequentemente um conjunto de estratégias, ações e comportamentos que coexistem e competem entre si (ARTHUR, 1999; ARTHUR, 2010; ARTHUR, 2021).

Uma das maneiras de desvendar e estudar sistemas complexos é a construção de modelos baseados em agentes. Eles também são modelos de simulação. Na última década, muitas ferramentas

⁸ Mais detalhes sobre este problema podem ser vistos em Arthur (2021).

e softwares foram criados para apoiar o desenvolvimento computacional destes modelos. A proposta é imitar o sistema do mundo real. Segundo Antelmi et al. (2024):

“In this research field, agent-based modelling (ABMs) embodies a solid modelling approach to design the behavior of a complex system from bottom-up, as modelers can define agents and environments to reproduce particular aspects or proprieties of the underlying reality”.

Diferente da economia tradicional neoclássica, este tipo de modelo de simulação não é orientado por soluções eficientes, o que os torna menos vulneráveis as imperfeições de memória que poderiam invalidar os resultados do experimento.

3. SÍNTESE DO QUADRO TEÓRICO E NOTAS DE REFLEXÃO

3.1. Síntese do quadro teórico

Freeman e Louçã (2001) sugerem uma agenda de pesquisa com a aplicação de modelos complexos não lineares para estudos de sistemas essencialmente instáveis⁹. O foco deste trabalho é realizar a síntese de um quadro teórico que incorpore o papel da inovação e das tecnologias, as forças expansivas do centro, aliadas aos esforços assimilativos da periferia, expressas em uma linguagem de sistemas complexos. Isto é, o arcabouço teórico descrito neste artigo busca sustentar modelos de simulação que busquem investigar a dinâmica centro-periferia no longo prazo.

Uma parte da literatura voltada à análise de longo prazo na dinâmica global tem utilizado ferramentas de sistemas complexos e apresenta resultados pertinentes de revisão. Em primeiro lugar, é possível observar mudanças dos países periféricos entre si ao longo do tempo. Em segundo, o comportamento do sistema econômico no centro parece ter diferenças significativas em relação aos na periferia.

3.2. Mudanças de longo prazo dentro da periferia

Como mencionado anteriormente, a divisão internacional do trabalho nem sempre apresentou a mesma estrutura. A grosso modo, pode-se identificar duas fases na histórica econômica global. A primeira, mais simples, era marcada, por um lado, por países industrializados no centro e países agrícolas ou de intensa exploração de recursos naturais no outro. Na segunda fase a periferia começou a apresentar um certo grau de industrialização, se tornando mais heterogênea entre si. A natureza e o grau de industrialização do país eram fontes de diferenciação dentro da periferia. A heterogeneidade era tão ampla que dois países conseguiram superar o subdesenvolvimento – caso da Coreia do Sul e

⁹ Tais modelos podem ser inclusive voltados para formular e embasar uma teoria econômica diferente da neoclássica, avançando no debate de racionalidade dos agentes, tomada de decisão, etc., que, no entanto, não são o escopo deste artigo.

Taiwan. No final, o resultado é surgimento de novas variedades de capitalismo. Segundo Ribeiro e Albuquerque (2015), existem pelo menos cinco variedades de capitalismo. Entre elas podem existir hierarquias internas (Ribeiro e Albuquerque, 2015).

Ribeiro et al. (2006) demonstraram empiricamente que a heterogeneidade da periferia aumentou significativamente nos últimos anos. Para isso, os autores introduzem um modelo que cria uma economia global artificial com países que possuem dados de PIB per capita, patentes e artigos científicos. Foi provado que existe forte correlação entre desenvolvimento econômico e produção científica e tecnológica. No entanto, existem exceções: países do Oriente Médio e do Norte da África (MENA) possuem altos índices de riqueza (oriundos da indústria petrolífera) mas uma produção relativamente baixa de C&T. Dessa forma, a partir destes dados foi possível ilustrar a heterogeneidade dentro da periferia. Não só isso, como foi verificado indicativos que mostram como esta heterogeneidade aumentou significativamente de 1974 para 2012. Vale lembrar que os métodos aqui utilizados não são convencionais para a economia - são ferramentas da estatística física.

Assim, fica claro que a dinâmica tecnológica atual é distinta daquela que inaugurou o sistema capitalista moderno (ALBUQUERQUE, 2021). Mas como argumentam Ribeiro e Albuquerque (2015, p. 178): “[...] embora reformulada, renovada, e dentro de uma divisão internacional do trabalho, a divisão de centro-periferia sobrevive – hierarquias são preservadas e redefinidas”. A partir disso, os autores prosseguem o raciocínio com uma questão extremamente relevante: “[...] como essa periferia tão transformada – mais heterogênea, maior, com mais recursos sofisticados acumulados – impacta a dinâmica do centro do sistema?” (Ribeiro e Albuquerque (2015, p. 180).

Marques (2014) traz uma resposta para esta pergunta. Para a autora, a dinâmica da economia global ainda é amplamente definida no centro. Porém, a determinação é menos unidirecional. Isto é, a periferia atua com um papel mais poderoso sobre o centro do que anteriormente. Este fenômeno foi chamado de “efeito bumerangue”, em alusão à repercussão que a atividade econômica na periferia gera no centro. Dessa forma, no que diz respeito a fase atual do capitalismo, é possível observar a interessante peculiaridade do “efeito bumerangue” em ação: a dinâmica da economia global ainda é amplamente dada pelo centro, mas de forma menos unidirecional. Isto é, a periferia atua com um papel mais poderoso, capaz de impactar o centro a partir de suas mudanças tecnológicas endógenas (MARQUES, 2014).

Como se dá este impacto? Como exemplo ilustrativo, Albuquerque e Ribeiro (2015) apontam que, após a crise de 2008, a periferia era uma importante fonte de vitalidade. Ou seja, a industrialização e o capital acumulado em alguns países periféricos foram capazes de gerar lucro e empurrar o capital nacional com as empresas transnacionais, embora dentro dos limites determinados pelo

subdesenvolvimento. Em outras palavras, a periferia realizou a assimilação da tecnologia - que entrou pela via das forças expansivas do centro – e com isso acrescenta uma nova fonte de perturbação neste sistema e uma nova camada de complexidade a ele.

3.3. O capitalismo como um sistema complexo?

Como foi dito na introdução deste artigo, o sistema global centro-periferia pode ser entendido como um sistema complexo. No entanto, resta ainda responder como as dinâmicas no centro e na periferia podem ser combinadas.

Por um lado, existem evidências que a dinâmica capitalista nos países centrais apresenta comportamento auto-organizado – uma característica marcante de sistemas complexos. Entre estas evidências, podemos citar o modelo apresentado em Ribeiro et al. (2017), já citado anteriormente. Neste modelo, duas análises são incorporadas: i) os fundamentos teóricos marxistas referentes à tendência de queda da taxa de lucro e suas contratendências; ii) dados de uma série da taxa de lucros dos Estados Unidos entre 1870 e 2011. Na primeira análise, os autores foram capazes de traduzir a elaboração de Marx presente na seção três do Volume III de “O Capital” em um sistema de equações. Basicamente, cada capítulo desta seção foi traduzido em uma equação. Dessa forma, este sistema é não linear, é composto de três equações e se propõe a captar a evolução das variáveis ao longo do tempo. O modelo resulta em um sistema de rede que consegue apreender as constantes mudanças no sistema. Na segunda análise foi possível demonstrar o comportamento fractal da taxa de lucro dos EUA. Disso, pode-se concluir que a dinâmica dessa série de dados pode ser estudada dentro da esfera de complexidade econômica.

A natureza auto-organizada dos países centrais também encontra evidências em Melo (2023). Neste trabalho o autor manipulou uma série de preços do trigo na Grã-Bretanha e foi capaz de mostrar o início da presença do comportamento auto-organizado a partir da Primeira Revolução Tecnológica.

Enquanto temos evidências de um comportamento com padrões auto organizados no centro, existem também evidências de padrões aleatórios na periferia. Cimini et al. (2020) utilizam a linguagem de sistemas complexos, a não linearidade e a grande variedade de possíveis trajetórias de desenvolvimento econômico em séries temporais de longo prazo para mostrar que o comportamento de economias de média e baixa renda tende a ser aleatório (em oposição a auto-organizado) no curto-prazo. Os autores utilizam séries temporais de longo prazo do PIB per capita de países latino americanos e da Índia para esta análise.

A revisão destes trabalhos levanta uma pergunta: como um sistema que parece ser auto-organizado (o capitalismo global, com sua dinâmica definida pelas forças expansivas do centro) pode

apresentar partes que não apresentam esta natureza (a periferia sem dinâmica auto-organizada)? A sugestão é que a periferia ajuda a organizar o sistema capitalista no centro. No entanto, é preciso aprofundar a aplicação de métodos de complexidade na dinâmica centro-periferia para obtenção de uma resposta mais satisfatória.

CONCLUSÃO

Neste artigo foi discutido um quadro teórico capaz de embasar teoricamente pesquisas destinadas ao estudo da dinâmica centro-periferia utilizando as ferramentas metodológicas de sistemas complexos. As contribuições de Perez, Furtado e Cohen e Levinthal são particularmente importantes para esta elaboração. Perez sistematizou as revoluções tecnológicas, traduzindo a dinâmica econômica através de big bangs, que dissipam uma inovação com alta capacidade de transformação da estrutura econômica. Furtado visualizou este movimento de expansão e expressou a dinâmica capitalista do ponto de vista da periferia, que recebe as forças expansivas vindas do centro. Cohen e Levinthal formularam sobre a capacidade de absorção e aplicamos sua análise para o contexto global. Assim, as revoluções tecnológicas acontecem, produto das forças expansivas do centro e do esforço de assimilação da periferia. A combinação destes dois movimentos constitui a base de investigação da dinâmica capitalista de longo prazo, pois são capazes de dar conta das transformações tecnológicas no cenário global.

Como ferramenta metodológica, o artigo sugere a ampliação do uso da teoria de sistemas complexos para explorar a dinâmica centro-periferia. Como a complexidade possibilita o tratamento da economia de maneira dinâmica e evolucionária, esta agenda de pesquisa pode trazer frutos interessantes. Espera-se que, ao se aprofundar na dinâmica centro-periferia com a linguagem de sistemas complexos, os modelos possam auxiliar na elaboração e avaliação de políticas nacionais de catch up.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, E. M. Complex systems: introductory notes on a dialogue among political economy, evolutionary economics and physics. Paper presented at the International Workshop “Structural Change, Social Inclusion And Environmental Sustainability: New Perspectives And Policies In Economic Development” – Plenary Conference: “State Of The Art And Challenges For Research In Development” (7 September 2023).

ALBUQUERQUE, E. M. Revoluções tecnológicas e general purpose technologies: mudança técnica, dinâmica e transformações do capitalismo. In: RAPINI, M. S.; RUFFONI, J.; SILVA, L. A.;

ALBUQUERQUE, E. M. (Orgs.). Economia da ciência, tecnologia e inovação. Fundamentos teóricos e a economia global, 2ª ed. Belo Horizonte: Cedeplar-UFMG, 2021.

ALBUQUERQUE, E. M. Technological revolutions and the periphery: understanding global development through regional lenses. Cham: Springer, 2023.

ANTELM, Alessia; CARAMANTE, Pasquale; CORDASCO, Gennaro; D'AMBROSIO, Giuseppe; DE VINCO, Daniele; FOGLIA, Francesco; POSTIGLIONE, Luca; SPAGNUOLO, Carmine. Reliable and Efficient Agent-Based Modeling and Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Guildford, v. 27, n. 2, p. 4, 2024. DOI: 10.18564/jasss.5300. Disponível em: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/27/2/4.html>.

ARTHUR, W. B. Complexity and the Economy. *Science*, v. 284, n. 5411, p. 107-109, 1999. DOI: 10.1126/science.284.5411.107.

ARTHUR, W. B. Positive Feedbacks in the Economy. *Scientific American*, vol. 262, n. 2, pp. 92-99, 1990.

ARTHUR, W. B. Complexity, the Santa Fé approach and non-equilibrium economics. *History of Economic Ideas*, v. XVIII, n. 2, pp. 149-166, 2010.

ARTHUR, W. B. Complexity and the economy. Oxford: Oxford University Press, 2015.

ARTHUR, W. B. Foundations of complexity economics. *Nature Review Physics*, v. 3, February, pp. 136-145, 2021.

BECKERT, S. Empire of cotton: a global history. New York: Vintage Books, 2014.

BRESNAHAN, T. "General purpose technologies". In: HALL, B. & ROSENBERG, N. (eds.) *Handbook of the economics of innovation*. Volume II. Amsterdam: North Holland, pp. 761-791, 2010.

CERQUEIRA, H. E. G.; ALBUQUERQUE, E. M. China and the first impact of the Industrial Revolution: initial conditions and a falling behind trajectory until 1949. *Nova Economia*, v. 30, n. especial, p. 1169-1198, 2020.

CIMINI, F.; BRITTO, J. N. P.; RIBEIRO, L. C. Complexity systems and middle-income trap: the long-term roots of Latin America underdevelopment. *Nova Economia*, v. 30, pp. 1225-1256, 2020.

COHEN, W.; LEVINTHAL, D. (1989) Innovation and Learning: the two faces of R&D, *The Economic Journal*, v. 99, n. 397, September: pp. 569-596.

COHEN, W. M.; LEVINTHAL, D. A. Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, v. 35, n. 1, p. 128, 1990.

DOSI, Giovanni. Technological paradigms and technological trajectories. *Research Policy*, [S.l.], v. 11, p. 147-162, 1982.

DOSI, G.; NELSON, R. Technical change and industrial dynamics as evolutionary processes. In: HALL, B.; ROSENBERG, N. (eds.). *Handbook of the economics of innovation*, v. I. Amsterdam: North Holland, p. 51-127, 2010.

FONTANA, Magda. The Santa Fe perspective on economics: emerging patterns in the science of complexity. *History of Economic Ideas*, [s.l.], v. 18, n. 2, p. 167-196, 2010. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/23723516>.

FREEMAN, C.; LOUÇÃ, F. *As time goes by: from the industrial revolutions and to the information revolution*. Oxford: Oxford University, 2001.

FREEMAN, C.; PEREZ, C. Structural crisis of adjustment: business cycles and investment behavior. In: DOSI, G.; FREEMAN, C.; NELSON, R.; SILVERBERG, G.; SOETE, L. (eds.). *Technical change and economic theory*. London: Pinter, p. 38-66, 1988.

FRANCO, M. P. V; RIBEIRO, L. C.; ALBUQUERQUE, E. M. (2022) Beyond random causes: harmonic analysis of business cycles at the Moscow Conuncture Institute. *Journal of the History of Economic Thought*, v. Online, p. 1-21 (disponível em <https://doi.org/10.1017/S1053837221000092>)

FURTADO, C. (1987). *Underdevelopment: To conform or to reform*. In G. Meier (Ed.), *Pioneers of development (Second series)* (pp. 203–227). Oxford University/World Bank.

FURTADO, C. (1986). *Teoria e política do desenvolvimento econômico (2ª edição)*. Nova Cultural.

FURTADO, C (2002) *Metamorfoses do Capitalismo*. In: D'aguiar, Rosa F. (Org.) *Essencial Celso Furtado*.: Penguin/Companhia das Letras, pp. 450–457 (2013).

HELPMAN, E. (ed.). *General purpose technologies*. Stanford: Stanford University, 1998.

KONDRATIEV, N. D. Long cycles of economic conjuncture. In: *The works of Nikolai D. Kondratiev*. Edited by N. Makasheva, Samuels, W.; Barnett. London: Pickering and Chato (1998), pp. 25-60, 1926.

LORENZ, E. N. *Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set off a Tornado in Texas?* American Association for the Advancement of Science, 1972.

MARQUES, S. F. *Mudanças na Clivagem Centro-Periferia e o Efeito Bumerangue: o impacto da periferia na reconfiguração sistêmica do capitalismo no século XXI*. Belo Horizonte: Cedeplar-UFMG, 2014. (Tese de Doutorado).

MARQUETTI, A. A.; CHAVES, C. V.; RIBEIRO, L. C.; ALBUQUERQUE, E. M. Rate of Profit in the United States and in China (2007-2014): A Look at Two Trajectories and Strategic Sectors. *Review of Radical Political Economics*, v. 53, p. 116-142, 2021.

MELO, B. C. (2023). Estudo empírico de séries de preços com instrumental de sistemas complexos (Capítulo 3 da tese *A economia como sistema complexo e o mercado como propriedade emergente: em busca de sinais de complexidade nos preços do trigo desde o séc. XIII*). Cedeplar-UFMG.

MITCHELL, M. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press, 2009.

NELSON, R. (1991) Why do firms differ, and how does it matter? In: NELSON, R. *The sources of economic growth*. Cambridge, Mass: Harvard University, 1996.

NELSON, R. & WINTER, S. (2002) Evolutionary theorizing in economics. *Journal of Economic Perspectives*, v. 16, n. 2, pp. 23-46.

NELSON, R. R. Recent evolutionary theorizing about economic change. *Journal of Economic Literature*, v. XXXIII, p. 48-90, 1995.

NELSON, R. & WINTER, S. (1982) *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge: Harvard University.

PATEL, P.; PAVITT, K. Uneven (and divergent) technological accumulation among advanced countries: evidence and a framework of explanation. *Industrial and Corporate Change*, v. 3.

PAULA, J. A., & ALBUQUERQUE, E. M. (2020). A formação do pensamento de Celso Furtado, o imperativo tecnológico e as metamorfoses do capitalismo. *Revista Brasileira de Inovação*, 19, e0200027

PEREZ, C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge Journal of Economics*, v. 34, n. 1, p. 185-202, 2010.

PINHEIRO, SAHRA F. (2022) *A world wide web como uma general purpose technology*. Belo Horizonte: Cedeplar-UFMG (Tese de Doutorado).

RIBEIRO, L. C. (2022). Sistemas complexos, economia e Covid-19. In E. M. Aluquerque, F. G. Jayme Jr., & G. Britto (Eds.), *Crise, pandemia e alternativas* (pp. 165–191). Cedeplar-UFMG.

RIBEIRO, L. C.; RUIZ, R. M.; BERNARDES, A. T.; ALBUQUERQUE, E. M. Science in the developing world: running twice as fast? In: *Computing in Science and Engineering*, vol. 8, p. 81-87, July 2006.

RIBEIRO, L. C.; ALBUQUERQUE, E. M. O papel da periferia na atual transição para uma nova fase do capitalismo. *Cadernos do Desenvolvimento*, Rio de Janeiro, v. 10, n. 17, p. 166-186, jul.-dez. 2015.

RIBEIRO, L. C.; DEUS, L. G.; LOUREIRO, P. M., ALBUQUERQUE, E. M. A network model for the complex behavior of the rate of profit: exploring a simulation model with overlapping technological revolutions. *Structural Change and Economic Dynamics*, v. 43. pp. 51-61, 2017 (available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.strueco.2017.07.001>).

ROSENBERG, N. *Perspectives on technology*. New York; London; Melbourne: Cambridge University Press, 1976.

SAVIOTTI, R Paolo e METCALFE, J. Stanley 1991. "Present developments and trends in evolutionary economics". In: *Evolutionary theories of economic change: present status and future prospects*. Reading: Harwood Academic, p. 1-30.

SCHUMPETER, J. A. *A teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juros e o ciclo econômico*. Coleção Os Economistas. São Paulo: Abril Cultural, [1982] 1911.

SCHUMPETER, J. A. *Business cycles*. New York/London: McGraw-Hill Book Company, 1939.

SLUTSKY, EVGENII E. [1927] 1937. The Summation of Random Causes as the Source of Cyclic Processes. *Econometrica*, v. 5, n. 2, pp. 105-146.