

O CAMIÑO Á COMPLEXIDADE: POR QUE A ECONOMÍA DEBERÍA SEGUIR Á FÍSICA

LUIS M. VARELA CABO / CARLOS J. RICOY RIEGO
Universidade de Santiago de Compostela

Recibido: 11 de abril de 2012

Aceptado: 7 de maio de 2012

Resumo: Na presente contribución mostraremos que a dirección dominante da economía contemporánea, tras o seu desenvolvemento inicial no marco conceptual e analítico da física clásica do século XIX, segue ancorada no seu "core" conceptual –a teoría neoclásica de equilibrio xeral–, ignorando a evolución da propia física ao longo do século XX cara ao tratamento de sistemas complexos, e aínda a natureza mesma do seu obxecto de coñecemento. Para isto, e logo de resumir brevemente o formalismo da física clásica e a formulación da propia economía neoclásica, analizaremos a evolución de ambas as dúas disciplinas ao longo do pasado século, con atención particular ao desenvolvemento da termodinámica desde o seu formalismo de equilibrio ata o concepto de estruturas disipativas da termodinámica non lineal. Finalmente, apuntamos unha serie de liñas nas que, ao noso xuízo, debe realizarse a adaptación da economía á física contemporánea, con todas as súas consecuencias.

Palabras clave: Economía neoclásica / Física clásica / Termodinámica non lineal / Sistemas complexos / Economía da complexidade.

THE ROAD TO COMPLEXITY: WHY SHOULD ECONOMICS FOLLOW PHYSICS

Abstract: In this contribution we will show that the mainstream of contemporary economics, after its initial development in XIXth century analytical and conceptual framework of classical Physics, is still anchored to its conceptual core, the general equilibrium theory, neglecting the evolution of physics itself towards the treatment of complex systems, and even the nature of its own knowledge object. For that, after a short summary of classical physics formalism and of the own neoclassical economics, we will analyze the evolution of both disciplines throughout the last century, with particular attention being focused on the development of thermodynamics from its original equilibrium formalism until the formalization of the concept of dissipative structures in nonlinear thermodynamics. Finally, we outpoint some lines along which we consider the adaptation of economics to contemporary physics must be done.

Keywords: Neoclassical economics / Classical physics / Nonlinear thermodynamics / Complex systems / Complexity economics.

1. INTRODUCCIÓN

A economía é un dos modos de funcionamento dese sistema complexo que denominamos sociedade, composto pola trama de relacións que todos os individuos dun grupo humano xeran de maneira espontánea entre si. A actividade económica admite unha comparación analóxica co conxunto de operacións que constitúen o denominado metabolismo dos produtos dos organismos biolóxicos. Así, mediante a actividade económica –constituída esencialmente pola produción, a distribución e o consumo–, o “organismo social” procesa a enerxía e os recursos (factores) produtivos transformándoos en bens que son distribuídos entre os seus constituíntes para satisfacer as súas necesidades, da mesma maneira que en calquera sistema vivo. Isto, unido aos mecanismos de procesamento e de eliminación dos residuos da actividade, sitúa á economía plenamente no marco conceptual dos sistemas complexos,

ao convertela a ela mesma nun sistema complexo autoadaptativo formado por un conxunto heteroxéneo e xerarquizado de axentes intelixentes conectados en rede, interaccionando de maneira non lineal e dando lugar a fenómenos emerxentes (Holland, 2006). Deste modo, economía sería o nome que lle damos á estrutura e á dinámica da intrincada trama de relacións de produción e de intercambio entre os homes, autoorganizada e, por iso, necesariamente aberta e permanentemente moi lonxe do seu hipotético equilibrio.

Na actualidade esta visión da economía –esixida pola termodinámica contemporánea– admite xa moi pouca dúbida (Anderson *et al.* [ed.], 1988; Arthur *et al.*, 1997). Así e todo, o *mainstream* da ciencia económica contemporánea, centrado na denominada teoría de equilibrio xeral, mantense dentro dun paradigma completamente diferente. A eliminación desta disociación –aparentemente paradoxal– entre a economía considerada como obxecto de estudo e a economía como ciencia debe ser o debate principal da teoría económica do noso tempo.

Tras o desenvolvemento ben coñecido da economía política clásica¹, nas décadas dos anos setenta a noventa do século XIX desenvólvese a denominada revolución marxinalista, protagonizada por unha serie de autores –como, entre outros, Walras ou Jevons– que estaban ao corrente do formidable desenvolvemento da física clásica do seu tempo, xurdida da unificación lagrangiana e da formalización da conservación da enerxía. A influencia da física na obra destes autores está ben documentada por eles mesmos, e foi analizada en traballos anteriores². É ata certo punto natural a súa opción polo formalismo físico, pois sempre foi este o modelo de ciencia cuantitativa, o espello no que as demais veñen a mirarse. Así, por exemplo, Jevons reconece na súa *Theory of Political Economy* que non existe diferenza substancial entre o carácter xeral da súa ecuación de intercambio e outros conceptos tratados en moitas ramas da ciencia física. Por outro lado, como recolle Mirowski (1989), Jevons na súa obra póstuma *Principles of Economics* escribe de maneira explícita que “*The notion of value is to our science what that of energy is to mechanics*”. Igualmente explícito é Leon Walras na súa obra *Elements of Pure Economics*, cando compara a teoría pura da economía coa das ciencias físico-matemáticas.

Mirowski recolle, igualmente, as concepcións acerca da relación da ciencia económica coa física doutros neoclásicos como Francis Ysidro Edgeworth, Vilfredo Pareto ou Irving Fisher, nas que se reflicte de maneira explícita a similitude que estes autores estiman que debe ter a economía coa física, e que os impulsa a realizar de maneira consciente unha adaptación dos conceptos da mecánica da súa época ao problema económico. Naturalmente, como calquera outro avance do coñecemento humano, este debe ser, sen dúbida, valorado no seu propio contexto histórico. Nel, este esforzo de adaptación do formalismo da física ao desenvolvemento dunha me-

¹ Neste artigo non consideramos o seu desenvolvemento nin tampouco o doutras correntes de pensamento económico que se moven fóra das contornas do *mainstream*.

² Véxase, en particular, a excelente monografía de Mirowski (1989) e as referencias contidas nela.

cánica social á altura da mecánica celeste debe ser positivamente valorado, sexa cal sexa a opinión que na actualidade teñamos da teoría que deseñaron, pois, certamente, foi un esforzo importante destinado a pór á altura da física do seu tempo a teoría económica da época.

Como veremos ao longo deste traballo, non foi esta a evolución posterior, pois a economía non incorporou, ao noso xuízo, todos os elementos que a física foi desenvolvendo posteriormente para o tratamento de sistemas complexos, categoría moito máis útil para a análise da economía que os modelos de sistemas simples que se atopan na base do modelo neoclásico canónico. Antes ben, aferrouse ao modelo neoclásico orixinario e, no seu caso, introduciu nel diversas “imperfeccións” que apartarían a economía do seu funcionamento óptimo reflectido no equilibrio xeral. Así, por exemplo, todas as implicacións da revolución que supuxo a introdución da probabilidade nas leis fundamentais da física mediante a mecánica estatística e a mecánica cuántica non foron adecuadamente trasladadas á economía. Por outro lado, e o que resulta máis incomprendible, só nos anos sesenta do pasado século se introduciu no pensamento económico a entropía, mediante a obra de Georgescu-Roegen (1971), aproximando economía e termodinámica convencional de equilibrio tras máis dun século de coñecemento das súas leis fundamentais. Con todo, aínda hoxe non se formulou unha equivalencia plena entre as magnitudes termodinámicas e as súas homólogas económicas, e moito menos se xeneralizaron os traballos de Georgescu-Roegen para incorporar todos os avances da termodinámica de procesos irreversibles nas rexións lineal e non lineal da escola de Bruxelas. E iso, malia que, en palabras de Schneider e Sagan (2005) na súa obra *La termodinámica de la vida. Física, cosmología, economía y evolución*, a termodinámica chegou a ser a ciencia-nai de todas as ciencias da complexidade.

En efecto, só no marco da termodinámica non lineal é posible comprender a aparición espontánea de orde espazo-temporal en sistemas abertos moi afastados do seu equilibrio, o que, sen dúbida, podería facilitar a comprensión da formación das estruturas económicas espazo-temporais observadas (corporacións, ciclos, inhomoxeneidades xeográficas na economía...). Tampouco foron incorporadas ao núcleo económico contemporáneo outras ferramentas de estudo de sistemas complexos como a teoría de redes complexas ou a teoría da información. É, por iso, pertinente realizar unha análise crítica do estado relativo en que se atopan física e economía, o que, como veremos neste traballo, obriga a formularse previamente a natureza última do obxecto de estudo desta disciplina, ese incesante ruído da sociedade que denominamos economía.

Este traballo estrutúrase en catro seccións, das cales a primeira é esta introdución. A segunda sección contén unha breve excursión histórica polo desenvolvemento da física desde a súa orixe ata o momento presente, destacando de maneira particular o estudo do desenvolvemento histórico da termodinámica como rama da física especialmente relevante para a economía. Na terceira sección realízase unha breve revisión crítica do formalismo neoclásico orixinario da economía e da súa evolución histórica ao longo do século XX ata os enfoques contemporáneos. Fi-

nalmente, na cuarta sección analízanse a aparición e o desenvolvemento das ciencias da complexidade, un campo en efervescente avance na actualidade, que progresivamente vai traspasando novas fronteiras³, apuntando algunhas direccións de futuro que, ao noso xuízo, deben ser exploradas para unha auténtica formulación da economía da complexidade.

2. FÍSICA: DO SIMPLE MOVEMENTO AOS SISTEMAS COMPLEXOS

Logo do abandono do holismo da teosofía medieval, superada xa a fase dos debates nominalistas e dos universais, formalizado o principio de parsimonia por Guillermo de Occam, o pensamento moderno estaba en posición de volver situar o estudo dos fenómenos naturais no centro das súas preocupacións; e de facelo mediante o formalismo adecuado, baseado no método experimental do *Novum Organum* de Francis Bacon, e da formulación matemática das súas preguntas e resultados á maneira de Galileo. Todo isto mediante métodos de investigación claros e precisos, baseados na presunción de que para o estudo do comportamento dun determinado sistema físico este debe separarse da súa contorna –operación que sempre resulta posible, segundo o pensamento da época–, e situarse noutro ámbito no que poida someterse adecuadamente á interrogación hábil e exhaustiva do experimentador para formular leis matemáticas que permitan a predición do seu comportamento xeral. Só así poderemos coñecer as leis da natureza que, obedecéndoas, como dirá Bacon, nos permitirán dominala.

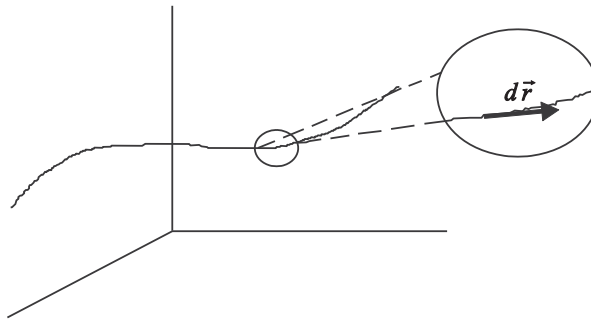
De maneira natural, a ciencia moderna fixa a súa atención, en primeiro lugar, no problema do movemento, cuxa posibilidade e características xa foran un tema permanente no pensamento filosófico da antigüidade clásica e medieval. É neste marco problemático da descrición do movemento (cinemática) e das súas causas (dinámica) onde se produce a formulación das obras de Leibniz e de Newton relativas ao desenvolvemento dunha ferramenta matemática que permitise a descrición de sistemas e procesos descompoñibles en contribucións infinitesimalmente pequenas sen perda de propiedades esenciais. Estes sistemas, convencionalmente designados como simples, son os que se atopan na base da física clásica⁴: neles o todo non é senón a suma de partes, e o todo pode ser reducido ás súas partes. Así, por exemplo, a causa total non é máis que a adición das causas parciais, o que constitúe o principio de superposición, ferramenta esencial para a comprensión de tantos fenómenos. Tanto as causas (forzas) como os efectos (movementos) dos sistemas e

³ Neste bloque temático inclúese a contribución de B. Miedes: “Complexidade e economía: distintas correntes de pensamento, distintas lecturas”, na que se recollen diversas aproximacións que se fixeron á economía desde a perspectiva da complexidade.

⁴ Neste traballo usaremos o termo física clásica non como sinónimo de física newtoniana, senón para referirnos ao conxunto de ramas da física que se desenvolvera con anterioridade á formulación da mecánica cuántica a partir do ano 1900. Sería difícil incluír baixo a denominación de newtonianas ramas como a mecánica lagrangiana ou a hamiltoniana, tan dependentes do concepto de campo e de principios de conservación non dispoñibles para Newton; o electromagnetismo, a óptica electromagnética ou a termodinámica.

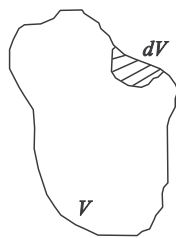
procesos físicos estudados neste marco son o resultado da adición dunha infinita cantidade de contribucións elementais que contribúen ao resultado final. Así, a curva da figura 1a non é senón o resultado da adición dunha cantidade infinita non numerable de elementos infinitesimais de liña $d\vec{r}$ que integrados (i.e. sumados continuamente á maneira descrita por Leibniz na súa *Nova Methodus* do ano 1684) nos devolven o conxunto da liña.

Figura 1a.- A curva como resultado do despregamento dun infinitésimo



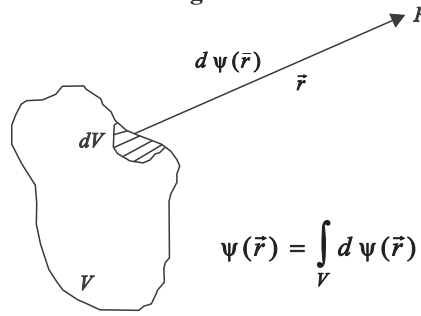
Da mesma forma, esta nova matemática permitirá recompoñer a cantidade total dunha certa magnitude activa –masa ou carga, por exemplo– presente nun corpo despois de dividilo en partes infinitesimalmente pequenas e sumalas de novo a todo o volume do corpo (figura 1b), ou a perturbación total a unha certa distancia dun corpo cunha magnitude activa como resultado da superposición das perturbacións provocadas por cada unha das súas partes (figura 1c).

Figura 1b



$$\varphi_t = \int_V \rho(\vec{x}) d\vec{x}$$

Figura 1c



$$\psi(\vec{r}) = \int_V d\psi(\vec{r})$$

Todo este programa se completaba coa formulación de leis en forma de ecuacións diferenciais e integrais –ecuacións de Newton, de Lagrange ou de Hamilton– que, unha vez determinadas as condicións iniciais, permitían unha descrición completa do estado de movemento do móbil en calquera instante posterior (determinismo).

En resumo, de maneira moi sucinta e simplificada podemos esquematizar este programa nos seguintes puntos:

- A existencia dun universo estruturalmente estático: no marco da física clásica as estruturas están dadas previamente a calquera consideración e non evolucionan no tempo.
- Suponse que os sistemas obxecto de estudo son separables do resto do universo, e que son sistemas simples, i.e. que as leis que gobernan o conxunto do sistema son as mesmas que gobernan as partes constituíntes. Isto permite a execución dun programa reduccionista no que o comportamento do todo pode reducirse ás leis que gobernan os seus constituíntes.
- Principio de superposición: os efectos netos son o resultado determinista da adición de causas (forzas ou magnitudes activas).

Malia as súas evidentes restricións, este programa reduccionista e determinista da física clásica demostrara toda a súa potencia cara ao momento no que se produce na economía a chamada revolución marxinalista, i.e. cara ás décadas finais do s. XIX. Nos seus dous séculos de existencia lograra avances espectaculares en mecánica (coa formulación da síntese newtoniana; a mecánica analítica, lagrangiana e hamiltoniana; o principio de conservación da enerxía, que contribuíu a liberar a física de éteres e substancias; ou a formulación do concepto de campo, entre outros); en electromagnetismo, maxistralmente condensado nas ecuacións de Maxwell; en óptica; en mecánica de fluídos, etcétera⁵.

As fronteiras da física –e en xeral das ciencias naturais– e a fascinación que exercía sobre cidadáns e científicos non parecía coñecer límites como medio de expansión do coñecemento e de control da natureza, pero tamén como seguro medio para o desenvolvemento e o progreso da técnica e da economía das nacións. O soño laplaciano –a posesión dunha ecuación do todo que, dadas as condicións iniciais das partículas que compoñen o universo, permita a predición da súa evolución posterior– parecía ao alcance mesmo da man (figura 2). E, porén, como sucede tantas veces cos imperios no seu esplendor, xa tiña dentro de si o xerme da súa superación, e todo se encontraba preparado para a xeneralización deste formalismo. Para seguir cumprindo o seu programa, a física debía de cambiar radicalmente, sobre todo en dous aspectos cruciais: a comprensión da mecánica do microcosmos⁶ e os fundamentos últimos da transformación de calor en traballo, que ocultaban unha das máis fundamentais leis da natureza como é a segunda lei da termodinámica.

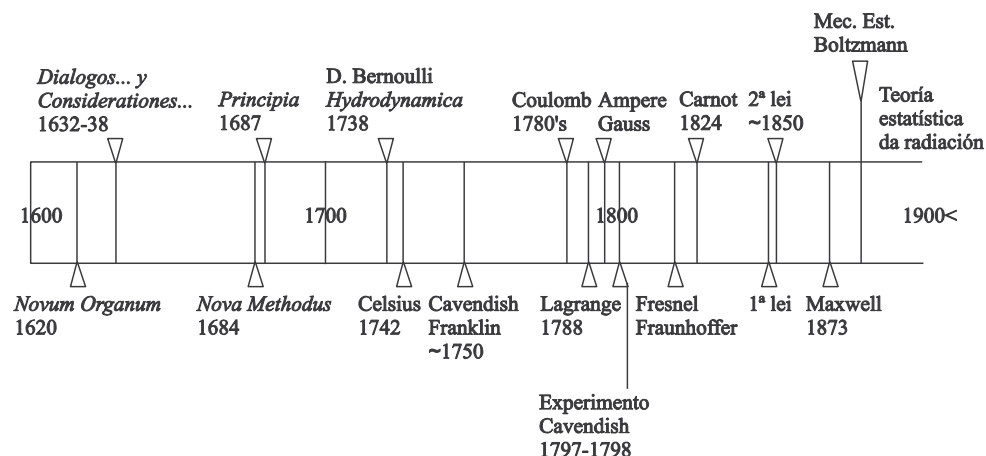
Polo que respecta a estes últimos, xa desde o principio mesmo da descrición física moderna se observara a imposibilidade de separar de maneira completa o sistema da súa contorna, ao existir sempre a comunicación de algo entre sistema e

⁵ Non pretendemos ser exhaustivos neste punto, pois este bloque temático xa inclúe a contribución de J. Carrete, “Posibilidade, necesidade e tratamento da complexidade na física: unha aproximación histórica”, na que se expón o camiño percorrido pola física desde as súas orixes ata a complexidade, á que remitimos ao lector interesado.

⁶ Non nos estenderemos aquí no desenvolvemento da mecánica cuántica.

contorna que facía variar o estado de movemento do corpo, o que se incluíu no formalismo mecánico en forma de forzas disipativas. Estas interaccións parecían violar o principio de conservación da enerxía, que con tanto denodo e esforzo se construíra.

Figura 2.- Principais fitos do desenvolvemento da física clásica



Para a comprensión destas forzas, da calor asociada a estes e a outros procesos e dos principios de funcionamento das máquinas térmicas e a súa optimización, desenvóléronse durante o século XIX as dúas leis fundamentais da termodinámica: a primeira lei ou principio de conservación da enerxía, baseada na equivalencia de calor e traballo mecánico para os efectos da variación da enerxía interna do corpo⁷; e a segunda lei, que establece a existencia dunha dirección preferente na evolución espontánea dos sistemas termodinámicos, e que conduciu en última instancia á introdución da entropía no formalismo da física e á súa conexión coa desorde de estado e coa irreversibilidade dos procesos de transformación⁸. Os procesos e estados

⁷ Esta equivalencia fora formulada por James Prescott Joule en Manchester no ano 1845, que terminou definitivamente coa concepción substancialista da calor latente na teoría do calórico. A forma contemporánea do principio de conservación establece que a variación da cantidade de enerxía do corpo (enerxía interna) U se debe ao intercambio de calor (Q) e de traballo (W) coa contorna: $\Delta U = Q + W$.

⁸ A segunda lei da termodinámica foi desenvolvida entre os anos 1824 –ano no que se publica *Sur la puissance motrice du feu*, de Nicolas Sadi Carnot– e 1865 –ano no que Clausius culmina a súa formulación–, e involucra o traballo, entre outros, de Sir William Thomson (Lord Kelvin). Na súa versión definitiva, a segunda lei da termodinámica débese a Rudolf Clausius, que tamén introduce o concepto de entropía (S): “Buscaremos agora un nome apropiado para S . Da mesma maneira que denominamos U á cantidade de traballo do corpo, poderíamos denominar S ao contido de transformación deste. Así e todo, pareceume moi adecuado tomar os nomes para as cantidades científicas importantes das linguas clásicas, para que poidan denotarse de maneira similar en todas as linguas contemporáneas. Polo tanto, propono que chamemos S á entropía do corpo, do grego «ετροπη», que significa transformación. Elixin intencionadamente a palabra entropía para que sexa o máis parecida posible a enerxía, posto que as dúas magnitudes que representan estas palabras teñen un significado físico tan relacionado que unha similitude nos seus nomes me pareceu apropiada” (Clausius, 1867).

de equilibrio quedaron así plenamente explicados desde a perspectiva fenomenolóxica.

O éxito completouse coa formulación, esencialmente debida a Boltzmann, dos fundamentos mecánico-microscópicos da segunda lei na teoría cinética, e da interpretación estatística da entropía (mecánica estatística) que lles atribúe unha maior probabilidade aos microestados máis desordenados (i.e. de maior entropía) dun sistema que aos máis ordenados, permitindo interpretar a observación dunha dirección estatisticamente preferente para os procesos físicos macroscópicos, unha “frecha do tempo” en aparente contradición coa reversibilidade dos procesos mecánicos.

Todo este edificio da termodinámica clásica de estados e procesos de equilibrio –culminada pola obra de Josiah Willard Gibbs para sistemas abertos– permitiu a comprensión de infinidade de fenómenos que involucraban –sempre o fan os procesos macroscópicos reais– a transmisión de enerxía en forma de calor. Con todo, non se analizan neste formalismo da “termostática” os procesos cronolóxicos reais, os procesos irreversibles, senón que se consideran procesos estáticos equivalentes no espazo termodinámico polos que o sistema transita, permanentemente en equilibrio, e nos que os seus estados son parametrizables en termos de variables e funcións de estado⁹. Ningunha atención se lles prestaba aos procesos irreversibles como tales, considerados simples procesos “*parasitos*” (Prigogine, 1977)¹⁰.

E esta orde de cousas prolóngase ata as obras de Pierre Duhem e de Théophile de Donder –fundador da escola de Bruxelas–, que comezaron o estudo sistemático dos procesos nos que existe o fluxo dalgunha magnitude física (masa, carga, calor...) inducida por unha forza termodinámica xeneralizada (gradiente de concentración, diferenza de potencial ou gradiente de campo eléctrico, gradiente de temperatura...). Isto abriu a porta para comprender a existencia espontánea de estruturas organizadas –entre elas a vida–, algo considerado ata daquela completamente incompatible coa segunda lei da termodinámica.

Os primeiros estudos centráronse no denominado réxime lineal, unha rexión próxima ao equilibrio global do sistema na que forzas (\vec{F}) e fluxos (\vec{J}) mostran unha dependencia lineal, $J_k = \sum_j L_{kj} F_j$, e na que podemos supoñer a existencia de equilibrio local. A compresión e sistematización dos fenómenos de transporte nesta rexión recibiron un forte impulso co establecemento do teorema de reciprocidade de Onsager (1931), que establece a simetría dos coeficiente cinéticos en ausencia

⁹ En particular, nos procesos pseudoestáticos o sistema transita por unha sucesión continua de estados intermedios de equilibrio e, ademais, as forzas que realizan traballo sobre o sistema son, precisamente, as que o manteñen en equilibrio, isto é, o sistema atópase tamén en equilibrio co medio en cada un dos estados intermedios do proceso. Na práctica, estes últimos procesos considéranse equivalentes aos procesos reversibles, para os que existiría unha transición inversa cos mesmos estados inicial e final, e tanto o sistema como a súa contorna recuperarían en todos os aspectos os seus estados previos ao proceso. Con todo, esta equivalencia dista moito de ser plena.

¹⁰ Na autobiografía de Prigogine pode atoparse un excelente resumo da evolución da termodinámica no século XX <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1977/prigogine.html>.

de campo magnético, $L_{jk} = L_{kj}$, considerada, mesmo, como unha cuarta lei da termodinámica¹¹.

Por outro lado, Prigogine (1945) formulou o denominado teorema de mínima produción de entropía, válido para os estados estacionarios nesta rexión lineal, un resultado fundamental da denominada termodinámica lineal dos procesos irreversibles. Esta rama da termodinámica foi aplicada a unha gran cantidade de fenómenos de transporte, como pode comprobarse nas obras do propio Prigogine ou en autores como De Groot e Mazur (1962) ou Katchalsky e Curran (1946).

Pero é, quizais, na demostración de que na rexión afastada do equilibrio, na que a linearidade da relación entre forzas e fluxos xa non é válida (nin, polo tanto, as relacións fenomenolóxicas de Onsager), existen transicións desorde-orde compatibles coa segunda lei, onde o formalismo da termodinámica alcanzou as súas maiores cotas ata a data. Este resultado, debido esencialmente a Glansdorff e Prigogine (1971), conduciu á formalización do concepto de estruturas dissipativas. Rapidamente se construíron modelos cinéticos –como o *Brusselator*– que permitiron analizar a variedade de estruturas que se xeraban en procesos de reacción-difusión e se consideraron reaccións químicas oscilantes –a máis famosa é, sen dúbida, a de Belousov-Zhabotinsky–, tanto homoxéneas como inhomoxéneas, á luz do novo formalismo.

A aparición da orde espazo-temporal –reaccións oscilantes, ondas viaxeiras, estruturas de Turing– en sistemas abertos na rexión non lineal, suficientemente lonxe do equilibrio, abriu a posibilidade de conciliar a existencia de estruturas ordenadas –e ordenadoras como os seres vivos– coa temida segunda lei da termodinámica. Tal e como relata o propio Prigogine (1977) na súa autobiografía antes citada, estes estudos en colaboración con Glansdorff ían a “[...]give birth to a general evolution criterion which is of use far from equilibrium in the non-linear branch, out of the validity domain of the minimum entropy production theorem. Stability criteria that resulted were to lead to the discovery of critical states, with branch shifting and possible appearance of new structures. This quite unexpected manifestation of «disorder-order» processes, far from equilibrium, but conforming to the second law of thermodynamics, was to change in depth its traditional interpretation. In addition to classical equilibrium structures, we now face dissipative coherent structures, for sufficient far-from equilibrium conditions”.

Pero o máis sorprendente foi, quizais, que a orixe desta nova orde en sistemas abertos –sorprendente ela mesma á súa vez–, desta nova capacidade da materia de autoorganizarse estruturalmente, fose debida a fenómenos microscópicos de orixe aleatoria como son as flutuacións microscópicas libres e espontáneas dos seus constituíntes. Novamente, en palabras do propio Prigogine (1977): “*But the introduction of the concept of dissipative structure was also to have other unexpected*

¹¹ A terceira, que establece a inaccesibilidade do cero absoluto de temperatura, débese en versións diferentes a Nernst e a Planck.

consequences. It was evident from start that the structures were evolving out of fluctuations. They appeared in fact as giant fluctuations, stabilized through matter and energy exchanges with the outer world".

Esta orde a través de flutuacións, a capacidade de ordenarse –e mesmo de organizarse– a partir de flutuacións estocásticas de orixe microscópica e de manterse en tal estado mediante a xestión de fluxos de enerxía e entropía pode considerarse actualmente como un mecanismo xeral de organización do conxunto da realidade. Así, é posible encaixar no formato de estruturas disipativas, emerxidas a partir das flutuacións libres e espontáneas dos seus constituíntes, desde os procesos de reacción-difusión ata os mercados financeiros. Estas estruturas disipativas mantéñense elas mesmas organizadas a base de importar fluxos enerxéticos, degradalos e exportar fluxos de alta entropía á contorna á maior taxa posible –máxima produción de entropía¹²–.

O propio Prigogine, consciente de que as implicacións desta nova rama non liñal da termodinámica excedían con moito o ámbito da física, estendeuno a fenómenos da vida social como o problema do tráfico (Prigogine e Hermann, 1971). É así como a termodinámica, provista deste novo marco conceptual, chegou a ser “*a ciencia-nai de todas as ciencias da complexidade*”. E é nesta fronteira –na da complexidade–, que lembra en tantos aspectos ao enfoque holístico previo á aparición e desenvolvemento da ciencia moderna, onde se atopa hoxe o horizonte problemático da física, e con ela do resto das ciencias.

Centraremos agora a nosa atención no percorrido histórico da economía, en tantos sentidos similar ao da propia física, analizando en primeiro lugar a súa etapa determinista e reduccionista –o denominado formalismo neoclásico do equilibrio xeral–, para abordar despois o tránsito cara á etapa da complexidade e da emerxencia que, como outras ciencias fixeron xa, debe necesariamente acometer.

3. ECONOMÍA CONVENCIONAL: UN MODELO REDUCCIONISTA PARA UN SISTEMA INTRINSECAMENTE COMPLEXO

“*Non deixes que a realidade che estrague un bo titular*”, din os xornalistas cando se refiren a unha boa cabeceira. Algo parecido podería predicarse do que é na actualidade o núcleo da análise económica contemporánea, a saber, a teoría do equilibrio xeral, que se estende de feito á análise macroeconómica.

Logo da etapa clásica do pensamento económico –representada principalmente por Smith, Ricardo e Marx–, esta teoría foi construíndose con achegas diferentes desde a década de 1870, na que se inicia a denominada revolución marxinalista, que encabezan Leon Walras, William Stanley Jevons, Vilfredo Pareto e Irving Fisher. No que segue analizaremos a profunda influencia que tiveron a visión e os métodos da física clásica no desenvolvemento deste formalismo teórico da economía e

¹² Evidentemente, neste marco é posible comprender de maneira moi directa a orixe dos problemas económico e ecolóxico.

como, na nosa opinión, se produciu nesta ciencia unha recepción moi parcial dos avances que tiveron lugar ata a data no campo da física que, como xa vimos na sección anterior, culminan na actual física dos sistemas complexos.

A grandes trazos, o postulado central da economía neoclásica contemporánea –o comunmente chamado *mainstream*– é que a economía é o resultado da acción de axentes racionais independentes que maximizan a utilidade e o beneficio interactuando no seo de mercados perfectamente competitivos, nos que toda a información economicamente relevante está dispoñible para todos eles nos prezos das mercadorías, como consecuencia do cal se establece no sistema económico un “equilibrio xeral” óptimo, estable e autoaxustado.

No ámbito dos mercados financeiros, estas asuncións de mercado eficiente e completo están na base do ben coñecido modelo estándar de finanzas ou modelo de Black-Merton-Scholes. Nel suponse que: i) non existe asimetría informacional ningunha entre os axentes –toda a información relevante se atopa no prezo dos activos, e só no prezo–; ii) non hai *gaps* significativos entre os prezos de mercado e os fundamentais; e iii) o mercado é completo, isto é, sempre hai comprador e vendedor a calquera prezo. Nestas condicións os prezos de mercado das accións executan un “camiño aleatorio” ou voo gaussiano, obedecendo a unha distribución log-normal no polo de atracción gaussiano, polo que o risco pode ser completamente neutralizado mediante a subscrición dos oportunos derivados (opcións) sobre os activos subxacentes. É evidente que estes modelos, como calquera outro modelo en calquera outro ámbito, supoñen unha simplificación da economía con vistas a posibilitar o seu tratamento matemático. A cuestión estriba en decidir se esta simplificación é admisible, i.e. se non ignora os trazos fundamentais do obxecto de estudo. Con carácter previo a isto é conveniente que fagamos un repaso pola xénese e desenvolvemento históricos do modelo.

A denominada revolución marxinalista ten lugar entre as décadas de 1870 a 1890 coas obras de Walras, Jevons, Edgeworth ou Pareto. Como destaca Mirowski, o proceso de unificación da teoría física en torno a principios variacionais e o principio de conservación da enerxía, completada cara ao ano 1840, foi determinante para a construción da teoría neoclásica: “*In many ways, the episode of the supposed simultaneous discovery of neoclassical value theory in the 1870s resembles nothing so much as that other putative instance of simultaneous discovery, the so called discovery of energy conservation in the 1840s. [...] Both energy and utility were based on large scale prohibitions of «something for nothing»: perpetual motion was banished in physics; natural scarcity was reified in economics*” (Mirowski, 1989, p. 218).

Mirowski salienta, ademais, o feito de que todos os protagonistas da revolución marxinalista incluíran nas súas obras publicadas de onde obtiveron a inspiración necesaria para o desenvolvemento do novo enfoque da economía: da física e dos seus métodos coetáneos. Pero, probablemente, é na obra de Irving Fisher onde mellor se establece a analoxía entrambas as dúas disciplinas. A tese de Fisher –codiri-

xida por Josiah Willard Gibbs– mesmo contén unha relación bixectiva dos conceptos dunha disciplina cos da outra¹³.

A grandes trazos a equivalencia do formalismo neoclásico e o da física clásica repousa sobre a transformación da utilidade –suposta nese momento cardinal– de cada individuo nun campo escalar no espazo de mercadorías $U = U(x_1, \dots, x_n)$, do que se pode derivar un campo vectorial conservativo de prezos $\vec{P} = \vec{\nabla}U(x_1, \dots, x_n)$. Este é o responsable de calquera transformación no espazo económico, que progresa, dentro das restricións orzamentarias, na dirección do máximo de utilidade.

É evidente que estas asuncións estaban directamente extraídas do formalismo da mecánica clásica do século XIX, que xa resumimos con anterioridade, e concretamente do movemento no seo de campos conservativos, de cuxo formalismo se podían extraer matematicamente multitude de conclusións no campo da economía¹⁴. Así, o campo de utilidade indícalles o camiño aos axentes a través de sinais-forzas que denominamos prezos, e o equivalente económico do traballo realizado pola forza-prezo –o resultado do cambio do punto de aplicación dos prezos no espazo económico que vén modificar o contido “enerxético” do sistema económico– é o gasto total

$$E = \int_A^B \vec{P} d\vec{x}$$

Neste marco, a traxectoria concreta seguida polo “móbil” económico –fora este un mercado illado como no caso de Jevons, ou o conxunto de todos os mercados interconectados como no caso de Walras– é indiferente para o cálculo do efecto dunha transformación económica (*path independence*), pois só son relevantes os seus estados inicial e final. Todo isto se completa coa hipótese –como se dun proceso termodinámico reversible estivésemos falando– de que nos estados intermedios o sistema tamén está en equilibrio, i.e. a transformación económica é sempre reversible. O proceso económico non sería senón un movemento no seo deste campo conservativo, sometido á correspondente restrición orzamentaria, o que levou á reformulación lagrangiana e hamiltoniana do formalismo. Toda a economía quedaba, pois, reducida a mecanismo, cumprindo o ideal da formulación da física social, tan de moda na época.

Neste novo marco –simple e elegante– era posible recuperar de maneira sinxela leis económicas que aparecían como deducións inmediatas das leis básicas do movemento. Por exemplo, a condición de campo de forzas (prezos) conservativo implica que $\vec{P} = \vec{\nabla}U(x_1, \dots, x_n)$ é un campo irrotacional $\vec{\nabla} \times \vec{P} = 0$, o que conduce a

¹³ Remitimos ao lector interesado nos detalles desta relación ás pp. 224-225 da referencia de Mirowski.

¹⁴ Non nos estenderemos neste punto, pois o lector pode consultar multitude de obras excelentes, entre elas a do propio Mirowski (1989).

“[the] integrability conditions in neoclassical theory, which often appear under the rubrics of Antonelli conditions, Slutsky conditions, or the strong axiom of revealed preference” (Mirowski, 1989, pp. 232-233):

$$\frac{\partial P_i}{\partial x_j} = \frac{\partial P_j}{\partial x_i} \quad i, j = 1 \dots n$$

Así pois, os pais da revolución marxinalista parecían atoparse ante algo máis que unha simple metáfora ao aplicar a nova física. A súa apropiación do concepto de campo e dos seus principios de conservación asociados que a física chegara a formular na época constitúen a esencia do formalismo neoclásico, que lle conferiu á economía a aura da máis matemática das ciencias sociais e ao funcionamento dos mercados a predictibilidade do campo gravitatorio e un fin ideal de equilibrio estable e autoaxustado.

Con independencia da escola de pensamento á que un se adscriba na actualidade, hai que recoñecer que a derivación deste formalismo no século XIX supuxo un importante avance na ciencia económica, iniciando unha descrición matemática da economía que conseguiu desprazar practicamente ao resto das escolas de pensamento económico –“with the single exception of Marxism”, dirá Mirowski–.

Durante o século XX unha plétora de grandes economistas “consolidated and built on the foundations laid out by the Marginalists”, en palabras de Beinhocker (2006). Así, na primeira parte do século XX destacaremos a Alfred Marshall, John Hicks –responsable da síntese das obras de Walras, Marshall e Pareto en *Value and Capital*–, John von Neumann e Óskar Morgenstern. Tras estas achegas prodúcese contribucións de Paul Samuelson e, en especial, de Kenneth Arrow e de Gerard Debreu, que demostraron que o equilibrio xeral dos mercados existe e que é óptimo no sentido paretiano do termo, establecendo deste modo de forma rigorosa a teoría neoclásica de equilibrio xeral. Todos os prezos –sinais metabólicos das condicións de demanda e oferta do mercado– se coordinan automaticamente para dar lugar a este equilibrio xeral, e canto máis preto esteamos da competencia perfecta, máis próximos estaremos do equilibrio óptimo e perfecto, do ideal económico. E todo iso obtido unicamente a partir dun conxunto moi reducido de hipóteses, non todas elas exentas de polémica.

A teoría neoclásica do equilibrio xeral toma como datos a dotación inicial de recursos (factores) produtivos e a súa distribución, as preferencias dos axentes individuais e a tecnoloxía de produción. A optimización das preferencias por parte dos consumidores (maximización condicionada da utilidade) e a maximización do beneficio por parte das “empresas” condicionada á tecnoloxía, isto é, ás posibilidades de combinar factores para obter bens, dan lugar ás funcións de demanda e oferta de bens, e de oferta e demanda de factores. Sobre a base destas funcións, no equilibrio dos mercados determináanse conxuntamente as cantidades de bens producidos e, polo tanto, a asignación dos factores á produción deses bens, os prezos dos bens e dos

factores e a distribución da renda, a cal depende da valoración dos recursos produtivos.

Nótese que a teoría é á vez unha teoría do valor (dos prezos dos bens), da distribución (dos prezos dos factores produtivos) e do nivel de actividade (do nivel de produción e do uso dos recursos). Nesta visión, como consecuencia do funcionamento libre do mecanismo de mercado –do sistema de prezos–, os mercados de bens e factores baléiranse; o equilibrio xeral supón o pleno emprego dos recursos. Ante calquera perturbación, os prezos (dos bens e dos factores) axústanse de tal modo que o sistema recupera o equilibrio. A consecución do equilibrio ante a variación dos prezos depende das posibilidades de substitución entre bens no consumo e das posibilidades tecnolóxicas de substitución entre factores na produción.

A teoría que de forma esquemática acabamos de expoñer constitúe o punto de partida (a base) ou, de ser o caso, o punto de referencia fundamental (*benchmark*) do *mainstream* da análise económica. De feito, xa nas primeiras décadas do século pasado, os principios e as conclusións centrais da teoría do equilibrio xeral constituían a base da visión dominante do funcionamento do sistema económico. A este respecto, a análise de Keynes do equilibrio con desemprego interpretouse en principio como unha ameaza á tradición establecida; porén, non se tivo que esperar moito para que as principais conclusións de Keynes fosen integradas no acervo común da teoría neoclásica.

O elemento central da análise de Keynes constitúe o denominado principio da demanda efectiva, isto é, a proposición de que o nivel de produción e de emprego (o nivel de actividade) está determinado polo nivel de gasto (de demanda) e, en particular, polo volume de investimento, e de que a necesaria igualdade entre o aforro e o investimento se alcanza (se mantén) a través das variacións do propio nivel de produción (de renda). A este respecto, a formulación é ben simple: dada a noción fundamental de que a demanda de consumo depende da renda e que, dado o nivel desta última, sempre existe unha brecha de gasto (de demanda) entre ese nivel e o gasto de consumo asociado a el, se infire que para xustificar (garantir) calquera nivel de renda –para que este sexa efectivo, para que se realice efectivamente– debe existir un volume de investimento suficiente como para absorber a brecha de gasto entre a renda e o consumo correspondente –para absorber o exceso do produto total sobre o que a comunidade decide consumir para ese produto–. Así, nesta formulación o volume de investimento, en conxunción coa propensión a consumir, determina o nivel de produción (renda); isto supón, claro está, que a produción (renda) pode estar en equilibrio a calquera nivel e non só ao nivel correspondente ao pleno emprego –o que garante o pleno emprego–.

Esta visión do proceso económico supón unha ruptura coa concepción tradicional de que o nivel de produción (a cantidade producida e demandada de todos e cada un dos bens) se determina conxuntamente cos prezos, de que o equilibrio (de pleno emprego) se alcanza a través do xogo dos prezos relativos e, polo tanto, de que a igualdade entre o aforro e o investimento se mantén a través das variacións do tipo de xuro. De seu, o principio da demanda efectiva non depende en absoluto

do papel equilibrador dos prezos relativos e, en particular, do papel do tipo de xuro; de feito, a propensión ao consumo contéplase como o elo fundamental que liga o volume de investimento, considerado independente do propio proceso de xeración de renda, co nivel de produción e co volume de aforro correspondente; así, as variacións do produto (das cantidades) ocupan o lugar do mecanismo de prezos (da oferta e da demanda) como mecanismo equilibrador do sistema.

Pasado o *shock* inicial provocado pola formulación de Keynes, a súa análise foi interpretada de modo que puidese ser incorporada ao *corpus* central do *mainstream* neoclásico. Un primeiro paso foi o modelo IS-LM de Hicks que proporciona unha teoría da demanda agregada. O paso fundamental, así e todo, corresponde a Modigliani, quen introduce o lado da oferta de forma perfectamente neoclásica, e quen sobre esta base mostra que os resultados de Keynes se alcanzan baixo o suposto de que o salario monetario é ríxido. Na medida en que parece razoable admitir que no curto prazo os salarios (ou os prezos) non son perfectamente flexibles, chégase ao consenso de que a economía “keynesiana” se debe entender como unha teoría referida ao axuste ante fluctuacións no curto prazo, mentres que no longo prazo, en tanto que se pode considerar a perfecta flexibilidade de prezos e salarios e, polo tanto, se poden eludir as complicacións inherentes aos procesos de axuste, a teoría do equilibrio xeral recobra o seu papel central ou de referencia (*benchmark*) na análise. Este consenso non é senón a denominada síntese neoclásica que marca, non sen friccións, a axenda de investigación ata a crise dos anos setenta.

A síntese entra en crise na década dos anos setenta por razóns tanto empíricas coma teóricas. De forma esquemática, por un lado, está a incapacidade da economía “keynesiana” de explicar (mesmo de acomodar) a ocorrencia conxunta de desemprego e inflación que segue ao primeiro *shock* petrolífero e, por outro, fórmulase a crítica de que a economía “keynesiana” está baseada en supostos *ad hoc*, sen ningún tipo de base ou de fundamentación microeconómica.

Durante a década dos anos oitenta, a denominada nova macroeconomía clásica ocupa o centro da escena, coa súa proposta de que a análise debe estar baseada no comportamento de axentes individuais optimizadores, que manteñen expectativas racionais (en contraposición ás expectativas adaptativas da análise anterior) nunha contorna de prezos flexibles e de baleiramento de mercados. A resposta “keynesiana” –da nova economía “keynesiana”– é unha axenda de investigación centrada, precisamente, no desenvolvemento de fundamentos microeconómicos rigorosos para as súas formulacións esenciais.

A partir de aquí, un novo consenso comeza a desenvolverse: a nova síntese neoclásica, cuxo punto central de acordo é que a macroeconomía debe desenvolverse sobre fundamentos microeconómicos sólidos. En palabras de Woodford (2008, pp. 3-5): “*It is now widely agreed that macroeconomic analysis should employ models with coherent «intertemporal general equilibrium foundations». It makes it possible to analyze both short-run fluctuations and long-run growth within a single, consistent framework. [...]microeconomic and macroeconomic analysis are no longer considered to involve fundamentally different principles[...]. The*

methodological stance of the New Classical school and the real business cycle theory has become the mainstream. But this does not mean that the Keynesian goal of structural modeling of short-run aggregate dynamics has been abandoned. Instead, it is now understood that one can construct and analyze dynamic general-equilibrium models that incorporate a variety of types of adjustment frictions, that allow these models to provide fairly realistic representations of both shorter-run and longer-run responses to economic disturbances. [...] The dynamic stochastic general equilibrium (DSGE) models now used to analyze the short-run effects of alternative policies often involve imperfect competition in both labor markets and product markets; wages and prices that remain fixed for intervals of time [...] what is important is to have general-equilibrium models in the broad sense that all equations of the model be derived from mutually consistent foundations [...]".

No propio desenvolvemento da primeira síntese fórmulase a teoría neoclásica do crecemento debida a Solow (1956, 1957). O problema do crecemento económico constitúe o tema central arredor do que xira a análise da economía política clásica. Agora ben, coa chegada da revolución marxinalista, a cuestión do crecemento desaparece do ámbito da análise económica na medida en que esta se centra no problema da asignación estática de recursos dados. De feito, non é ata despois da *Teoría xeral* de Keynes, e como consecuencia da análise contida nela, cando os economistas, a partir da formulación orixinal desenvolvida de modo independente por Harrod e por Domar, volven prestarlle atención á cuestión do crecemento, aínda que de forma moito máis limitada. As formulacións de Harrod e de Domar constitúen un intento de estender a análise de Keynes da determinación do nivel de actividade económica –do nivel de emprego ou do grao de utilización efectiva dos recursos– á dinámica do sistema, é dicir, á determinación da taxa de crecemento (de equilibrio) dese sistema.

A clave da análise de Domar é a natureza dual do investimento. Na *Teoría xeral*, Keynes só considera o investimento no seu aspecto de demanda, é dicir, a súa natureza como demanda ou gasto e, polo tanto, o seu papel como variable fundamental e determinante, a través da operación do multiplicador, do nivel efectivo de renda e de emprego do sistema. Agora ben, o investimento tamén xera capacidade produtiva, é dicir, supón unha adición á capacidade existente. En efecto, o gasto de investimento nun período dado proporciona a demanda do output (en exceso do consumo) que resulta da capacidade produtiva existente, á vez que supón un aumento desa capacidade en períodos futuros. Así, un determinado nivel de utilización da capacidade produtiva nun determinado período esixe que se leve a cabo un certo gasto de investimento; pero, na medida en que este supón un aumento da capacidade instalada, a utilización daquela no período seguinte requirirá un maior nivel de investimento. Noutras palabras, se o investimento nun período asegura a utilización da capacidade produtiva, dá lugar, á súa vez, a un exceso de capacidade no período seguinte, a non ser que o gasto de investimento aumente en proporción adecuada; polo tanto, o mantemento ao longo do tempo do grao de utilización da capacidade produtiva require un gasto de investimento continuamente crecente.

Inmediatamente xorde a cuestión de cal *debe ser* a taxa de crecemento do investimento se o nivel de utilización da capacidade produtiva se ha de manter no tempo; a resposta a este problema dá lugar á noción ben coñecida de taxa de crecemento garantida, determinada polo cociente entre a taxa de aforro e a ratio capital-output.

A análise de Domar móvese estritamente ao nivel da consistencia lóxica –das condicións de consistencia– da dinámica do sistema, é dicir, refírese estritamente á existencia dunha taxa que asegure o crecemento sostido deste. A este respecto, Harrod establece unha distinción entre a taxa real ou efectiva de crecemento e a taxa garantida, e sobre esta base desenvolve a súa análise do equilibrio dinámico do sistema, e en particular a súa formulación da inestabilidade intrínseca da senda de crecemento de equilibrio. Se ambas as dúas taxas son iguais, é dicir, se a taxa efectiva de crecemento é igual á taxa garantida, de modo que os empresarios “están satisfeitos co que están facendo” e, polo tanto, están dispostos a manter o mesmo comportamento e a “continuar a mesma liña de progreso”, o sistema manterase en equilibrio dinámico en tanto en canto non se produza ningún cambio nas circunstancias que o determinan. Agora ben, ese equilibrio é intrinsecamente inestable; esta inestabilidade dinámica constitúe o problema ben coñecido do “fío da navalla” (*knife-edge problem*) –“primeiro problema de Harrod”–, segundo o que a senda de equilibrio é como o “fío dunha navalla”: se o sistema se atopa nesa senda –se está en equilibrio dinámico–, continuará crecendo a través dela en tanto que non teña lugar ningún cambio que o perturbe; con todo, calquera desviación a ambos os dous lados da senda de equilibrio ampliarase progresivamente, de modo que o sistema se afastará cada vez máis dela.

Agora ben, o feito de que o sistema creza ao longo da senda de equilibrio –de que a taxa efectiva de crecemento coincida coa taxa garantida– non significa que se consiga o pleno emprego do traballo. Nun sistema en equilibrio dinámico, o nivel de emprego (ou de desemprego) do traballo depende da taxa natural de crecemento, dada esoxenamente pola taxa de crecemento da poboación e pola taxa de progreso técnico, así como da súa relación coa taxa garantida. Así, o equilibrio dinámico será de pleno emprego se e só se a taxa garantida é igual á taxa natural. Ademais, se ambas as dúas taxas difiren, na medida en que están determinadas por factores diferentes, os cales se consideran dados, non existe ningún mecanismo no sistema que poida conseguir a igualdade entre elas; neste sentido, non se pode mostrar que no equilibrio dinámico do sistema se dea unha tendencia ao pleno emprego do traballo. É, precisamente, a este problema –“segundo problema de Harrod”–, é dicir, á posible diverxencia entre a taxa natural e a taxa garantida de crecemento, á falta dun mecanismo que asegure a súa igualdade e, polo tanto, á posibilidade de que o equilibrio dinámico do sistema se caracterice pola existencia de desemprego, ao que se dirixen os modelos neoclásico e keynesiano de crecemento. De feito, o problema da inestabilidade do equilibrio foi en xeral totalmente relegado na literatura sobre o crecemento económico.

A solución neoclásica ao segundo problema de Harrod, formulada inicialmente por Solow (1956, pp. 65-94)¹⁵, descansa na posibilidade de substitución entre os factores capital e traballo. De acordo con Solow, o problema de Harrod derivase directamente da total inflexibilidade en termos da elección de técnicas imposta na análise como consecuencia de supoñer unha función de produción de coeficientes fixos. O modelo de Solow céntrase exclusivamente no lado da oferta. A súa análise –e en xeral a análise neoclásica do crecemento– baséase no suposto de que o output non consumido é inmediatamente aforrado e investido (Solow, 1956, p. 66). A este respecto, pode afirmarse que a análise neoclásica está baseada na “identidade de Say” no sentido (clásico) de que o “aforro é investimento”. Como sinala Sen (1970, pp. 23-24), a análise neoclásica soe interpretarse de dúas formas: “*unha primeira interpretación é supoñer que o investimento «ex-ante» e o aforro «ex-ante» se igualan a través da planificación e da intervención do goberno*”¹⁶. *Outra interpretación é considerar o modelo como unha descrición das consecuencias no tempo de manter o pleno emprego e non como un modelo causal do que realmente ocorre. Nesta interpretación, o obxectivo do modelo Solow-Swan sería investigar a senda de pleno emprego e non describir o que de feito ocorrería nunha economía capitalista con ou sen control. Isto é menos heroico e menos criticable*”.

Sobre isto, en nota a pé de páxina, Sen (1970, p. 24) sinala que: “*o propio Solow prefire esta interpretación. Nunha nota a este autor, Solow escribe: isto paréceme máis descritivo que falar da ausencia dunha función de investimento. Isto é certo. Pero a idea é investigar sendas de pleno emprego, non máis*”.

E continúa Sen (1970, p. 24): “*cito esta nota porque non estou seguro de que isto estea suficientemente claro no artigo de Solow, e calquera lector podería sacar a impresión oposta, especialmente da «Introdución».* Certamente, na ampla literatura á que o artigo de Solow deu lugar, atribuíuselle moito máis que simplemente investigar sendas de equilibrio”.

No modelo neoclásico, ante unha diverxencia entre a taxa garantida e a taxa natural de crecemento, o peso do axuste recae sobre a taxa garantida, e en particular sobre a relación capital-produto. De acordo con esta interpretación, no modelo de Harrod, dado que está baseado nunha función de produción de coeficientes fixos, o sistema de prezos, e en especial os prezos (relativos) dos factores –a súa remuneración real–, non desempeña papel ningún na análise. Porén, unha vez que se considera unha función de produción de tipo xeral, caracterizada pola posibilidade de substitución (continua) entre os factores de produción –entre o capital e o traballo–, cómpre considerar os cambios que se producen no método de produción, é dicir, na intensidade de uso dos factores, na relación capital-traballo e, polo tanto, na relación capital-produto, ante as variacións do prezo relativo destes –tipo de xuro *ver-*

¹⁵ Xunto con Solow, adoita considerarse a Swan e a Meade como precursores da teoría neoclásica do crecemento. A este respecto, véxanse Swan (1956, pp. 334-361) e Meade (1961).

¹⁶ A este respecto, Sen, en nota a pé de páxina, cita a Swan, quen supón que “*ou ben as autoridades leron a Teoría xeral ou ben son socialistas que non necesitan facelo*”.

sus taxa de salario real¹⁷-. Nótese a este respecto que as taxas garantida e natural poden considerarse como as taxas de crecemento da demanda e da oferta de traballo, respectivamente. Como argumenta Solow (1956, pp. 67-68) en relación coa expresión do crecemento da forza de traballo $L(t) = L_0 e^{+nt}$, que cerra o seu modelo, esta pode considerarse “[...] como unha curva de oferta de traballo, a cal indica que unha man de obra que crece exponencialmente se ofrece para o seu emprego de forma totalmente inelástica. A curva de oferta de traballo é unha liña vertical que se despraza á dereita ao longo do tempo a medida que a forza de traballo crece de acordo coa expresión anterior. Daquela, a taxa de salario axústase de modo que todo o traballo dispoñible se atope empregado, e a ecuación de produtividade marxinal determina a taxa de salario que rexerá en cada momento. [...] tamén está implicado un suposto de pleno emprego do stock de capital dispoñible. En todo momento do tempo, o stock de capital preexistente (resultado da acumulación anterior) ofrécese inelásticamente. Así, existe unha ecuación similar de produtividade marxinal para o capital, a cal determina o aluguer real por unidade de tempo dos servizos do stock de capital”.

De feito, a análise descansa na (suposta) existencia dunha ordenación perfecta das técnicas de produción, no sentido específico de que existe unha relación inversa ben comportada entre a intensidade no uso dos factores e o prezo relativo destes (tipo de xuro/taxa de salario real). Sobre esta base, o modelo mostra que, dada a taxa natural de crecemento, sempre existe un método de produción para o cal a taxa garantida é igual á natural. Como argumentan Hahn e Matthews (1967, p. 11): “o que o argumento neoclásico significa é que calquera tendencia do stock de capital a crecer máis ou menos rapidamente supón que a [forza de traballo] se pode eludir elixindo un método de produción cunha intensidade de capital apropiada. [...] A taxa de crecemento de equilibrio é a taxa natural, e o problema de Harrod da diverxencia entre a taxa garantida e a taxa natural evítase facendo a taxa garantida s/v unha variable, debido á flexibilidade de v , en vez dunha constante”. Ou, como o propio Solow (1956, p. 68) establece, o proceso de crecemento pode entenderse da seguinte forma: “en calquera momento, a forza de traballo dispoñible está dada pola ecuación $L(t) = L_0 e^{+nt}$ e o stock de capital dispoñible tamén é un dato. Como a remuneración real dos factores axústase de tal modo que se consiga o pleno emprego do traballo e do capital, pode usarse a función de produción para obter a cantidade de produto en cada momento; [...] a propensión a aforrar dános a parte do produto neto que será aforrada e investida. Deste modo, coñecemos a acumulación neta de capital no período e engadíndoa ao stock de capital xa acumulado obtemos o capital dispoñible para o período seguinte, e todo o proceso pode ser repetido”.

Así, se a taxa garantida excede a taxa natural prodúcese unha escaseza de forza de traballo, de tal modo que a taxa de salario aumenta; o encarecemento do traballo

¹⁷ A remuneración real dos factores capital e traballo –tipo de beneficio ou xuro (taxa de aluguer real “rental rate” dos servizos do capital) e taxa de salario real– suponse dada polas respectivas produtividades marxinais.

(relativo ao capital) induce a elección de técnicas máis intensivas en capital, o que supón que a intensidade de uso do capital (capital por unidade de traballo) e a razón capital-produto aumentan; en consecuencia, a taxa garantida de crecemento diminúe progresivamente ata que se iguala á taxa natural dada.

O caso no que a taxa garantida é inferior á taxa natural é perfectamente simétrico. A este respecto, podemos supoñer que o sistema se atopa inicialmente en equilibrio e que a taxa natural aumenta como consecuencia do progreso técnico¹⁸, de modo que a taxa garantida é agora menor que a nova taxa natural. Nesta situación prodúcese un exceso de forza de traballo (unha tendencia ao desemprego desta)¹⁹ e, en consecuencia, a taxa de salario cae; o abaratamento do traballo (relativo ao capital) conduce á elección de técnicas cunha maior intensidade de uso do factor traballo, é dicir, caracterizadas por unha relación capital-traballo (e capital-produto) menor. Así, nesta situación as relacións capital-traballo e capital-produto diminúen e, polo tanto, a taxa garantida aumenta ata que, finalmente, se iguala ao novo valor da taxa natural, de tal modo que o sistema alcanza un novo equilibrio dinámico de pleno emprego para unha maior taxa de crecemento.

Como se pode inferir da síntese anterior, no ámbito da teoría neoclásica do crecemento, e como consecuencia fundamentalmente do suposto de rendementos decrecentes á acumulación de capital (e da propia esoxeneidade da taxa natural), a taxa de crecemento de equilibrio é independente da taxa de aforro (investimento). En particular, a taxa de crecemento do output por unidade de traballo depende unicamente da taxa de progreso técnico, a cal se considera dada esoxenamente.

Na mesma liña conceptual que o modelo básico que acabamos de expoñer, Solow (1957) desenvolve a metodoloxía da contabilidade do crecemento (*growth accounting*), cuxo obxecto é separar aquela parte do crecemento do produto (renda) total que se debe ao progreso técnico –a contribución do progreso técnico ao crecemento– daquela que resulta do crecemento dos factores produtivos –a contribución ao crecemento do capital e do traballo–. Como sinala Solow, o termo progreso técnico utilízase aquí como unha expresión reducida de calquera causa que dea lugar a un desprazamento da función de produción. Así, a separación da contribución ao crecemento do output dos factores capital e traballo, por un lado, e do progreso técnico, por outro, é equivalente á descomposición das variacións do output total en “movementos ao longo da función de produción” e en “desprazamentos da propia función”.

Na análise, o crecemento do output descomponse de forma aditiva no crecemento nun determinado período dos factores capital e traballo, ponderados polas súas participacións no produto (renda) total, e na contribución do progreso técnico. Así,

¹⁸ En presenza de progreso técnico, a taxa natural de crecemento está dada pola suma da taxa de crecemento da forza de traballo e a taxa de progreso técnico (crecemento da produtividade).

¹⁹ Nótese que un aumento da taxa de progreso técnico é igual, nos seus efectos, a un maior crecemento da forza de traballo; de feito, supón un aumento da oferta de traballo “efectiva” –da forza de traballo en “unidades de eficiencia”–.

dado o crecemento do produto total nese período, esta última contribución –como, a miúdo se expresa, a contribución do crecemento da produtividade total dos factores (*total factor productivity*)– ao crecemento do output pode estimarse como *residuo*. En particular, na súa análise da economía americana no período 1909-1949, Solow atopa unha contribución do progreso técnico dun 90%.

Os resultados de Solow provocaron bastante inquietude no ámbito do enfoque neoclásico. Dada a concepción implicada do termo de progreso técnico como un factor esóxeno do que non se proporciona explicación ningunha, e con independencia de que se contemple como representación daqueles factores (non identificados) que poidan dar lugar a un desprazamento da función de produción ou de que, de feito, se considere como representación do progreso técnico en sentido estrito, os resultados de Solow supoñen que no dito ámbito o crecemento económico permanece totalmente inexplicado²⁰.

A partir desta achega, desenvólvese unha ampla literatura centrada na contabilidade do crecemento, cuxo obxectivo en xeral é, precisamente, reducir o residuo. Así, por exemplo, intenta desagregarse o capital en termos tanto dos diversos elementos que o compoñen como das diferentes xeracións en uso; á súa vez, o traballo descomponse de acordo coa súa estrutura de cualificacións e da súa composición en termos de idade, sexo, etc. En todo caso, a concepción fundamental da contabilidade do crecemento, intrínseca ao propio modelo neoclásico, mantense basicamente inalterada. Neste sentido, pode afirmarse que, á parte de identificar certos elementos que previamente formaban parte do residuo, as extensións do traballo de Solow non supoñen senón un simple cambio na forma de contabilización.

Despois dun certo letargo no tempo, a partir dos anos oitenta a teoría do crecemento experimenta un renacemento que se materializa na denominada nova teoría do crecemento ou teoría do crecemento endógeno. Quizais, unha das principais motivacións deste renovado interese na cuestión do crecemento reside na falta dunha converxencia real de renda entre países, pero tamén, desde logo, e desde un punto de vista interno á propia análise, na falta de satisfacción que supón non dispoñer dunha explicación coherente das fontes do progreso técnico e da contribución deste ao proceso de crecemento económico.

En termos da súa estrutura básica, a nova teoría mantense dentro do marco analítico do enfoque neoclásico e, neste sentido, propónse integrar resultados derivados das análises microeconómicas do progreso técnico, que en moitos casos poden supoñer a consideración de fallos de mercado e de situacións de competencia imperfecta. Desde unha perspectiva máis concreta e, á vez, máis próxima ao propio desenvolvemento dos modelos de crecemento, parece que a gran motivación deste novo interese é considerar a taxa de progreso técnico (de crecemento da produtividade) como endóxena e, máis concretamente, como determinada polas decisións de aforro (investimento) dos axentes económicos. Os modelos que normalmente se

²⁰ Neste sentido, a medida da contribución do “progreso técnico” veu considerarse como unha “*medida da nosa ignorancia*”.

considera que abren o camiño do desenvolvemento desta nova teoría son os de Romer (1986) e Lucas (1988), aínda que ambos os dous deben considerarse debedores dos traballos de Arrow (1962) e de Uzawa (1965). O elemento común destes dous modelos reside na presenza de externalidades. No modelo de Romer considérase explicitamente o investimento das empresas en investigación e desenvolvemento (I+D), cuxos resultados pasan a formar parte do stock común de coñecemento; en definitiva, o crecemento da produtividade resulta dos desbordamentos (*spillovers*) do esforzo privado en I+D. Pola súa parte, no modelo de Lucas, o investimento dos axentes individuais materialízase na formación de capital humano; neste caso, o crecemento da produtividade derivase dos desbordamentos que resultan da acumulación de capital humano²¹.

Logo deste breve excursus polo desenvolvemento do *mainstream* da economía, que non pretende en ningún caso ser exhaustivo, non cabe dúbida de que estamos ante un formalismo dunha gran potencia simbólica, dunha enorme capacidade de suxestión e aínda de sedución. Mediante un conxunto relativamente acoutado de suposicións aparentemente adecuadas á natureza dos axentes económicos, é capaz de predicir a existencia dunha situación ideal na que calquera incentivo para o cambio se neutralizou alcanzándose o óptimo de todos os axentes implicados na economía. É difícil imaxinar un formalismo máis prometedor e apetecible, calidades que, xunto coa súa natureza matemática que aparenta permitir a predición, poden explicar o seu éxito na historia do pensamento económico. Con todo, ao longo do seu case século e medio de existencia tivo que facer fronte a fortes controversias e ataques, así como a importantes retos.

Desde a perspectiva desta contribución, queremos destacar as dificultades do formalismo neoclásico para dar conta da existencia de organización e de estrutura na economía, e do carácter inherentemente evolutivo destas. A nosa tese é que unicamente mediante a integración dos avances da física contemporánea (termodinámica non lineal, física de sistemas complexos...) pode acometerse adecuadamente esta tarefa. A este respecto, e ata onde sabemos, escaso esforzo se lle dedicou á conciliación do formalismo neoclásico coa termodinámica, probablemente porque en esencia ambos os dous formalismos resultan incompatibles.

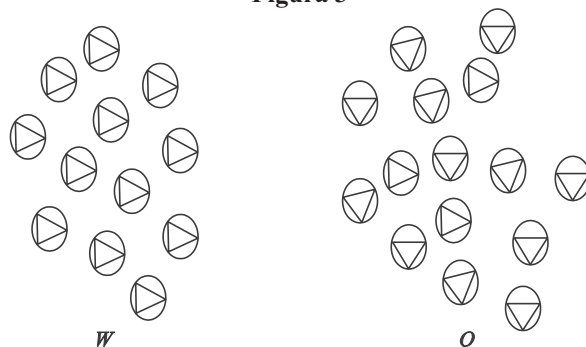
Desde sempre existiu unha necesidade de principios de conservación no marco do formalismo neoclásico, unha cantidade que pasa dunha forma a outra, de materias primas a utilidade pasando por diñeiro, no que é unha sorte de conservación da enerxía no sentido no que a establece a primeira lei da termodinámica, na que se recolle a equivalencia de calor e traballo no que respecta á variación da enerxía do sistema, $\Delta U = Q + W$. Agora ben, unha das consecuencias da segunda lei da termodinámica é que esa equivalencia entre calor e traballo mecánico só é aparente, pois a interconvertibilidade dunha na outra é unidireccional: o traballo pode ser convertido en calor integramente, pero a calor non pode converterse integramente en tra-

²¹ Con posterioridade á obra destes autores desenvolveuse unha ampla literatura no campo cuxo resumo excede con moito o ámbito deste traballo.

ballo²². E isto é así porque o traballo mecánico é un fenómeno macroscópico asociado ao movemento molecular ordenado, mentres que a calor é movemento molecular desordenado (figura 3). Establécese así unha ordenación no espazo de estados que son accesibles de maneira espontánea polo sistema, estando vedados todos aqueles que supoñan un incremento da orde no sistema de maneira espontánea, i.e. unha diminución da entropía, sen pagar un prezo por iso.

Esta é a esencia última da segunda lei, que establece unha restrición aos procesos que, malia conservar a enerxía, son espontaneamente observables. Ademais, desde a segunda lei da termodinámica é fácil de interpretar o feito de que todos os procesos cronolóxicos sexan irreversibles: neles prodúcese intercambio de enerxía en forma desordenada dunha ou doutra maneira, isto é, crecemento de entropía. Agás nos hipotéticos procesos mecánicos adiabáticos, en todos os procesos reais se perde de maneira irreversible información acerca do estado mecánico microscópico dos seus constituíntes, polo que os estados intermedios entre os estados terminais de equilibrio non poden etiquetarse mediante un reducido número de variables termodinámicas. Os procesos reversibles só son unha aproximación útil e conveniente para analizar procesos que involucran estados terminais de equilibrio, e nos que a evolución en si non é obxecto de interese.

Figura 3



As profundísimas implicacións que ten esta lei están moito máis alá do ámbito deste traballo. Para os nosos propósitos abonda con sinalar que a recepción deste principio no ámbito do formalismo neoclásico de equilibrio xeral, se acaso posible, sería extremadamente complicada²³. De feito, non foi obxecto dunha integración

²² Non é, polo tanto, posible un móbil perpetuo de segunda especie que se manteña na produción de traballo unicamente mediante a absorción de calor dun foco.

²³ Cómpre destacar neste sentido que Walras non estaba familiarizado co formalismo termodinámico, en particular coas implicacións da segunda lei. Non é este, desde logo, o caso de Fisher, para quen a identidade do seu director de tese nos garante o acceso a estes coñecementos. De acordo con Foster (1993), Jevons tratou de aplicar o concepto de entropía na súa obra *The Coal Question* (1865), aínda que con escaso éxito. Novamente, segundo Foster, Marshall, consciente da dificultade de Jevons de aplicar o concepto de entropía, e con el a segunda lei da termodinámica, simplemente ignorouno nos seus *Principles*.

adecuada ata a data. En palabras de M. Shahid Alam (2005, p. 2), da Northeastern University of Boston: “[neoclassical economist’s account of the economy] fails to come to terms with the contribution of energy to the economy. Few economists have worried about this omission. Among economists, Nicholas Georgescu-Roegen [...] stands nearly alone in taking economics to task for this omission. He pointed out that Marxists and neoclassical economists abstract from nature; they take resources and energy flows for granted and ignore the economy’s output of wastes. This not only produces mechanistic models of the economy, in which economic processes are reversible, but it ignores the implications of entropy for economic activity and growth. Standard economics, Georgescu-Roegen [...] argues, ignores the fact that terrestrial resources of energy and materials are irrevocably used up and the harmful effects of pollution on the environment accumulate. «The economists» optimism about the endless possibilities of growth is based on this truncated world view that shuts out nature from its calculus”.

E todo iso malia que, parafraseando a Von Clausewitz, poderíamos dicir que a economía non é senón unha continuación da termodinámica por outros medios. Toda a actividade económica debe estar, como non pode ser doutro modo, sometida ás leis da física. É sinxelo comprender que todos os procesos asociados á produción estean de feito suxeitos a aquelas, pois o seu carácter material e físico é indiscutible. Pero tamén o están os procesos de crecemento económico, que implican o desenvolvemento das estruturas económicas e aínda a creación doutras novas. E o propio intercambio non pode estar, na nosa opinión, á marxe das leis termodinámicas, aínda que estas adopten unha forma peculiar neste ámbito óntico.

O traballo pioneiro na recepción da segunda lei da termodinámica no formalismo económico foi o de Nicolas Georgescu-Roegen no seu xa clásico *The Entropy Law and the Economic Process* (1971), no que se interroga acerca do papel da entropía no proceso económico. Para el, a segunda lei é a explicación última da escaseza económica, e a entropía nun sistema económico cerrado debe alcanzar un máximo exactamente igual que no caso de calquera outro sistema termodinámico, o que permitía introducir de maneira natural a irreversibilidade no proceso económico, xa presente mesmo na obra de Marshall (Foster, 1993). Para Georgescu-Roegen (Foster, 1993, p. 983), “[...] thermodynamics is at bottom a physics of economic value –as Carnot unwittingly set it going– and the Entropy Law is the most economic in nature of all natural laws”. “[...] the Entropy Law is the taproot of economic scarcity”.

Naturalmente, unha vez introducida a entropía no formalismo, todo o edificio neoclásico mostra as súas debilidades, ocultas tras a súa esplendorosa aparencia (Foster, 1993, p. 983): “The economics of entropy also, of course, applies in the economic domain-economic structures are created with low entropy characteristics, they are used in an economizing manner through time and they are scrapped when the opportunity cost of maintaining them becomes too high. Thus, in Georgescu-Roegen’s view, Marshall’s economics is a necessary consequence of the existence of the entropy law and cannot be intelligible from any other perspective.

In particular, he emphasizes that Marshall's economics makes no sense at all in a static neoclassical framework of perpetual motion machines”.

Neste parágrafo de Foster están condensadas algunhas das implicacións máis formidables da segunda lei no que ao proceso económico se refire: a) o feito de que en sistemas abertos se formen organizacións económicas; b) que toda organización sexa unha forma de disposición de recursos de baixa entropía; e c) que esta condenada á súa desorganización cando non sexa posible manter os fluxos adecuados para o seu sostemento. Todo isto é, desde logo, incomprendible no marco do pensamento neoclásico, no que todas as estruturas están dadas con anterioridade ao proceso económico, son inmutables e non degradan enerxía (polo que sería posible un *perpetuum mobile* de segunda especie). Unha economía é un sistema con moitos axentes, polo que a súa natureza debe estar máis próxima á dun sistema termodinámico que á dun sistema puramente mecánico. A segunda lei pode axudarnos a entender movementos no espazo económico que serían difíciles de comprender en ausencia deste concepto. Así, aínda que nas inmediacións do noso estado teñamos outros de baixa entropía accesibles, o sistema simplemente evolucionará cara aos de maior entropía de maneira espontánea, pois estes son –de acordo co principio de Boltzmann– moito máis numerosos e, polo tanto, máis probables. Por iso, o mecanismo de exploración de novos estados, as fluctuacións microscópicas dos axentes que compoñen o sistema, conducen cara a situacións de maior desorde de maneira espontánea.

Con posterioridade á obra de Georgescu-Roegen, producíronse diferentes aplicacións do concepto de entropía e da segunda lei da termodinámica no ámbito da economía. Destacaremos o traballo de E.T. Jaynes (1991), no que se conxectura acerca de que a dirección do cambio económico se debe ás entropías dos estados veciños a un dado tanto como a calquera outro factor dinámico subxacente.

Así mesmo, merece mención a formulación dunha equivalencia explícita entre a economía e a termodinámica de equilibrio debida a Wayne Saslow (1999), na que tamén se realiza unha conexión coa mecánica estatística mediante a reinterpretación do volume fásico no espazo de estados (i.e. o número de microestados accesibles a un determinado sistema físico) en termos do grao de diversidade económica.

Dentro das aplicacións da termodinámica clásica de equilibrio ao proceso económico, tamén merece mencionarse o traballo de E. Smith e D. Foley (2008), no que os autores demostran que a economía na que todos os axentes teñen preferencias cuasilineais nalgún ben teñen unha estrutura de intercambio (*trading-constraint structure*) equivalente á estrutura de sistemas físicos con ecuacións de estado da termodinámica clásica, proporcionando ademais equivalentes económicos para magnitudes e potenciais termodinámicos, incluíndo a temperatura e a entropía.

Tamén se rexistraron intentos de aplicar a termodinámica de procesos irreversibles na rexión lineal ao estudo de procesos económicos, entre os que citaremos os traballos de Nuwayhid *et al.* (2006), que analiza os fluxos difusores de mercadorías na economía, ou de Tsirlin *et al.* (2003), quen proban que a economía e a termodinámica poden dividirse en clases de procesos equivalentes con tipos comúns de

procesos de disipación mínima, ademais de formular unha analogía entre a disipación de capital e a entropía. Ata a data, non coñecemos ningunha aplicación da termodinámica non lineal ao estudo de procesos económicos, aspecto sobre o que volveremos no sucesivo.

En suma, o *core* fundamental da teoría económica contemporánea (teoría neoclásica de equilibrio xeral) segue aferrado a un formalismo extremo derivado da mecánica do século XIX –e excluindo a termodinámica–, que considera a economía como un sistema cerrado dominado por un campo de utilidade, e no que rexe un principio de conservación da cantidade total de utilidade dispoñible, e unha idea de existencia de equilibrio final aínda en condicións de crecemento. É un marco teórico baseado en hipóteses sobre o comportamento de axentes independentes (agás cando se reúnen nas poxas) como o inmediato acceso á información do campo de prezos, o seu procesamento en termos de racionalidade perfecta²⁴, e a existencia de competencia tamén perfecta nos mercados e de rendementos decrecentes. Todo isto permite chegar ao óptimo de Pareto que representa o equilibrio xeral. Todas as modificacións que se introduciron neste núcleo formal –racionalidade limitada, competencia imperfecta, asimetrías de información e información limitada, externalidades ambientais que tratan de integrar o problema entrópico subxacente–, en palabras de Beinhocker, “*were indeed variations on a theme rather than new symphonies themselves*”.

Estamos agora en posición de responder a pregunta que nos formulamos ao comezo desta sección sobre se esta simplificación que representa a denominada síntese neoclásica é ou non excesiva, dada a natureza do sistema económico. E respondemos que, na nosa opinión, se trata dunha hipersimplificación determinista e reduccionista na súa concepción, que ignora trazos esenciais da economía e que supón comportamentos irrealis dos axentes económicos de cara a unha simplicidade matemática, en ausencia –e, ás veces, mesmo en contra– da evidencia empírica, ata o punto en que non é posible consideralo un modelo válido (por non realista) para aproximarse á realidade económica. E neste punto, formulada a crítica, debemos pronunciarnos acerca de por que esta teoría –utilizada de maneira xeneralizada por axentes e institucións económicas– é capaz de interpretar de maneira parcialmente correcta aspectos da realidade económica. Trátase dun modelo límite que por termo medio captura de forma aproximada a realidade económica á maneira en que a mecánica clásica o fai cunha realidade intrinsecamente cuántica? En mecánica clásica o estado mecánico da partícula móbil (a súa posición e velocidade ou momento) parece ser completamente describable sen máis limitación que a incerteza de medida, a diferenza do que sucede cando o móbil é microscópico, cando rexe o principio de incerteza que prohibe de maneira definitiva o acceso simultáneo a eses observables. Con todo, a medida que se aumenta o tamaño do sistema ou os números cuánticos, os efectos cuánticos van desaparecendo e recupérase o formalismo clásico.

²⁴ A racionalidade limitada (*bounded rationality*) de Herbert Simon tivo unha escasa recepción dentro do formalismo neoclásico de equilibrio xeral.

co no que se denomina principio de correspondencia. Sucede algo semellante na economía?, é a teoría neoclásica o límite dalgún formalismo aínda descoñecido e que teña unha mellor base empírica?, ou é que toma por definición a realidade como resultado do modelo? En ausencia dunha resposta plenamente satisfactoria a estas preguntas, e co fondo das escalas temporais²⁵, na nosa opinión o formalismo neoclásico –de cuxa contribución ao desenvolvemento da economía, como xa dixemos anteriormente, non dubidamos– debe realizar o mesmo proceso que a física na que se inspirou no século XIX, e que describimos na sección anterior, e chegar a un modelo realista capaz de integrar os trazos esenciais do sistema económico que trata de describir: un sistema complexo autoadaptativo.

Para isto, entre outras cousas, ten que incluír no seu formalismo o equivalente á termodinámica en física, cun concepto claro da disipación no proceso económico e da irreversibilidade consecuenta dos procesos, e cunha analoxía, así mesmo, clara da entropía. Debe tamén mellorar na modelización do axente económico na súa microescala, o que viría a ser o análogo da revolución cuántica na física. Ha de integrar, igualmente, o formalismo deseñado para a descrición de fenómenos críticos, que lle permita comprender as emerxencias en fenómenos cooperativos que se dan en diversos ámbitos da economía, como o comportamento dos mercados financeiros ou os procesos de difusión tecnolóxica. Así mesmo, debe importar as ferramentas formais de descrición das interaccións reais (metaeconómicas, poderíamos dicir) que existen entre os axentes económicos, auténticas redes complexas de transmisión de información que determinan de maneira crucial a súa conduta, e que dan lugar a patróns espazo-temporais na economía. E finalmente, debe matizar a idea de equilibrio e manterse a distancia dese equilibrio para poder explicar a aparición e a evolución espazo-temporal das estruturas económicas á maneira da termodinámica non lineal. A realización deste magno programa de cambio paradigmático é unha das principais direccións de investigación da economía contemporánea, e a orientación que preconiza o conxunto de autores que o realizan recibe o nome de economía da complexidade. A elas dedicamos a seguinte sección.

4. ECONOMÍA DA COMPLEXIDADE: EMERXENCIA E AUTOORGANIZACIÓN A PARTIR DO AZAR

É unha verdade ben asentada en termodinámica que cando un sistema alcanza o equilibrio termodinámico coa súa contorna alcanza a súa morte termodinámica, pois naquela situación xa non é posible a produción de traballo ningún. Con todo, como vimos, a súa existencia –e aínda a súa presenza continuada– é o feito central da teoría neoclásica convencional. Evidentemente, estamos ante unha conclusión que se basea na hipótese errada de sistema cerrado de equilibrio, que ignora a realidade económica empírica na que todo é evolución, cambio, creación permanente.

²⁵ Estamos persuadidos de que a observación de equilibrio no sistema é unha cuestión da escala temporal de observación.

Como quedou demostrado, esta orde de cousas produciuse polo afán de dispoñer dunha descrición matemática determinista e reducionista da economía, feita a imaxe e semellanza da física decimonónica. Con todo, na economía contemporánea están producíndose cambios que van na dirección antes apuntada de analizar a economía desde unha perspectiva non reducionista. Como dirá Brian Arthur no seu xa clásico artigo “Complexity and the Economy” (Arthur, 1999, p. 107): *“After two centuries of studying equilibria static patterns that call for no further behavioral adjustments economists are beginning to study the general emergence of structures and the unfolding of patterns in the economy. When viewed in out-of-equilibrium formation, economic patterns sometimes simplify into the simple static equilibria of standard economics. More often they are ever changing, showing perpetually novel behavior and emergent phenomena. Complexity portrays the economy not as deterministic, predictable, and mechanistic, but as process dependent, organic, and always evolving”*.

A economía como manifestación da sociedade humana é o resultado dunha complexísima trama de relacións de produción, de distribución e intercambio, resultado do intrínseco dinamismo dos axentes económicos. Herda a estrutura e a organización da sociedade que a subxace como matriz material sobre a que se asenta, e é así un sistema complexo xerarquicamente organizado de axentes que están interconectados entre si por múltiples causas (familiares, de amizade, de veciñanza, de traballo...) non unicamente económicas, entre os que se establecen relacións de subordinación, colaboración e intercambio. Desde un punto de vista termodinámico, trátase dun sistema aberto, espacialmente inhomoxéneo, no que complexos fluxos de enerxía, materia, capital, traballo e información establécense tanto no interior dos diferentes subsistemas económicos como no seu exterior. Mediante eles mantense de maneira permanente nunha situación moi afastada do seu equilibrio para poder preservar a súa autoorganización estrutural (corporacións, Estado, redes de transporte, redes de información...) no tempo e no espazo, a partir unicamente das flutuacións libres dos seus constituíntes. Todo iso é necesario para poder producir as transformacións que observamos empiricamente adaptándose a unha realidade permanentemente cambiante.

A integración de todos estes trazos no formalismo económico é unha esixencia científica básica, pois a tarefa da ciencia é a descrición e o control da realidade con base en formalismos elaborados a partir das características do obxecto de estudo, e que permitan predicir as súas propiedades e o seu comportamento. A ciencia da complexidade –ou mellor, as ciencias da complexidade– ofrece o marco perfecto para o desenvolvemento deste programa de investigación científica. O que na actualidade denominamos “ciencias da complexidade” é un *corpus* de saberes e disciplinas marcadamente interdisciplinar que se desenvolveu esencialmente desde mediados do século pasado e que comprende desde a física ata a propia filosofía, pasando pola bioloxía, a economía, a cibernética..., que se enfrontan á necesidade de implementar técnicas e métodos para a comprensión dos denominados sistemas complexos, que son aqueles nos que non é posible separar partes sen perder al-

gunha propiedade do conxunto non presente nas partes (emerxente). A eles, e ao seu papel central na ciencia contemporánea, pasamos a dirixir a nosa atención.

Lembramos que no paradigma reducionista da física clásica –na que se desenvolveu o actual *mainstream* económico– a separabilidade dos sistemas da súa contorna e a súa simplicidade eran características esenciais. Con todo, a termodinámica xa mostraba indicios de que esa separabilidade non era tan absoluta como podía parecer, e enseguida quedou patente que o tratamento científico dos sistemas vivos non encaixaba no ámbito do principio de superposición. A medida que a actividade da física foi acometendo o estudo de fenómenos como os fenómenos críticos en sistemas de moitos corpos –nos que emerxe unha propiedade colectiva non presente nos seus constituíntes, como o ferromagnetismo, ou as condensacións de Bose-Einstein tales como a supercondutividade ou a superfluidez, que non están certamente presentes en ningún dos átomos ou moléculas do sistema– foi quedando de manifesto que o paradigma reducionista non é suficiente nin sequera no marco da propia física. Así o expón o premio Nobel de Física (e autor da denominación de física da materia condensada) Phil Anderson no seu famoso artigo “More is Different” (Anderson, 1972, p. 393): “*The main fallacy in this kind of thinking is that the reductionist hypothesis does not by any means imply a «constructionist» one. The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe*”.

Por suposto, o mesmo pode aplicarse aos núcleos, aos átomos ou ás moléculas, nas que ningún dos seus constituíntes ten as propiedades da estrutura final. Loxicamente, isto tamén era perfectamente coñecido no ámbito da bioloxía desde o comezo mesmo da disciplina, xa que nin órganos nin organismos admiten desmembramento sen perder de maneira radical e definitiva as súas propiedades, nin son redutibles á información xenética no núcleo das súas células. Por suposto, o discurso tampouco é redutible á suma de palabras, nin o cerebro ás súas neuronas. As nosas estruturas (ciudades, redes de comunicación, mercados) non están presentes en ningún de nós por separado, senón que presentan as súas propias propiedades emerxentes que, como boas estruturas disipativas, resultan das nosas incesantes fluctuacións.

Aínda que é unha categoría aínda deficientemente caracterizada, os sistemas complexos, que constitúen un obxecto de estudo cada vez máis frecuente da ciencia contemporánea e mesmo da filosofía (Rescher, 1988; Morin, 2006), defínense convencionalmente como aqueles que presentan múltiples partes (axentes) en interacción non lineal. Evidentemente, esta definición presenta unha gran xeneralidade e, como tal, é susceptible de integrar un elevado número de sistemas das máis variadas ordes. Entre as principais características dos denominados sistemas complexos podemos destacar as seguintes:

- a) Emerxencia: existen propiedades e pautas de comportamento no sistema complexo global que non están presentes nos seus constituíntes, senón que emerxen como resultado das interaccións destes últimos. Esta é unha das propiedades máis características dun sistema complexo.

- b) Relacións non lineais de curto alcance: hai interacción entre axentes conectados en rede que se atopan acoplados de maneira non lineal, de tal xeito que un estímulo pode producir un enorme efecto ou ningún.
- c) Efectos de retroalimentación: os sistemas complexos mostran a existencia de bucles de retroalimentación tanto positivos como negativos, mediante os que a conduta dos constituíntes do sistema se ve condicionada polas súas propias accións no pasado. Esta é a orixe da dificultade de distinguir en tantos ámbitos das ciencias sociais a causa do efecto.
- d) Sistemas abertos: a través de fronteiras de difícil definición intercámbiase de maneira constante enerxía, materia e información, o que provoca que os sistemas complexos se atopen normalmente moi afastados do seu potencial equilibrio.
- e) Sistemas aniñados: os compoñentes de sistemas complexos normalmente son sistemas complexos.
- f) Historia: a historia dun sistema complexo é crucial, xa que pequenos cambios poden implicar fortes variacións no seu comportamento futuro.
- g) Fenómenos invariantes de escala: inexistencia dunha escala característica no sistema, fenómeno resultante das non linearidades das interaccións entres os seus constituíntes.
- h) Autoorganización: normalmente os sistemas complexos son estruturas disipativas autoorganizadas, podendo incluso alcanzar puntos críticos no curso da súa evolución dinámica autónoma (criticalidade autoorganizada).
- i) Sistemas autoadaptativos: a través da súa evolución libre e espontánea mediante fluctuacións dos seus compoñentes son capaces de adaptarse ás condicións da contorna.

Esta categoría dos sistemas complexos é capaz de articular o conxunto da realidade nunha cadea de emerxencias que se van sucedendo desde a orixe mesma do universo ata a formación das civilizacións e organizacións humanas. Este proceso foi maxistralmente descrito a nivel divulgativo por Harry Morowitz na súa obra *The Emergence of Everything* (Morowitz, 2002). Estamos, pois, ante unha categoría omnicompreensiva que permite a integración de diferentes ordes e de sistemas moi diversos, o que a configura como marcadamente interdisciplinar. Esta creceu ao longo do pasado século coas achegas da mecánica estatística e da termodinámica non lineal, desde logo, pero tamén da teoría de sistemas de Von Bertalanffy (1968) e de Lazslo (1996), da teoría de sistemas dinámicos, da teoría do caos, da cibernética de Wiener, da xeometría fractal, da teoría de redes complexas ou da intelixencia artificial, entre outras.

É lóxico, pois, que esteamos ante un ámbito de difícil acoutamento e, polo tanto, que aínda exista unha certa indefinición nos obxectos e nos métodos de estudo. En particular, a descrición matemática dos sistemas complexos dista moito de ser un tema sinxelo e ben establecido. A diferenza dos sistemas simples, cómpre en xeral tratar a estrutura e a dinámica destes sistemas na súa totalidade desde unha

perspectiva global, non estando admitidas na maioría das situacións descomposicións ou divisións do sistema. A interacción dos moitos constituíntes que forman o sistema complexo crea novas pautas de comportamento emerxentes non presentes nos compoñentes por separado, definindo un todo único e irreductible ás súas partes.

A descrición deste fenómeno desde un punto de vista físico-matemático é un reto que fai necesario acudir a diferentes ramas da matemática, desde a estatística de procesos estables non gaussianos á teoría de redes complexas, pasando polo cálculo estocástico ou pola teoría de sistemas dinámicos. É de destacar a inexistencia dun formalismo estándar como o do cálculo infinitesimal para os sistemas simples, debido ao feito de que non resulta aplicable o principio de superposición, o que provoca a frecuente inexistencia de aproximacións analíticas. Por iso, a simulación por computadora convértese nunha ferramenta fundamental para a análise destes sistemas como única maneira de describir o sistema no seu conxunto de maneira numérica. Malia isto, producíronse grandes avances no campo que permiten falar hoxe dunha física de sistemas complexos, dunha bioloxía de sistemas, dunha ciencia da complexidade. Por iso, non esaxeramos se dicimos que, malia o seu carácter fronteirizo, indefinido, que dificulta unha descrición científica tal e como a coñecemos ata agora, o problema da complexidade constitúe probablemente o marco problemático máis importante da ciencia contemporánea tanto nas ciencias experimentais como, moi principalmente, no das ciencias sociais, cuxos obxectos de estudo soen ser intrinsecamente complexos.

Polo que respecta á economía, o camiño cara á economía da complexidade está aberto e percorréndose. Para os teóricos da complexidade a economía é un sistema complexo autoadaptativo (Anderson *et al.*, 1988; Arthur *et al.*, 1997; Blume e Durlauf, 2005) ao que, para ser adecuadamente descrito, deben aplicárselle todas as técnicas e métodos de investigación que se desenvolveron noutras ciencias como a física²⁶, a matemática, a bioloxía ou a cibernética. Moitos –a ampla maioría– son os fenómenos económicos que non admiten unha descrición nos sinxelos termos do formalismo neoclásico, e que deben ser abordados mediante técnicas específicas procedentes doutros ámbitos. Así, por exemplo, a modelización da transmisión de información nun mercado –sistema complexo xerarquicamente organizado– precisa de maneira ineludible da teoría de redes complexas para modelizar a estrutura das conexións entre os axentes que o integran, e da teoría de sistemas dinámicos para analizar a difusión da información (ou de calquera outro proceso) nese *network* estrutural (Albert e Barabási, 2002; Pastor-Satorras *et al.*, 2003; Namatame *et al.*, 2006; Bocalletti *et al.*, 2006). Só mediante a introdución da rede –auténtico esqueleto de todo sistema complexo– poderemos captar todas as pautas imitativas inherentes á condición humana, e que son as que en última instancia determinan moitos dos fenómenos emerxentes que observamos no comportamento dos mercados. Da mesma maneira, non poderemos comprender as crises dos mercados financeiros

²⁶ A aplicación dos conceptos da física en sentido amplo ao estudo de problemas económicos denomínase hoxe econofísica, aínda que este termo denotaba orixinariamente o estudo dos mercados financeiros.

–fenómenos cooperativos nos que se rompe a simetría entre compras e vendas de activos– sen recorrer á teoría de fenómenos críticos desenvolvida no ámbito da mecánica estatística (Voit, 2003; Sornette, 2003a, 2003b); ou será imposible analizar adecuadamente a estatística dos prezos de activos nos mercados financeiros –esa na que Mandelbrot (1963, 1983, 1997) desenvolveu o concepto mesmo de fractalidade– sen acudir á teoría de procesos estables non gaussianos (procesos de Lévy) (Mantegna e Stanley, 2000; Voit, 2003)– que explican a existencia de colas grosas paretianas asociadas a distribucións potenciais en múltiples ámbitos da economía, entre eles os mercados financeiros. En fin, non será posible percibir toda a riqueza de comportamento de mercados en modelos que capten de forma realista as características esenciais de mercados reais, se non acudimos á simulación numérica.

Todos estes cambios son o reto fundamental da economía contemporánea, e son hoxe obxecto de intenso traballo por parte dun nutrido grupo de físicos e economistas²⁷. Na nosa opinión, un campo no que aínda non se realizou suficiente traballo, e que paga a pena explorar, é a utilización sistemática da termodinámica non lineal –onde xa non son válidas as relacións de Onsager nin, polo tanto, o teorema de mínima produción de entropía, e os sistemas poden empezar a autoorganizarse– para a descrición dos procesos de produción en economía, o que podería resultar nunha comprensión das pautas espaciais (economía xeográfica) e temporais (ciclos e crecemento) que observamos na economía. Unha teoría non lineal da produción económica que integre plenamente as esixencias do segundo principio da termodinámica debería resultar nunha formalización do equivalente económico das estruturas disipativas de I. Prigogine. Sen dúbida, estas e outras cuestións forman parte dese camiño nunca acabado do coñecemento humano, que para a economía se abriu coa obra dos clásicos, continuou coa formalización da síntese neoclásica e que se projecta ao futuro coa economía da complexidade. Só nos resta desexarlle unha boa viaxe.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBERT, R.; BARABÁSI, A.L. (2002): “Statistical Mechanics of Complex Networks”, *Rev. Mod. Phys.*, 74, pp. 47-97.
- ANDERSON, P. (1972): “More is Different”, *Science*, 177, pp. 393-396.
- ANDERSON, P.; ARROW, K.; PINES, D. [ed.] (1988): *The Economy as an Evolving Complex System*. Redwood City, CA: Addison-Wesley.
- ARROW, K.J. (1962): “The Economic Implications of Learning by Doing”, *Review of Economic Studies*, 29 (3), pp. 155-173.
- ARTHUR, B. (1990): “Positive Feedbacks in the Economy”, *Scientific American*, (February), pp. 80-85.

²⁷ Actores moi importantes neste percorrido son, entre outros, os integrantes do denominado Instituto de Santa Fe (ISF), principalmente dedicado ao estudo da complexidade e fundado, precisamente, cun xa famoso debate entre físicos e economistas na década dos anos oitenta acerca da natureza e dos métodos da economía. Remitimos ao lector ao artigo de B. Miedes neste mesmo bloque temático para referencias adicionais.

- ARTHUR, B. (1999): "Complexity and the Economy", *Science*, 284, pp. 107-109.
- ARTHUR, B.; DURLAUF, S.N.; LANE, D.A. (1997): *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- BEINHOCKER, E.D. (2006): *The Origin of Wealth*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- BLUME, E.L.; DURLAUF, S.N. (2005): *The Economy as an Evolving Complex System III. Current Perspectives and Future Directions*. Oxford: Oxford University Press.
- BOCCALETTI, S. *et al.* (2006): "Complex Networks. Structure and Dynamics", *Phys. Rep.* 424, pp. 175-308.
- CARNOT, N.S. (1824): *Sur la puissance motrice du feu*.
- CLAUSIUS, R. (1867): "Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie", en: *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*.
- DE GROOT, S.R.; MAZUR, P. (1962): *Non-Equilibrium Thermodynamics*. Amsterdam: North-Holland.
- DOMAR, E.D. (1946): "Capital Expansion, Rate of Growth and Employment", *Econometrica*, 14 (2), pp. 137-147.
- FINE, B. (2000): "Endogenous Growth Theory: A Critical Approach", *Cambridge Journal of Economics*, 24 (2), pp. 245-265.
- FOSTER, J. (1993): "Economics and the Self-Organisation Approach: Alfred Marshall Revisited?", *Economic Journal*, 103, pp. 975-991.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971): *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- GLANSDORFF, P.; PRIGOGINE, I. (1971): *Thermodynamic Theory of Structure Stability and Fluctuations*. London: Wiley.
- HAHN, F.H.; MATTHEWS, R.C.O. (1967): "The Theory of Economic Growth: A Survey", en American Economic Association and Royal Economic Society: *Surveys of Economic Theory. Growth and Development*, vol. II. London: Macmillan.
- HARROD, R.F. (1939): "An Essay in Dynamic Theory", *Economic Journal*, 49, pp. 14-33.
- HICKS, J.R. (1937): "Mr. Keynes and the 'Classics': A Suggested Interpretation", *Econometrica*, 5 (2), pp. 147-159.
- HICKS, J.R. (1950): *Value and Capital: An Inquiry Into Some Fundamental Principles of Economic Theory*. Oxford: Clarendon Press.
- HOLLAND, J.H. (2006): "Studying Complex Adaptive Systems", *Journal of Systems Science and Complexity*, 19 (1), pp. 1-8.
- JAYNES, E.T. (1991): *How Should WE Use Entropy IN Economics?* <<http://bayes.wustl.-edu/etj/articles/entropy.in.economics.pdf>>.
- JEVONS, W.S. (1888): *Theory of Political Economy*. 3^a ed. London: MacMillan.
- JEVONS, W.S. (1905): *Principles of Economics: A Fragment of the Treatise on the Industrial Mechanism of Society and Other Papers*. New York, NY: MacMillan.
- KATCHALSKY, A.; CURRAN, P.F. (1946): *Non-Equilibrium Thermodynamics in Biophysics*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- KEYNES, J.M. (1936): *The Collected Writings of John Maynard Keynes*. Vol. VII: *The General Theory of Employment, Interest and Money*. (London: Macmillan, 1973).
- KONDEPUDI, D.; PRIGOGINE, I. (1998): *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. Chichester: Wiley.
- LASZLO, E. (1996): *The Systems View of the World. A Holistic Vision of our Time*. New York, NY: Hampton Press.

- LUCAS, R. (1988): "On the Mechanics of Economic Development", *Journal of Monetary Economics*, 22 (1), pp. 3-42.
- MANDELBROT, B.B. (1963): "The Variation of Certain Speculative Prices", *J. Business*, 36, pp. 394-419.
- MANDELBROT, B.B. (1983): *The Fractal Geometry of Nature*. New York, NY: Freeman.
- MANDELBROT, B.B. (1997): *Fractals and Scaling in Finance*. New York, NY: Springer-Verlag.
- MANTEGNA, R.N.; STANLEY, H.E. (2000): *An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MEADE, J.E. (1961): *A Neo-Classical Theory of Economic Growth*. London: Allen and Unwin.
- MIROWSKI, P. (1988): *Against Mechanism*. Totowa, NJ: Rowman & Littlefield.
- MIROWSKI, P. (1989): *More Heat than Light: Economics as Social Physics, Physics as Nature's Economics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MODIGLIANI, F. (1944): "Liquidity Preference and the Theory of Interest and Money", *Econometrica*, 12 (1), pp. 45-88.
- MORIN, E. (2006): *El método*. Vol. 1: *La Naturaleza de la Naturaleza*. 7ª ed. Madrid: Cátedra.
- MOROWITZ, H.J. (2002): *The Emergence of Everything*. Oxford: Oxford University Press.
- NAMATAME, A.; KAIZOUJI, T.; ARUKA, Y. [ed.] (2006): *The Complex Network of Economic Interactions: Essays in Agent-Based Economics and Econophysics*. Berlin: Springer.
- NUWAYHID, R.Y.; JABER, M.Y.; ROSEN, M.A.; SASSINE G.P. (2006): "On the Thermodynamic Treatment of Diffusion-Like Economic Commodity Flows", *Int. J. Energy*, 3 (1), pp. 103-117.
- ONSAGER, L. (1931): "Reciprocal Relations in Irreversible Processes. I", *Phys. Rev.*, 37, p. 405.
- PALMA, J.G. (2009): "The Revenge of Markets on Rentiers. Why Neo-Liberal Reports of the End of History Turned Out to be Premature", *Cambridge Journal of Economics*, 33 (4), pp. 829-869.
- PASTOR-SATORRAS, R.; RUBI, M.; DÍAZ GUILERA A. [ed.] (2003): *Statistical Mechanics of Complex Networks*. Berlin: Springer.
- PRIGOGINE, I. (1945): *Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles*. (Thèse d'agrégation présentée en 1945 à l'Université Libre de Bruxelles).
- PRIGOGINE, I. (1974): *Introducción a la termodinámica de los procesos irreversibles*. Madrid: Selecciones Científicas.
- PRIGOGINE, I. (1977): *The Nobel Prize in Chemistry 1977. Ilya Prigogine*. <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1977/prigogine.html>.
- PRIGOGINE, I.; HERMAN, R. (1971): *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*. New York, NY: Elsevier.
- RESCHER, N. (1998): *Complexity. A Philosophical Overview*. New Brunswick: Transaction Publishers.
- ROMER, P.M. (1986): "Increasing Returns and Long-Run Growth", *Journal of Political Economy*, 94 (5), pp. 1002-1038.
- SASLOW, W. (1999): "An Economic Analogy to Thermodynamics", *Am. J. Phys.*, 67, p. 1239.
- SCHNEIDER, E.D.; SAGAN, D. (2005): *La termodinámica de la vida. Física, cosmología, ecología y evolución*. Barcelona: Tusquets.

- SCHRÖDINGER, E. (1944): *What is Life?* Cambridge: Cambridge University Press.
- SEN, A. [ed.] (1970): *Growth Economics*. Harmondsworth: Penguin Education.
- SHAHID ALAM, M. (2005): *The Economy as an Energy System*. Boston, MA: Northeastern University. <<http://www.economics.neu.edu/papers/documents/05-003.pdf>>.
- SMITH, E.; FOLEY, D. (2008): “Classical Thermodynamics and Economic General Equilibrium Theory”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 32 (1), pp. 7-65.
- SOLOW, R. (1956): “A Contribution to the Theory of Economic Growth”, *Quarterly Journal of Economics*, 70 (1), pp. 65-94.
- SOLOW, R. (1957): “Technical Change and the Aggregate Production Function”, *Review of Economics and Statistics*, 39 (3), pp. 312-320.
- SOLOW, R. (1988): “Growth Theory and After”, *American Economic Review*, 78 (3), pp. 307-317.
- SORNETTE, D. (2003a): *Critical Market Crashes*. (Physics Reports, 378).
- SORNETTE, D. (2003b): *Why Stock Markets Crash (Critical Events in Complex Financial Systems)*. Princeton: Princeton University Press.
- SWAN, T.W. (1956): “Economic Growth and Capital Accumulation”, *The Economic Record*, 32, (November), pp. 334-361.
- TSIRLIN, A.M.; KAZAKOV, V.; KOLINKO, N.A. (2003): “A Minimal Dissipation Type-Based Classification in Irreversible Thermodynamics and Microeconomics”, *Eur. Phys. J. B.*, 35, pp. 565-570.
- UZAWA, H. (1965): “Optimum Technical Change in an Aggregative Model of Economic Growth”, *International Economic Review*, 6 (1), pp. 18-31.
- VOIT, J. (2003): *The Statistical Mechanics of Financial Markets*. Berlin: Springer-Verlag.
- VON BERTALANFFY, L. (1968): *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York, NY: Braziller.
- VON NEUMANN, J.; MORGENSTERN, O. (1953): *Theory of Games and Economic Behavior*. 3^a ed. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- WALRAS, L. (1969): *Elements of Pure Economics*. New York, NY: Kelley.
- WOODFORD, M. (2008): “Convergence in Macroeconomics: Elements of the New Synthesis”, *AEA Annual Meeting*, pp. 1-23. (Publicado en *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2009, 1 (1), pp. 267-279).