

Economia fora do equilíbrio e modelagem computacional

W. Brian Arthur¹
4 de março de 2005

Resumo

A economia neoclássica padrão pergunta que decisões, estratégias ou expectativas dos agentes formam um equilíbrio, ou seja, são consistentes com o resultado ou padrão que esses mesmos comportamentos criam agregadamente. A economia computacional baseada em agentes permite fazer uma pergunta mais ampla: como as decisões, estratégias ou expectativas dos agentes podem reagir – mudar endogenamente – frente aos padrões que elas mesmas criam. Em outras palavras, permite examinar como a economia se comporta fora do equilíbrio, ou seja, quando então ela não se encontra em estado estacionário.

Essa abordagem – economia fora do equilíbrio – não vem a ser um mero apêndice à teoria econômica usual; consiste em desenvolver a ciência econômica de um modo mais geral. Quando examinados fora do equilíbrio, os padrões resultantes às vezes coincidem com o equilíbrio simples e homogêneo da economia padrão; mas freqüentemente eles mostram perpetuamente um comportamento novo e complexo. A abordagem estática envolve duas indeterminações características: ela não é capaz de escolher entre equilíbrios múltiplos possíveis; ela não permite modelar adequadamente a escolha de regras possíveis de formação expectativas. Esses problemas estão relacionados com questões de formação: determinação de um equilíbrio e determinação de uma “ecologia” de regras de expectativas. Quando se passa da abordagem de equilíbrio à abordagem fora do equilíbrio essas duas anomalias desaparecem.

Agradecimentos

As idéias discutidas neste ensaio foram desenvolvidos ao longo de vários anos dentro do programa de Economia do *Instituto Santa Fé*. Sou grato ao SFI e ao Citibank pelo apoio ao Programa e ao meu trabalho em particular. Agradeço Robert Axelrod, David Colander, Geoffrey Hodgson, Roger Koppl, Gregory Nemet, e Martin Shubik pelos comentários sobre este ensaio. Parte do material aqui apresentado encontra-se em meu artigo de 1999 na revista *Science*.

Palavras-chave:

Dinâmica de agentes, economia evolucionária, indeterminação, complexidade, economia fora do equilíbrio.

¹ W. Brian Arthur é membro do “board” científico do Instituto Santa Fé e do “Institute Scholar” (IIASA), Luxemburgo, Áustria. Website: www.santafe.edu/arthur.

Durante os últimos vinte anos, uma forma diferente de fazer economia foi surgindo lentamente. Ela aparece agora por meio vários nomes: economia da complexidade, modelagem computacional, modelagem baseada em agentes, economia do comportamento de adaptação, investigação de economias artificiais, ciência social generativa – cada uma dessas modalidades tem as suas peculiaridades, os seus próprios seguidores e as suas nuances próprias. Seja qual for o rótulo, o que está acontecendo – creio eu –, é mais do que apenas o crescimento dos estudos que fazem uso de computador ou que estejam meramente fundados em dinâmicas de agentes. Trata-se de uma nova onda de inovação na Economia².

Por que surgiu esse movimento? Uma resposta com a qual todos os praticantes concordam é que esse modo dinâmico de modelar apareceu na década de 1980 porque, então, os economistas passaram a ter estações de trabalho em suas mesas. Pela primeira vez tornou-se possível não apenas encontrar os equilíbrios, mas também perguntar como eles são alcançados. A modelagem dinâmica de agentes veio para tornar possível descobrir os padrões que se formam com o funcionamento da economia (por isso, aprecio o termo “economia generativa”, proposto por Joshua Epstein). Normalmente, essa formação de padrões é muito complicada para ser tratada analiticamente, justificando, assim, o recurso à simulação em computador. Isso é bom. Mas isto significa que economia baseada na dinâmica de agentes modelados computacionalmente é apenas um complemento à economia convencional, a qual acrescenta pouca coisa ao processo de formação de tais padrões? E como se baseia principalmente na simulação de processos econômicos em computador, isso não seria um recuo no campo teórico? O que este modo de desenvolver a Economia pode realmente fornecer?

Neste ensaio, argumento que este movimento não é um mero complemento à economia neoclássica; é bem mais do que isso. Consiste numa mudança no modo de olhar para as questões econômicas: ao invés de olhá-las como problemas de equilíbrio, passa-se a olhá-las como problemas de emergência fora de equilíbrio. Nesse caminho, a teoria econômica torna-se mais geral.

Antes de começar, dou um aviso para o leitor. Este ensaio desenvolve uma linha de raciocínio que versa sobre a natureza da economia baseada na dinâmica de agentes. Mas ele não pretende rever a literatura na área da modelagem computacional baseada na dinâmica de agentes, nem busca dar instruções sobre como modelar computacionalmente nessa mesma área. Eis que esses dois temas foram bem tratados em outros artigos.

Não vou começar o texto discutindo a modelagem baseada na dinâmica de agentes, mas a própria Economia.

Além do equilíbrio

Os agentes econômicos, bancos, consumidores, empresas, investidores, etc. ajustam continuamente a sua atuação nos mercados, as suas decisões de compra, os preços e as previsões mirando a situação que esses próprios movimentos, decisões e previsões criam em conjunto. Para colocar isso de outra forma, os comportamentos individuais criam coletivamente um resultado agregado – e reagem a esse resultado. Não há nada de novo em dizer isso. Os economistas têm visto o sistema da economia

² O progresso dessa abordagem pode ser visto comparando os seguintes livros: Anderson, Arrow and Pines (1988); Arthur, Durlauf and Lane (1997); Durlauf and Blume (2005); Judd and Tesfatsion (2005). Outros comentários a essa abordagem podem ser lidos em Lane (1993); a introdução do livro de Arthur et al. (1997); Colander (2000); and Tesfatsion (2005).

deste modo, pelo menos, desde Adam Smith. Os comportamentos criam padrões agregados; tais padrões criam, por sua vez, os comportamentos individuais.

Em um cenário deste tipo, parece natural esperar que os teóricos econômicos viessem a estudar o desenvolvimento dos padrões que os agentes econômicos criam. Mas isso, obviamente, é complicado. Por isso mesmo, historicamente, a Economia, buscando soluções analíticas, escolheu simplificar o seu modo de abordagem. Ao invés daquele caminho, ela passou a perguntar que comportamentos poderiam causar um resultado ou padrão em que nenhum agente tivesse incentivo para mudar o seu comportamento. Em outras palavras, ela se conformou à exigência de que os resultados econômicos seriam olhados como se estivessem em equilíbrio, ou seja, como se fossem compatíveis com certos comportamentos microeconômicos (ações, estratégias, expectativas) capazes de criá-los.

Assim, por exemplo, a teoria do equilíbrio geral pergunta: quais preços e quantidades de bens produzidos e consumidos seriam consistentes – ou seja, não trariam incentivos para quaisquer mudanças – com um padrão geral de preços e quantidades estabelecidos nos mercados da economia? A teoria dos jogos pergunta: dado um determinado agente, que estratégias, ações, ou alocações seriam admissíveis – ou seja, quais os melhores cursos de ação lhe estariam abertos (sob algum critério) –, dadas as estratégias, os movimentos e as alocações abertas para os seus rivais? A economia das expectativas racionais pergunta: quais as previsões (ou expectativas) são consistentes – isto é, são validadas em média – com os resultados criados em conjunto por estas previsões e expectativas? A economia equilíbrio parcial – na teoria do comércio internacional, por exemplo – pergunta: quais os comportamentos locais produziriam padrões válidos amplamente, os quais dariam suporte (seriam compatíveis) aos comportamentos locais.

A abordagem de equilíbrio presta-se a modelagem por meio de equações. Como um equilíbrio, por definição, é um padrão que não muda, assim sendo pode ser estudado em sua estrutura, em suas implicações, investigando também as condições em que ocorre. É claro que a simplicidade inerente a esse tipo de exame analítico tem um preço. Para garantir que o problema é tratável, geralmente temos de assumir que os agentes são homogêneos (ou idênticos) e que não existem mais do que duas ou três classes de agentes. Temos de assumir que comportamento humano – notoriamente algo bem complicado – pode ser capturado por meio de funções matemáticas simples. Temos de assumir que o comportamento do agente é inteligente, mas que não há incentivos para mudá-lo. Devemos assumir, portanto, que os agentes e seus pares têm de encontrar o comportamento adequado fazendo uso de todas as informações disponíveis, que lhes possam ser úteis. Ao fazê-lo, deixam de ter qualquer incentivo para mudar. Ainda assim, enquanto estratégia de análise possível, essa abordagem de equilíbrio tem sido extremamente bem sucedida. Como evoluiu e se consolidou na estrutura neoclássica tal como hoje conhecemos, tem contribuído para um grau de entendimento da realidade que faz inveja às outras ciências sociais.

Acredito que a Economia está caminhando para além do paradigma do equilíbrio. Tem se tornado natural perguntar não apenas como os comportamentos dos agentes se tornam consistentes com o padrão agregado que eles mesmos criam, mas também como as ações, estratégias e expectativas em geral reagem – mudando endogenamente – aos padrões que elas criam. Em outras palavras, tem se tornado natural perguntar como a economia se comporta quando não se encontra em estado estacionário – quando está fora do equilíbrio. Nesse nível mais geral, podemos supor que o padrão econômico se estabelece num simples estado de equilíbrio, desde que haja tempo suficiente. Mas também podemos supor que isto não ocorre: o padrão agregado

mostra-se em mudança constante, perpetuamente criando novidades. Assim, podemos supor que ele produz fenômenos novos, os quais nunca aparecem em estado estacionário.

Em razão de sua própria natureza, essa abordagem requer que sejam estabelecidas instruções detalhadas sobre como os comportamentos individuais se ajustam às situações em perene mudança; e essas instruções devem ser postas na forma algorítmica. Como permite a aprendizagem, assim como reações diferenciadas, essa abordagem não assume que os comportamentos adaptativos sejam homogêneos. Ao contrário, cada agente deve ser considerado como um caso em separado; daí que a abordagem esteja baseada na dinâmica de agentes individuais. A consideração da formação de padrões econômicos fora do equilíbrio leva naturalmente à necessidade de considerar a heterogeneidade dos comportamentos dos agentes, assim como o processo pelo qual estes são atualizados. Desse duplo ponto de vista, o problema econômico requer o emprego de recursos computacionais.

Uma possível objeção a esse modo de desenvolver a ciência econômica vem da afirmação segundo a qual a abordagem computacional não produz teoria. Mas essa afirmação é ingênua. Se tirar implicações de um conjunto de premissas vem a ser fazer teoria, então não importa se as operações necessárias são feitas manualmente ou se são feitas por meio de um computador. Ambos essas formas de proceder geram teoria. Há certamente, porém, uma diferença de estilo. Métodos baseados em equações reclamam métodos baseados na manipulação de equações para obter resultados – assim como para fazer descobertas e para tirar as implicações – e este são visto como rigorosos. Isto é óbvio. Freqüentemente, porém, esse rigor é especioso. As implicações correspondem à realidade se as premissas escolhidas e as formas funcionais empregadas o fazem; ora, essas formas são abstrações da realidade – quando são examinadas com cuidado, freqüentemente se mostram grosseiras. Há, como se sabe, muito escopo para se fazer deduções rigorosas a partir de premissas falsas. A modelagem computacional é diferente em estilo, mas quanto a esse aspecto ela não difere do tradicional. Ela exige análise estatística dos fenômenos postos a descoberto; mas em muitos modelos baseados computação torna-se difícil discernir que fenômenos os eventos informáticos mostram. Há também aí ampla margem para assumir premissas irrealistas e para introduzir complicações desnecessárias. Fazer boa ciência econômica no computador não é necessariamente mais fácil do que fazê-lo do modo analítico tradicional. O bom trabalho científico nessa área também mantém um olho na elegância do experimento para que o modelo computacional seja capaz de apresentar o fenômeno de modo simples e claro; para que ele seja capaz de extrair o fenômeno dos elementos confusos que possam obscurecê-lo.

Os dois estilos podem obviamente ser misturados. Se um fenômeno pode ser apresentado computacionalmente, ele também pode ser reproduzido num modelo analítico mais simples. Se ele pode ser mostrado por meio da análise tradicional, ele pode ser mostrado computacionalmente. A computação, propriamente desenvolvida, não substitui a teoria. Ela permite admitir premissas mais realistas e acomoda melhor os comportamentos fora do equilíbrio. Ela expande a teoria. É bom lembrar também – e eu quero enfatizar isso – que explorar o funcionamento da economia fora do equilíbrio nem sempre requer o emprego da computação. Essa exploração pode ser feita também por métodos analíticos, tal como aconteceu em certas situações teóricas, em particular quando se pretendeu estudar os mecanismos de aprendizagem (Samuelson 1997; Fudenberg e Levine, 1998; Brock e Hommes, 1998). Porém, em muitas situações, as formulações analíticas se mostram excessivamente complicadas, requerendo o emprego de computação.

Uma objeção diferente consiste em dizer que o enfoque do sistema fora do equilíbrio requer uma detalhada modelagem dos ajustamentos do comportamento individual (assim como, dos modos de interação dos agentes) e que, por isso, ele encoraja a adoção de premissas “ad hoc”. O ponto tem os seus méritos: premissas são muitas vezes adotadas por conveniência da própria modelagem. Porém, é preciso lembrar que as premissas usuais da abordagem do “comportamento racional” são expressões altamente estilizadas da realidade. A modelagem baseada na dinâmica de agente força a estudar e a pensar rigorosamente sobre o comportamento humano efetivo e, por isso, ela fortalece a busca de realismo.

O estudo do sistema econômico fora do equilíbrio não responde todas as questões possíveis. Ele nada tem a dizer sobre a formação dos gostos, das tecnologias e das estruturas. David Lane (1993) notou que esse tipo de estudo “abrange limitadamente a emergência de novas estruturas – eis que não é capaz de mostrar como emergem as entidades de nível superior”. O que emerge é um padrão, não uma estrutura hierárquica.

Uma característica notável dos estudos que concebem o sistema econômico fora do equilíbrio é que eles seguem sempre a abordagem evolucionária. Por que deve ser assim? Eu disse anteriormente que uma premissa comum de muitos desses estudos vem a ser que os agentes diferem no modo como eles reagem aos padrões agregados; eles enfrentam circunstâncias diferentes, têm dessemelhantes histórias e diversas psicologias. Isto é, os agentes são adaptativos e heterogêneos. A primeira vista, isto parece produzir uma extensão trivial da teoria padrão. Considere-se, porém, o seguinte: se os agentes heterogêneos (ou as estratégias ou as expectativas heterogêneas) se ajustam continuamente à situação agregada que eles mesmos criam, então eles se adaptam no interior de uma “ecologia” global que eles mesmos criam. Ao fazê-lo, mudam essa própria ecologia. Ao se empregar a palavra “evolução” no seu sentido mais amplo – para mim, isto significa que os elementos do sistema se adaptam à situação global que eles mesmos criam –, vejo então que a evolução emerge naturalmente na construção desse tipo de modelo. Não precisa ser acrescentada tal como ocorre usualmente (obviamente, em cada caso particular é preciso definir precisamente o que se entende por ‘elementos’, ‘adaptação’, ‘estados’, ‘situações’). Como a economia fora do equilíbrio é evolucionária pela sua própria natureza, ele se parece mais com a biologia moderna do que com a física do século XIX.

A economia baseada na dinâmica de agentes, operante fora do estado estacionário, é também uma generalização da economia de equilíbrio. Os sistemas fora do equilíbrio podem convergir para algum equilíbrio ou podem apresentar padrões de comportamento consistentes com essa suposição; nesse caso, ajustamentos adicionais tendem a deixar de ser necessários. Sendo assim, o comportamento de equilíbrio padrão afigura-se apenas como um caso particular. Segue-se que a teoria econômica fora do equilíbrio não compete com a teoria de equilíbrio. Vem a ser somente teorização desenvolvida de um modo mais geral – de um modo gerativo.

Até o presente momento, fiz uma asseveração forte, a saber, que uma nova forma de ciência economia está nascendo – uma ciência econômica gerativa, fora do equilíbrio. Se o leitor acolhe esse ponto, então ele pode perguntar o que esse saber apresenta como novidade. Que novo fenômeno é descoberto quando esse ele vem a ser desenvolvido? Há questões que a economia de equilíbrio não pode responder, mas que a economia de não-equilíbrio, mais geral do que a anterior, pode fazê-lo? Na linguagem de Kuhn, há anomalias no campo da teoria econômica que esse novo paradigma é capaz de resolver?

A resposta para essa questão é sim. No resto desse ensaio quero focar duas anomalias características – precisamente, duas indeterminações – da economia de

equilíbrio, mostrando que elas desaparecem no interior da nova abordagem. Ao longo do caminho, quero mostrar alguns aspectos bem característicos que surgem nessa abordagem. A discussão estará baseada principalmente num estudo de Lindgren e em três tópicos de pesquisa nos quais estive pesadamente envolvido. Eles levam diretamente aos pontos que quero aqui apresentar (os quais, aliás, me são mais familiares). Há certamente outros tópicos que alargam o escopo da economia baseada na dinâmica de agentes, os quais se encontram fora da discussão aqui travada.³ Apesar disso – penso –, eles corroboram os argumentos a serem aqui apresentados.

Perpétuas novidades

Deixem-me começar tratando de um fenômeno que é bastante freqüente nesse tipo de ciência econômica. Trata-se da ausência de qualquer equilíbrio ou, em perspectiva mais positiva, da presença de comportamentos em processo de mudança, perpetuamente novos. Considere-se, por exemplo, o estudo clássico de Kristian Lindgren (1991). Esse autor criou um torneio de computador em que as estratégias competiam em pares e estes pares eram escolhidos aleatoriamente para participar de um jogo repetido de dilema de prisioneiro. Os componentes de seu estudo são, portanto, estratégias – e não agentes humanos. No correr do jogo, as estratégias são bem sucedidas ou se modificam. Aquelas que sistematicamente perdem, morrem. As estratégias podem se aperfeiçoar usando memórias mais longas que registram as suas ações passadas ou as ações passadas das adversárias. O sucesso de cada estratégia, obviamente, depende da população corrente de estratégias. O elemento adaptativo aqui – a estratégia – reage e se altera no mundo competitivo que elas coletivamente ajudam a criar.

Nesse torneio computacional, Lindgren descobriu que uma estratégia simples, a qual fora empregada desde o início, não se modificava ao longo do tempo. A estratégia “tanto por tanto” (tit-for-tat), assim como outras estratégias simples dominaram no começo. Então, outras estratégias mais complexas emergiram e passaram a dominaram aquelas até então existentes. Se uma estratégia se afigurava “muito esperta” – isto é, muito complicada – ela podia ser explorada pelas mais simples. Nesse mundo computacional, Lindgren encontrou períodos em que coexistiam um grande número de estratégias na população e períodos em que havia poucas. Em certos períodos dominavam as estratégias simples, em outros períodos dominavam as estratégias mais complexas. Porém, o sistema nunca estacionava. No mundo criado por Lindgren as estratégias em existência evolviam e se mantinham evolvendo, gerando novidades perpetuamente. Isto não se afigura familiar à perspectiva da teoria econômica padrão. Entretanto, essa dinâmica que gera conjuntos de estratégias complicadas, emergentes e que não podem ser previstas, ela é bem realista. O modo de jogar xadrez, praticado pelos grandes mestres, vem evolvendo há década e década e nunca parou de evoluir. O sistema proposto por Lindgren é simples, mas ele gera um processo evolutivo sem fim.

³ Para conhecer alguns dos primeiros estudos: Bak *et al.* (1993); Durlauf (1993); Lindgren (1991); Marimon *et al* (1990); Sargent (1993); e Schelling (1978). Ver também o artigo de Young (1998). Os primeiros modelos baseados na dinâmica de agentes que conheço estão em Miller (1988), e em Marks (1989). Uma coleção mais recente está em Arthur *et al.* (1997); o leitor pode consultar também os artigos do livro de Blume, Durlauf, Kirman, Kollman *et al.*, Ioannides, Lane and Maxfield, and Tesfatsion. Há uma nova coleção em Blume and Durlauf (2005). Para conhecer a literatura sobre redes de interação, ver Wilhite (2005).

Em geral, quando vem a ser possível observar novos comportamentos perpetuamente acontecendo em Economia? Não há regra precisa, mas, falando genericamente, isto ocorre em duas circunstâncias. Uma delas ocorre quando há certo grau de frustração (um termo da Física) no sistema. Grosso modo, isto significa que é não possível satisfazer simultaneamente as necessidades de todos os agentes (ou de todos os elementos do sistema), mas, por meio do processo interativo, as necessidades podem ir sendo satisfeitas. A outra ocorre quando a exploração de recursos é admitida e, ao mesmo tempo, é permitido um aprofundamento constante da aprendizagem – isto é, sempre é possível enxergar mais longe dentro do sistema. Nesse caso, o comportamento coletivo pode explorar constantemente novas alternativas, algumas vezes mutuamente complicadas, outras eventualmente simplificadas, mas sem nunca parar.

Indeterminação de equilíbrio e processo de seleção

No caso examinado por Lindgren, o sistema não apresenta equilíbrio; ao contrário, perpetuamente surgem novidades. Em outros casos, o equilíbrio é possível, mas existe mais do que um padrão natural de consistência: há, dizendo de outro modo, múltiplos equilíbrios. Essa situação aparece naturalmente na presença de processos de realimentação positivos ou de retornos crescentes – ou, mais tecnicamente, sob condições de não-convexidade. Nessa situação, a existência de múltiplos equilíbrios é a norma. A primeira vista, isto não parece por dificuldade maior para a economia de equilíbrio. Ao invés de um, há vários deles. Há, porém, uma dificuldade: a economia de equilíbrio é capaz de identificar vários padrões de consistência, mas não sabe dizer como eles são alcançados. A economia tradicional, por causa disso, enfrenta aqui uma indeterminação.

Esse tipo de indeterminação tem representado um grande embaraço ao longo dos anos. “Múltiplos equilíbrios” – escreveu Schumpeter em seu livro *História da Análise Econômica*, de 1954 – “não é algo necessariamente inútil, mas a existência de um determinado e único equilíbrio é, obviamente, da máxima importância para uma ciência exata; ela tem procurá-lo mesmo se a possibilidade de provar a sua existência requerer o pagamento de um preço, qual seja ele, a introdução de restrições adicionais; sem a possibilidade de provar a existência de um determinado e único equilíbrio – ou pelo menos, um pequeno número deles –, mesmo que seja num alto nível de abstração, o campo de estudo encontrar-se-á em estado de caos, isto é, fora de controle analítico”. Em face do “caos” em potência, em diferentes campos do saber econômico foram tomadas diversas atitudes. Em alguns – em especial no campo da teoria dos jogos, entre 1960 e 1970 –, passou-se a adicionar tantas premissas restritivas (algumas das quais eram bem artificiais) quantas fossem necessárias para obter uma única solução. Em outros, contrariando Schumpeter, acolheu-se o caos. Descobriam-se estaticamente os equilíbrios possíveis no problema em consideração, deixando a escolha de um deles aberta e, assim, indeterminada. Um exemplo é a teoria do comércio internacional de Helpman and Krugman (1985) que aceitou a existência de retornos crescentes e, por isso, chegou a múltiplos equilíbrios, permanecendo indeterminada.

Uma forma natural – acredito – consiste em pensar o problema de modo gerativo (Arthur 1989, 1994): assim, deixa-se de enfrentar uma seleção entre equilíbrios para ficar com uma questão de formação de equilíbrio. Toda e qualquer atividade econômica é sempre afetada por eventos que são muito pequenos para serem previstos; ora, esses pequenos eventos “randônicos” podem ir se acumulando ao longo do tempo, tornando-se assim, por realimentação positiva, algo bem grande capaz de

encontrar uma determinada solução para o problema em consideração. Isto sugere que uma situação que envolva múltiplos equilíbrios pode ser mais bem modelada olhando para o que ocorre ao longo do tempo – ou seja, para o processo de formação. Isto é, ela pode ser mais bem modelada não como um problema determinístico e estático, mas como um processo dinâmico afetado por eventos aleatórios que contém em si mesmo realimentação positiva e não-linearidades. Com base nessa estratégia, a situação pode então “examinada” teoricamente para ver como o processo se desenrola até que ele venha a “selecionar” ou determinar um equilíbrio. Algumas vezes, um equilíbrio emerge; algumas vezes (sob condições idênticas), outro surge. É impossível saber de antemão que candidato a solução surgirá num dado correr do processo, mas é possível estudar a probabilidade de que uma determinada solução venha emergir sob certas condições iniciais. Desse modo, a solução do problema pode ser encontrada por meio da modelagem de processo de formação; basta traduzi-lo num processo dinâmico que contém eventos aleatórios. Mediante a abordagem do tipo “fora do equilíbrio”, tal como foi antes mencionado, a anomalia desaparece.

Nesse sentido, todo um campo da Economia – aquele em que se encontram os problemas que envolvem retornos crescentes – requer uma abordagem do tipo “fora do equilíbrio”. Esse campo, a propósito, não é restrito. Os retornos crescentes surgem na geografia econômica, nas finanças, na teoria dos mercados, na teoria do desenvolvimento econômico, na economia da tecnologia e, enfim, na economia da pobreza; eis que a literatura nessas áreas específicas tem crescido notavelmente. É interessante observar, entretanto, que os trabalhos mais importantes têm sido feitos analiticamente – e não computacionalmente. A razão para essa predominância vem do fato de que muitos problemas de retornos crescentes surgiram numa situação teórica em que foi possível assumir a existência de grande número de agentes homogêneos entre si.

Qualquer que seja o tópico em foco, os estudos que envolvem retornos crescentes tendem a mostrar propriedades comuns: existência de multiplicidade de “soluções” possíveis, de tal modo que o resultado passível de ser alcançado não pode ser previsto de antemão; ele é “selecionado” por pequenos eventos; tende a produzir auto-encerramento (lock-in); não é necessariamente o mais eficiente; é dependente de trajetória. Ademais, mesmo quando o problema se afigura como simétrico, o resultado é usualmente assimétrico. Essas propriedades têm contrapartidas em diferentes ciências que enfatizam a formação de padrões, tal como a física do estado sólido. Aquilo que os economistas chamam de múltiplos equilíbrios, imprevisibilidade, auto-encerramento, ineficiência, dependência histórica de trajetória e assimetria, os físicos denominam de estados metaestáveis, não-previsibilidade, encerramento de fase, estados de alta energia, não-ergocidade, quebra de simetria. Algumas dessas propriedades podem ser identificadas pela análise estática (multiplicidade, não-eficiência, imprevisibilidade, auto-encerramento). Mas para ver como esse tipo de resultado é alcançado, para ver a quebra de simetria, a seleção de pontos de convergência e a dependência de trajetória em ação, isto tudo requer que se passe a pensar as soluções em modelo do tipo “fora do equilíbrio”.

Expectativas indeterminadas e comportamento indutivo

O equilíbrio múltiplo causa um tipo de indeterminação na economia estática. A formação de expectativa é causa de outro tipo, o qual também requer resolução por meio de modelagem fora do equilíbrio. Deixe-me explicar isto melhor.

Toda ação econômica requer a formação de expectativa sobre algum resultado. E, em muitas situações, este resultado encontra-se determinado coletivamente – eis que

ele depende também daquilo que resulta das ações das outras pessoas. Assim, se um empresário tem de decidir se investe hoje numa nova fábrica de semi-condutores, ele tem de se basear em suas previsões sobre como se encontrará a oferta do mercado daqui há dois anos. Não só ele, mas os seus competidores também têm de tomar decisões similares, desse mesmo modo. Ora, o resultado coletivo das escolhas coletivas feitas hoje irão determinar a oferta agregada (e, assim, os preços e os lucros) daqui há dois anos.

Nesses casos, os agentes tentam prever qual resultado irá prevalecer; porém, são as suas próprias ações é que irão produzir esse resultado. A situação configura-se como auto-referencial: os agentes estão tentando formar expectativas sobre um resultado que decorre de suas próprias expectativas. Ou, para reforçar ainda mais a circularidade, as suas escolhas de expectativas dependem de suas escolhas de expectativas. Sem a imposição de alguma restrição adicional, não há forma lógica e dedutiva de estabelecer uma escolha auto-referente. Aqui se tem uma indeterminação fundamental inerente à economia estática.

É tentador tratar isso como uma anomalia menor. Porém, esse problema é muito difundido em Economia: ocorre sempre que decisões de agentes afetam as decisões de outros agentes.⁴ Ele mostra que a Economia tem uma lacuna, qual seja, aquela que aparece quando se pergunta como as expectativas se formam logicamente em situações em que existem muitos agentes interagindo. Ele vem a ser a principal razão pela qual muitos economistas se acham em posição desconfortável nesse campo do conhecimento.

A teoria econômica estática, obviamente, enfrenta esse problema quando tem de considerar as expectativas de muitos agentes. Para tanto, ela desenvolveu um método teórico – uma espécie de quebra-galho – para fazê-lo: a abordagem de expectativas racionais. Dado um problema econômico pertinente, a teoria das expectativas racionais pergunta qual vem a ser o modelo de formação de expectativa (se alguém o adota) que levaria às ações que, em média, validariam esse mesmo modelo. Se tal modelo existe, então se pode afirmar que os agentes dão suporte ao modelo, o que resolve convenientemente o problema de seleção de expectativas.

Obviamente, essa última asserção parece ter caído do céu. Para ser rigorosamente exato, se esse tal modelo existe, ele pelo menos parece demonstrar que existe um conjunto de expectativas consistentes com o resultado por ele próprio proporcionado. Se isto se traduz numa teoria de formação de expectativas realista vem a ser outra questão – ora, essa questão deixa em posição desconfortável mesmo aqueles que costumam dar suporte para essa teorização. Ademais, para admiti-la como encaminhamento teórico em problemas que fazem referências a situações não-repetitivas é preciso assumir que os próprios agentes conhecem de antemão o modelo que rege as suas ações; ou seja, que todos eles sabem o modelo que vai ser usado; que eles sabem que os outros vão empregá-lo, *ad infinitum* (hipótese essa que é chamada de conhecimento comum). Ademais, é exigida que exista apenas uma única solução, porque caso isto não ocorra é certo que os agentes vão tentar coordenar com base em diferentes expectativas.

Como teoria de formação de expectativas, a das expectativas racionais parece melhor quando é empregada em situações temporalmente repetitivas. Nesse caso, pode-se supor que os agentes apreendem como atuar ao longo do tempo, acertando em média qual vem a ser a expectativa correta. Nesse caso, as expectativas racionais forjam uma solução para a qual as expectativas convergem. Porém, é possível encontrar situações

⁴ Uma apresentação desse tipo de indeterminação, assim como comentários a ele, encontra-se em Koppl and Rosser (2002).

repetitivas em Economia nas quais as expectativas racionais não são um bom guia. Considere o problema do bar *El Farol* (Arthur, 1994). Uma centena de pessoas precisa decidir independentemente, semana após semana, se comparecem ou não ao seu bar favorito (digamos, o *El Farol*, em Santa Fé) num certo dia da semana (sexta-feira, por exemplo). A regra de decisão diz que se a pessoa prediz que mais do que 60 irão, então ela evita o aperto e fica em casa; se ela prediz que menos do que 60 irão, então ela irá. É visível o problema de auto-referência, o qual fora acima mencionado: os agentes vão ou não vão dependendo de suas previsões sobre quantos agentes devam ir a cada sexta-feira.

As expectativas racionais vão funcionar aqui? Suponha por um momento que elas o façam. Suponha que uma máquina de formular expectativas racionais exista e que todos os agentes possuam uma cópia dela. Essa máquina iria considerar uma dada história de comparecimento (por exemplo, as 10 últimas semanas) e, por definição, iria prever a média de comparecimento corretamente. Suponha, agora, que numa certa semana a máquina preveja que 74 comparecerão. Mas sabendo disso, nenhum dos freqüentadores sairá de casa, falseando a previsão. Suponha, então, que ela preveja o número 44 para a semana seguinte. Nesse caso, 100 pessoas compareceriam, falseando mais uma vez a previsão. No caso do modelo do bar *El Farol*, as expectativas compartilhadas falseiam a si mesmas. Assim, as previsões que são em média consistentes com o resultado que elas mesmas produzem não existem e não podem ser deduzidas estatisticamente. Como teoria de formação de expectativas, a teoria das expectativas racionais aqui falha. O problema da indeterminação ainda se manifesta no presente caso. Qualquer tentativa de elaborar uma teoria razoável de expectativas que se aplica a todos os participantes vai fracassar nessa situação.⁵

A anomalia desaparece no presente caso (e em geral) assim que adotamos uma abordagem generativa e passamos a observar o processo de formação de expectativas. Para fazer isso, precisamos assumir que os agentes começam com um pequeno conjunto de modelos de formação de expectativas ou de formulação de hipóteses, nenhum deles necessariamente “correto”. Podemos assumir que essas expectativas são subjetivas e que, portanto, elas diferem entre si. Podemos supor que os agentes atuam como estatísticos: eles testam os seus modelos de previsão, retendo aqueles que funcionam e descartando os outros. Esse comportamento é indutivo. Estamos assumindo *a priori* que não há solução para o problema; admitimos que os agentes queiram apenas descobrir os experimentos que funcionam. Essa abordagem se aplica às situações fora do equilíbrio (as expectativas não precisam ser consistentes com o resultado que engendram) e às situações de equilíbrio; ela se aplica aos problemas que envolvem múltiplos agentes, quando este têm de formar expectativas (Ver Holland et al. (1986), e Sargent (1994)).

No caso em tela do modelo do bar El Farol, ao construí-lo, estava-se assumindo que os agentes detinham certo número de hipóteses preditivas, esforçando-se a cada semana para encontrar aquela que seria a mais adequada aos seus propósitos (a qual será aqui chamada de “regra previsora ativa”). Desse modo, crenças e hipóteses competiam para serem usadas no interior de uma ecologia de regras que elas mesmas criavam. Simulações computacionais mostraram, então, que o comparecimento médio convergia rapidamente para 60. De fato, as regras de previsão se auto-organizavam formando uma configuração de equilíbrio estatístico, ou seja, uma “ecologia de regras”. Em média, 40 por cento das regras previsoras ativas prediziam valores acima de 60 – e 60 por cento

⁵ A situação em que os freqüentadores do *El Farol* preferem ficar em minoria ocorre sempre que na economia haja pré-compromisso sob condições de retornos decrescentes (o número de pré-compromissados). Na formulação do jogo de minoria, o problema foi muito bem estudado entre os físicos (ver Challet, Marsalis and Zhang, 2004; and Coolen, 2005).

delas prediziam menos do que 60. Mesmo se a população de regras se repartia na razão 60/40, essa população nunca permanecia composta pelo mesmo conjunto de regras. Há de certo modo um equilíbrio aqui, mas ele emerge ecologicamente – e não vem a ser um resultado decorrente de um raciocínio dedutivo clássico.

O ponto central nessa discussão não vem a ser negar que é possível construir problemas que se conformam à solução obtida por meio de expectativas racionais. Vem a ser o seguinte: em situações que envolvem muitos agentes, a formação de expectativas introduz uma indeterminação fundamental na teorização baseada em equilíbrio; porém, ao se permitir que as expectativas se formem fora do equilíbrio, de um modo indutivo, com base na dinâmica de agentes, a indeterminação desaparece. A formação de expectativas torna-se um processo natural.

Ao se aplicar a abordagem generativa aos problemas tradicionais, pode-se esperar que as expectativas convirjam para a normaposta pelas expectativas racionais? A resposta varia: algumas vezes sim, outras vezes não, dependendo se há ou não no modelo um ponto de atração suficientemente forte que corresponda à norma de expectativa racional. É interessante observar que ambas essas respostas podem ser obtidas num mesmo problema. Com diferentes parâmetros, certos modelos podem mostrar diferentes comportamentos. Em certos regimes de fase, o comportamento que leva ao simples equilíbrio reina; em outros mais complexos, padrões de comportamento não-convergentes se formam. Minha aposta é que esse último tipo de regime predomina nos modelos baseados na dinâmica de agentes.

Outro fenômeno também pode ser observado nos estudos que modelam o sistema fora do equilíbrio: avalanches de mudanças de várias grandezas. Isto acontece porque os comportamentos individuais fora do equilíbrio se ajustam ao longo do tempo; assim, eles produzem mudanças também no agregado que formam; ora, isto, por seu turno, exige que os comportamentos mudem sempre mais uma vez. Como resultado desse processo, as cascatas de mudanças, dentre as quais algumas são pequenas, mas outras são grandes, atravessam constantemente o sistema. Nos mercados artificiais, esse fenômeno se mostra pelo fato de que os agentes estão constantemente mudando as suas expectativas (eventualmente, estão explorando novas), de tal modo que mudanças de expectativas induzem mudanças de expectativas permanentemente.

As mudanças nas crenças que atravessam o mercado por meio de avalanches de todos os tamanhos produzem período com baixa ou alta volatilidade. Esse tipo de fenômeno é comum nos mercados financeiros reais. Ora, eles não podem ser modelados no âmbito das construções teóricas que se valem da noção de equilíbrio. Uma questão interessante é saber se tais avalanches apresentam propriedades assimiláveis às leis de potência, as quais são comuns em Física; isto é, se é possível verificar um comportamento típico pelo qual o tamanho da avalanche é inversamente proporcional às suas freqüências. Sistemas que apresentam esse tipo de comportamento são tecnicamente críticos: eles se situam precisamente na fronteira comportamental entre a ordem e o caos. Pode-se conjecturar que em certas situações econômicas os comportamentos asseguram resultados que parecem pertencer a essa região problemática – tecnicamente chamada de fronteira auto-organizada criticamente (Bak et al., 1988).

Conclusão

Depois de dois séculos estudando equilíbrios – padrões de consistência que não reclamam mais esforços de ajustamento – os economistas estão começando a estudar a emergência dos equilíbrios, assim como os padrões de evolução do sistema econômico.

Isto é, eles estão começando a estudá-lo fora do equilíbrio. Esse modo de desenvolver o conhecimento econômico exige que os problemas sejam abordados por meio de algoritmos. Ele convida, ademais, a abordar com profundidade o modo de reação dos agentes às mudanças – e a reconhecer que esse modo pode diferir – e que os agentes, por isso, são naturalmente heterogêneos. Esse modo de desenvolver a teoria econômica é necessariamente evolucionário. Não compete com as teorias de equilíbrio nem se põe como um mero acrescentamento à teoria econômica padronizada. Vem a ser teoria econômica desenvolvida de um modo mais geral, de um modo que toma o sistema fora do equilíbrio. Dentro dela, o equilíbrio padrão se torna um caso especial.

Quando visto fora do equilíbrio, o sistema econômico se revela não como algo determinístico, previsível e mecânico; mas como um processo orgânico que evolve permanentemente. O padrão de comportamento às vezes chega a ser um equilíbrio simples, homogêneo tal como na teoria tradicional. Porém, freqüentemente ele se afasta desse padrão. Repetidamente, apresenta-se agora em mudança constante, produzindo perpetuamente novos comportamentos.

Um teste da eficácia dessa abordagem fundamental vem a ser perguntar se ela ajuda a superar certas dificuldades – ou anomalias – que enfraquecem a abordagem prevalecente. Certamente, a teoria econômica fora do equilíbrio passa nesse teste. No interior da teoria econômica de equilíbrio, os problemas da seleção de equilíbrios e da formação da expectativa geram indeterminações. Essas duas indeterminações não deveriam surpreender, pois elas dizem respeito a problemas de formação – de vir a ser –, os quais não podem ser resolvidos pela análise estática. Ambos são fonte de considerável desconforto para os economistas. Porém, ao serem tratados pela teoria que trabalha fora do equilíbrio, eles se dissolvem e desaparecem porque agora são encarados do modo adequado.

Referências

- Anderson P., K. J. and K. Arrow, D. Pines, Eds. (1988), *The Economy as an Evolving Complex System*, Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Arthur, W.B. (1989), ‘Competing Technologies, Increasing Returns and Lock-in by Historical Events,’ *Economic Journal*, 99, 106-131.
- Arthur, W. B., (1994), *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Arthur, W. B., J. H. Holland, B. LeBaron, R. Palmer, and Paul Tayler (1997), ‘Asset Pricing Under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market,’ in W. B. Arthur, S. N. Durlauf, and D. A. Lane (eds.), *The Economy as an Evolving Complex System II*, Reading, Mass.: Addison-Wesley, 15-44.
- Arthur, W. B., S. N. Durlauf, D. A. Lane, Eds. (1997), *The Economy as an Evolving Complex System II*, Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Arthur, W.B. (1994), ‘Bounded Rationality and Inductive Behavior (the El Farol problem),’ *American Economic Review Papers and Proceedings*, 84, 406-411.
- Arthur, W.B. (1999), ‘Complexity and the Economy,’ *Science*, 284, 107-109.
- Bak, P., C. Tang, and K. Wiesenfeld (1988), ‘Self-Organized Criticality,’ *Physical Review A*, 38, 364.
- Bak, P., K. Chen, J. Scheinkman, and M. Woodford. (1993), ‘Aggregate Fluctuations from Independent Sectoral Shocks’ *Ricerche Economiche*, 47, (3).
- Blume, L. E., (1997), ‘Population Games,’ in *The Economy as an Evolving Complex System II*, 425-460, (Op. Cit.)
- Blume, L. E. and S. N. Durlauf, Eds. (2005), *The Economy as an Evolving Complex System III*, Oxford Univ. Press.
- Brock, W. A. and C.H. Hommes. (1998), ‘Heterogeneous Beliefs and Routes to Chaos in a Simple Asset Pricing Model.’ *Journal of Economic Dynamics and Control*. 22, 1235-1274.
- Challet, D., M. Marsili, and Y-C. Zhang. (2004), *Minority Games*. Oxford Univ. Press.
- Coolen, A. C. C. (2005), *The Mathematical Theory of Minority Games*. Oxford Univ. Press.
- Durlauf, S. N. (1993), ‘Nonergodic Economic Growth,’ *Review of Economic Studies*, 60, 349-366.

- Durlauf, S. N. (1997), ‘Statistical Mechanics Approaches to Socioeconomic Behavior,’ in *The Economy as an Evolving Complex System II*, 81-104, (Op. Cit.) and in *Journal of Economic Growth* 1, 75.
- Epstein, J. M. (2005), ‘Remarks on the Foundations of Agent-Based Generative Social Science,’ in this Handbook.
- Fudenberg, D. and D. Levine. (1998), *The Theory of Learning in Games*. MIT Press.
- Helpman, E. and P. R. Krugman. (1985), *Market Structure and Foreign Trade*, Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Holland J.H., K. Holyoak. (1986), R. Nisbett, P. Thagard, *Induction*, MIT Press.
- Ioannides, Y. M. (1997), ‘The Evolution of Trading Structures,’ in *The Economy as an Evolving Complex System II*, 129-167, (Op. Cit.)
- Judd K. and L. Tesfatsion, eds. (2005) *Handbook of Computational Economics*, Vol. 2: *Agent-Based Computational Economics*, ELSEVIER/North-Holland.
- Kirman, A. (1997), ‘The Economy as an Interactive System,’ in *The Economy as an Evolving Complex System II*, 491-531, (Op. Cit.)
- Kollman, K., J. Miller, and S. Page. (1997), ‘Computational Political Economy,’ in *The Economy as an Evolving Complex System II*, 461-490, (Op. Cit.)
- Koppl, R. and J. B. Rosser. (2002), ‘All that I have to Say has already Crossed your Mind,’ *Metroeconomica*, 53, 339-360.
- Lane, D. A. (1993), ‘Artificial Worlds and Economics, Parts I and II,’ *Journal of Evolutionary Economics* 3:2, 89-107 and 3:3, 177-197.
- Lane, D. A. and R. Maxfield. (1997), ‘Foresight, Complexity and Strategy,’ in *The Economy as an Evolving Complex System II*, 169-198, (Op. Cit.).
- Lindgren, K. (1992), ‘Evolutionary phenomena in simple dynamics,’ in C.G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer and S. Rasmussen, eds, *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Reading MA, pp. 295-312.
- Lucas, R. E., (1978), ‘Asset Prices in an Exchange Economy,’ *Econometrica* 46, 1429.
- Marimon R., McGrattan E., and T. J. Sargent. (1990), *J. Econ. Dynamics and Control*, 14, 329.
- Marks, R.E. (1989), ‘Breeding Hybrid Strategies: Optimal behavior for Oligopolists,’ in J.D. Schaffer, ed., *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, George Mason Univ. Morgan Kaufmann), 198-207.
- Miller, J. H. (1988), ‘The Evolution of Automata in the Repeated Prisoner’s Dilemma,’ Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor.

- Palmer, R.G., W. B. Arthur, J. H. Holland, B. LeBaron, P. Tayler. (1994) ‘Artificial Economic Life: A Simple Model of a Stockmarket.’ *Physica D*, 75, 264-274.
- Samuelson, L. (1997), Evolutionary games and equilibrium selection. MIT Press, Cambridge, MA.
- Sargent T. J., (1994), Bounded Rationality in Macroeconomics, Oxford: Clarendon Press.
- Schumpeter, J. (1954), *A History of Economic Analysis*. Oxford Univ. Press, New York.
- Schelling, T. (1978), *Micromotives and Macrobbehavior*, Norton, New York.
- Tesfatsion, L. (1997), ‘How Economists can get ALife,’ in *The Economy as an Evolving Complex System II*, 533-564, (Op. Cit.).
- Tesfatsion, L. (2005), ‘Agent-Based Computational Economics: A Constructive Approach to Economic Theory,’ in this Handbook.
- Wilhite, A. W. (2005), ‘Economic Activity on Fixed Networks,’ in this Handbook.
- Young, H. P. (1998), *Individual Strategy and Social Structure*. Princeton University Press, Princeton, NJ.