

Dilema do Prisioneiro e Dinâmicas Evolucionárias

Eleutério F. S. Prado

Professor da FEA-USP

RESUMO

Para discutir jogos evolucionários baseados no dilema do prisioneiro apresentam-se, de início, as conclusões bem conhecidas do teorema popular no contexto de jogos repetidos. Em seqüência, mencionam-se as premissas e os resultados mais importantes do estudo pioneiro de Axelrod sobre a evolução da cooperação. Exploram-se, depois, três modelos evolucionários que consideram estratégias mais complicadas do que a simples repetição da ação de cooperação ou de defecção. Os indivíduos que as adotam são tirados de uma população homogênea para participar de competições bilaterais. A seqüência de modelos busca encontrar aquelas estratégias que apresentem maior capacidade de sobrevivência. O objetivo, entretanto, não é confirmar as principais conclusões de Axelrod, mas mostrar que elas não se sustentam.

PALAVRAS-CHAVE

jogo evolucionário, dilema do prisioneiro, evolução da cooperação, estratégia de retaliação

ABSTRACT

In order to discuss evolutionary games based on the prisoner dilemma, first of all, the paper presents the well-known folk theorem conclusions on the repeated game context. Thus, it mentions the main assumptions and outcomes reached by Axelrod's study on the evolution of cooperation. Then, the paper analyses three evolutionary models that takes in account strategies more complexes than the simple ones based on the repetition of the same cooperation or defection actions. The individuals drawn from a homogenous population adopt these strategies and participate in pairwise contests. The sequence of models looks for strategies that have more surviving capabilities. The main objective is not to show that Axerod's conclusions are right, but, on the contrary, it is to demonstrate that they are wrong.

KEY WORD

evolutionary game, prisoner dilemma, cooperation evolution, retaliation strategy

INTRODUÇÃO

O dilema do prisioneiro tem atraído a atenção dos pesquisadores em ciência social por retratar, de modo penetrante, uma situação paradoxal: a busca do melhor por parte de cada jogador produz um resultado não ótimo do ponto de vista do conjunto dos jogadores. A análise de situação que propicia tem sido considerada relevante em economia, ciência política, filosofia moral etc. Ademais, ele tem sido extensamente explorado na análise de muitas alternativas teoricamente importantes para o desenvolvimento da teoria dos jogos, tais como a interação repetida, a informação assimétrica, a limitação da racionalidade etc. Em consequência, merece ser também analisado por meio dinâmicas evolucionárias.¹

Na seção que segue esta introdução resume-se, de início, os principais resultados analíticos referentes ao jogo seqüencial obtido pela repetição do mesmo dilema do prisioneiro, finita e infinitamente. O que se faz de fato é apresentar brevemente as conclusões do assim chamado teorema popular. Em seqüência, já no contexto especificamente evolucionário, mencionam-se as premissas e conclusões mais importantes do estudo pioneiro de Axelrod sobre a evolução da cooperação. (AXELROD, 1984) Este estudo é considerado um marco no tratamento do tema, não porque tenha provado que a cooperação entre egoístas é possível, mas porque sugeriu que existe uma estratégia “robusta” e “boa”, baseada no princípio reciprocidade, que se mostra vencedora quando confrontada com outras em torneios em que o objetivo dos jogadores é acumular a maior soma possível de *payoffs*.

Na segunda, explora-se uma seqüência de modelos evolucionários em que certas estratégias adotadas por elementos de uma mesma população podem sobreviver ou tender a desaparecer. Estes modelos, construídos com base na formulação básica do dilema do prisioneiro, encontram-se expandidos para incluir estratégias mais complicadas do que a repetição simples da ação de cooperação ou de defecção. Os exercícios então desenvolvidos buscam encontrar as estratégias com maior capacidade de sobrevivência em competições que envolvem, por simplicidade, três estratégias. Não, porém, para confirmar as principais conclusões de Axelrod, mas para mostrar que elas não se sustentam.

1 O presente artigo originou-se de várias modificações e extensões feitas em um modelo básico encontrado em VEGA-REDONDO (1996, p. 72-79).

1. EMERGÊNCIA DA CIVILIZAÇÃO

Tendo por perspectiva a questão da emergência da moralidade,² aqui se pretende estudar o dilema do prisioneiro por meio da teoria dos jogos evolucionários,³ explorando um caso particular. Esta aparece na seguinte matriz de *payoff*, em que C responde pela estratégia “cooperação” e D indica a estratégia “defecção”:

	C	D
C	3 ; 3	0 ; 4
D	4 ; 0	1 ; 1

Como bem se sabe, o dilema do prisioneiro de apenas uma fase tem uma solução bem determinada. Tendo por certo que para cada um dos jogadores a defecção é a estratégia dominante, o equilíbrio do jogo se dá na combinação de estratégias (D; D). Esta combinação, como também é bem sabido, é ineficiente, já que um movimento simultâneo para (C; C) traz um ganho para ambos. Ora, vem a ser justamente este resultado paradoxal que suscita a busca de extensões do modelo de fase única.

Uma alternativa amplamente examinada na literatura consiste em considerar que o mesmo jogo, disputado sempre pelos mesmos dois jogadores, tem agora múltiplas fases. Dois casos são examinados: um deles em que o número de fases é finito e bem determinado e o outro em que o número de fases é infinito ou finito, mas indeterminado. No primeiro deles, os jogadores dotados de racionalidade plena e de capacidade perfeita de previsão estão obrigados a raciocinar por indução para trás. Assim, eles examinam primeiro a última fase e, em seqüência, a penúltima, a antepenúltima, e assim por diante, até chegar à primeira delas. Como em cada fase o futuro é conhecido e só o presente importa, a decisão coincide com aquela do jogo de apenas uma fase. Em conseqüência, a solução do jogo repetido *n* vezes, com *n* finito, requer que os jogadores optem pela estratégia defecção em todas as fases.

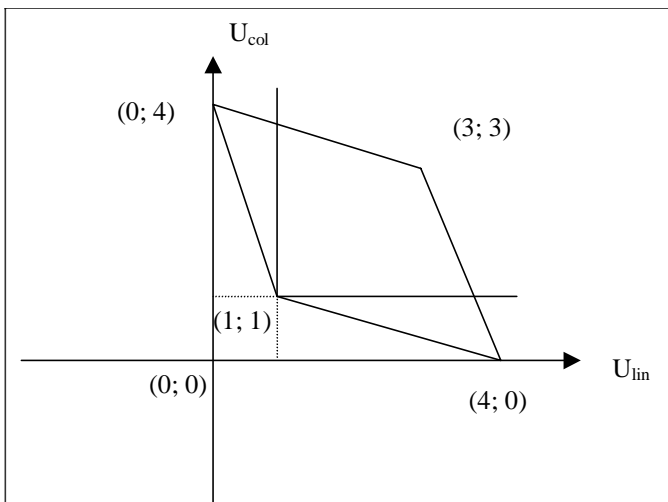
2 Sob essa mesma perspectiva, o dilema do prisioneiro tem sido estudado de muitas formas. Uma resenha que apresenta os esforços de economistas para compreender tal emergência foi feita por ROUTLEDGE (1998).

3 Esta teoria tem recebido considerável atenção recentemente na esfera da Economia, tendo sido exposta em livros como os de SAMUELSON (1997) e WEIBULL (1997). Uma avaliação interessante sobre o seu potencial para o desenvolvimento da teoria econômica foi feita por MAILATH (1998).

Se o número de repetições é infinito, a indução para trás não pode ser aplicada e, assim, inúmeras possibilidades de solução emergem, entre as quais se encontra a permanente defecção. Estas nascem do fato de que agora cada jogador pode punir o outro no presente, se este for o caso, para obter dele um comportamento mais cooperativo no futuro, mesmo se esta ação tem custos para ele próprio. Para descobrir todo o conjunto das soluções possíveis, é mais adequado considerar a situação mais geral, em que o número de repetições pode ser finito, mas indeterminado - num certo grau. A esta última aplica-se o teorema popular (*folk theorem*), que tem aplicação mais geral do que a examinada no presente contexto:

“Num jogo com repetição infinita e um conjunto finito de ações em cada repetição, qualquer seqüência de ações associada a um número finito de repetições forma um equilíbrio perfeito de subjogo se as seguintes condições são observadas: a) a taxa de preferência intertemporal é zero ou positiva, mas suficientemente pequena; b) a probabilidade de que o jogo termine em qualquer fase é zero ou positiva, mas suficientemente pequena; c) os payoffs esperados de cada jogador na seqüência são pelo menos iguais ou maiores do que os payoffs obtidos com a solução minimax.”

No caso em consideração, os *payoffs* associados à solução minimax vem ser (1;1). Isto implica que todo ponto da interseção entre o paralelogramo e o quadrante com vértice em (1; 1), na figura a seguir, corresponde a um equilíbrio perfeito de subjogo (que, como se sabe, é também um equilíbrio de Nash).



Este resultado é suficiente para mostrar que a cooperação é possível entre agentes definidos como *homo economicus*. Entretanto, não é capaz de dizer nada de muito específico sobre as condições nas quais a cooperação entre estes egoístas racionais, altamente abstratos, vem a ocorrer em efetivo. Para examiná-las, Axelrod desenvolveu um método de investigação baseado na simulação de processos de evolução por meio de torneios em computador. Nestes torneios, competiam pelo sucesso e, assim, pela própria sobrevivência, autômatos que representavam certas estratégias, os quais foram criados por cientistas de vários campos do conhecimento. Desse modo, ele pretendia descobrir como a competição engendra a cooperação. Com o seu método Axelrod pretendeu chegar, assim, a conclusões muito mais bem definidas sobre a emergência da cooperação e, assim, da própria sociedade.

Ele apresentou assim o problema da cooperação:

“Sob que condições a cooperação emergirá num mundo de egoístas e sem autoridade central? Esta questão intrigou muitos durante muito tempo - e por boas razões. Sabemos que as pessoas não são anjos e que elas tendem em primeiro lugar a se preocupar consigo mesmas e com o que lhes pertencem. Sabemos que a cooperação existe e que a civilização se baseia nela. Porém, em situações em que cada indivíduo tem incentivo apenas para ser egoísta, como ela poderá se desenvolver?” (AXELROD, 1984, p. 3)

Mediante o seu procedimento de investigação, Axelrod pretendeu estar investigando uma questão fundamental que diz respeito à própria constituição da sociedade.⁴ O contraponto às suas pré-concepções ele encontrou em Hobbes. Este autor clássico, como lembra o próprio Axelrod, acreditava que a ordem entre indivíduos egoístas só poderia ser assegurada por meio de um poder absoluto. Sem o peso da mão visível de uma autoridade central os homens viveriam no estado de natureza em que prevaleceria a luta de todos contra todos. Hobbes argumentara, então, que para agregar os homens no estado social era imperioso que existisse um estado forte. De modo contrário, Axelrod pretendeu mostrar que a cooperação pode emergir espontaneamente entre indivíduos que buscam o seu próprio interesse, desde que na interação entre eles impere um princípio de reciprocidade.

É evidente que o seu método vai do fundo à superfície (*bottom up approach*⁵). A partir de suposições sobre os indivíduos e sobre as formas de interação prevalentes

4 Ver HOFSTADER (1986).

5 Esta abordagem vai do indivíduo à sociedade, mas não implica a adoção nem do individualismo sociológico nem do individualismo metodológico; ela não implica assumir qualquer reducionismo, ou seja, a idéia de que todo fenômeno social pode ser reduzido às crenças, atitudes, ações e decisões dos indivíduos. (PRADO, 1993)

entre estes pretende chegar a conclusões sobre o comportamento do sistema social como um todo. Ele escolheu como modelo de interação social problemática o dilema do prisioneiro, que envolve tanto a possibilidade da colaboração como a do conflito de interesses. Para demonstrar a sua tese, escolheu como contexto aquele que é dito não cooperativo, em que não existe autoridade externa reguladora das interações e, assim, não há inclusive a possibilidade de firmar acordos com cláusula de obrigatoriedade. Nessas circunstâncias, o que torna a cooperação possível é a própria possibilidade do reencontro num horizonte temporal de duração indeterminada. A possibilidade de repetição da interação interliga os resultados de cada uma delas com os das suas subseqüentes.

É evidente, também, que Axelrod não manteve em seus exercícios evolucionários o suposto de que os jogadores atuam como *homo economicus*. Apesar de concebê-los como egoístas que buscam satisfazer o próprio interesse, diferentemente, ele os definiu por meio de programas que são executados com consistência ao longo do tempo e que denotam certas regras de comportamento. Segundo ele próprio, as estratégias refletem formas de procedimentos originados em regras práticas, instintos, hábitos ou mecanismos de imitação. (AXELROD, 1984, p. 18) O jogo evolucionário, como depois notou Binmore (1995, p. 190), trabalha com um modo de comportamento que pode ser chamado de *homo behavioralis*, e que se caracteriza por ser programado ou autoprogramado. Em consequência, é importante anotar a seguinte advertência de Axelrod:

“Naturalmente, a formulação abstrata do problema da cooperação como um dilema do prisioneiro coloca de lado muitas características vitais que fazem de cada interação real algo de único. Exemplos do que se está deixando de lado ao adotar esta abstração formal incluem a possibilidade de comunicação verbal, a influência direta de terceiros pessoas, os problemas da implementação das escolhas, a incerteza sobre o que o outro jogador fez na jogada anterior.. O valor de uma análise que não os contempla é que ela clarifica algumas características sutis da interação - características estas que poderiam ser perdidas no intrincado da complexidade das circunstâncias altamente particulares nas quais as escolhas reais são feitas.” (AXELROD, 1984, p. 19)

Os resultados dos torneios efetuados por Axelrod mostraram que havia uma estratégia que se sobressaía sempre como vencedora e que fora chamada pelo seu inventor, Anatol Rapoport, de “*tit-for-tat*”. Esta estratégia, que impressionava pela simplicidade, consistia em cooperar no primeiro movimento para, depois, replicar com o mesmo comportamento da estratégia adversária na rodada anterior: se este era de cooperação, ela manda cooperar; se não o era, ela manda optar pela

defecção. Axelrod concluiu, então, que a cooperação podia emergir num mundo formado por egoístas e sem autoridade central e que, para tanto, era necessário que houvesse a possibilidade da interação repetida - o que, de fato, como se viu, eram já inferências que poderiam ser tiradas do teorema popular.

Entretanto, Axelrod pretendeu tirar conclusões mais bem definidas de seu exercício. No contexto evolucionário, ele concluiu que mostrara com suficiência que a cooperação era necessariamente o que vinha a ocorrer em seu mundo de agentes egoístas, com horizonte temporal de duração indeterminada. Entusiasmado com as vitórias da estratégia “*tit-for-tat*”, concluiu também que a cooperação evolvia em três estágios:⁶

- a) Ela pode ter início mesmo num mundo de defecção incondicional. Isto vem a ocorrer desde que surja nesse mundo um conjunto suficientemente grande de agentes intrinsecamente colaboradores e que agem com base na reciprocidade;
- b) A estratégia baseada na reciprocidade pode prosperar num mundo em que diversas outras estratégias estivessem competindo;
- c) Assim que a cooperação se instalasse no mundo de egoístas, ela estaria protegida da invasão de outras estratégias menos cooperativas.

Ora, as duas primeiras conclusões precisam ser qualificadas e a terceira delas está errada - o que, aliás, foi mostrado por Binmore (1995, p. 187-203). Nos modelos apresentados abaixo, em que se mantém o contexto evolucionário, mas se opta por um caminho analítico, serão mostrados os problemas das conclusões de Axelrod de um modo especialmente claro e transparente.

2. CIVILIZAÇÃO OU BARBÁRIE

Os modelos de jogos repetidos estão centrados em noções de equilíbrio como situações que ocorrem porque as escolhas, informadas suficientemente, são estrategicamente racionais. Já os modelos de jogos evolucionários em ciência social baseiam-se numa idéia de processo que envolve seleção, mutação e sobrevivência de estratégias. Estas são adotadas e substituídas durante o jogo por agentes limitados racionalmente, que buscam melhorar o *payoff* obtido, de tal modo que o equilíbrio vem a ser uma consequência possível de um movimento com

6 Ver AXELROD (1984, p. 20-21).

temporalidade irreversível. A adoção não é explicada nos modelos, mas a substituição de estratégias pode ser compreendida como algo que surge por imitação e aprendizagem: durante o jogo, os agentes buscam optar por aquelas estratégias mais bem-sucedidas.

Os jogos evolucionários são jogados por populações. Suponha-se que o tempo está subdividido em períodos e que, em cada período, todos os elementos de uma população monomórfica bem grande (infinita, tecnicamente) são escolhidos aleatoriamente, dois a dois, para jogar o dilema do prisioneiro em consideração. Eles podem pertencer a uma das frações da população, as quais se caracterizam pelo fato de que os seus elementos adotaram, provisoriamente talvez, uma das seguintes cinco estratégias:

- poliana: coopera independentemente da estratégia da fração que enfrenta (indicada por C);
- anti-social: escolhe a defecção sempre, independentemente da estratégia da fração adversária (indicada por D);
- retaliadora: toma a iniciativa de cooperar, mas em seqüência responde com a mesma ação empregada por sua oponente no período anterior; se ela cooperou, ela coopera e se ela não o fez, ela opta pela defecção. Esta estratégia é mais conhecida como “*tit-for-tat*” (indicada por R);
- oportunista: mutação da anti-social que escolhe a sua estratégia dependendo da fração adversária do momento; se esta joga poliana, ela prefere a defecção; se a adversária joga a defecção, ela também opta por esta alternativa; se aquela joga a estratégia retaliadora, ela fará o mesmo; se a outra for também oportunista, ela prefere, mais uma vez, jogar “*tit-for-tat*” (indicada por O);
- retaliadora disfarçada: vem a ser uma mutação da estratégia anti-social que se disfarça de “*tit-for-tat*”, enganando as adversárias; estas, por acreditar que estão enfrentado esta última, optam, por exemplo, pela cooperação, mas obtêm como resposta a defecção sempre (indicada por Rd).

Com base nesse pequeno conjunto de estratégias (infinitas outras poderiam ter sido pensadas), vários jogos podem ser considerados. O primeiro a ser examinado contém agentes que adotaram e só podem adotar as estratégias poliana, anti-social e retaliadora. Como a estratégia de defecção tende a desaparecer neste primeiro jogo, em seqüência será considerado o jogo que contém as estratégias poliana, retaliadora e oportunista. Por sua vez, como agora é a estratégia poliana que tende a desaparecer, será então analisado o jogo que contém as estratégias retaliadora, oportunista e retaliadora disfarçada. Os outros jogos possíveis serão desprezados.

Como cada jogo tem horizonte infinito, vai-se assumir sempre que em cada encontro os *payoffs* considerados são obtidos descontando-se todo fluxo de rendimentos futuros com uma determinada taxa. De acordo com Binmore (1992, p. 360-369), dada a matriz de *payoffs* anteriormente apresentada, pode-se apresentar a estrutura de *payoffs* de todos os jogos possíveis com estas cinco estratégias por meio da seguinte matriz de dimensão 5 por 5

	C	D	R	O	Rd
C	3; 3	0; 4	3; 3	0; 4	0; 4
D	4; 0	1; 1	1; 1	1; 1	1; 1
R	3; 3	1; 1	3; 3	3; 3	0; 4
O	4; 0	1; 1	3; 3	3; 3	0; 4
Rd	4; 0	1; 1	4; 0	4; 0	1; 1

Para dar uma forma concreta à dinâmica evolucionária, sob o suposto de que o processo de seleção é cego, será utilizado aqui o replicador dinâmico em sua versão de tempo contínuo,⁷ a qual é menos transparente do a versão em tempo discreto, mas permite obter mais facilmente resultados por simulação.

$$\dot{v}_i(t) = v_i(t)[U_i[i; v(t)] - U_m[v(t)]]; \quad i = c, d, r, o, rd$$

em que $v_i(t)$ é a frequência de optantes pela estratégia i ($i = c, d, r, o, rd$) na população, no momento t ; $\dot{v}_i(t)$ é a derivada em relação ao tempo dessa frequência; $U_i[i; v(t)]$ é o *payoff* da estratégia i dadas as frequências de todas as estratégias; e $U_m[i; v(t)]$ é o *payoff* médio das estratégias consideradas no jogo. A interpretação da fórmula acima é imediata: a taxa de mudança da frequência de optantes pela estratégia i cresce, estaciona ou decresce no tempo, dependendo da relação - positiva, nula ou negativa - entre o *payoff* da própria estratégia i e o *payoff* médio de todas as estratégias.

7 É claro que a escolha de um sistema dinâmico não é neutra em relação aos resultados que se pode obter. Entretanto, este problema é aqui minimizado porque o artigo tem como objetivo refutar certas afirmações de Axelrod, sem apresentar outras. De qualquer forma, as seguintes proposições são verdadeiras em relação à dinâmica escolhida: a) se uma combinação de estratégias é equilíbrio de Nash, então ela é um ponto estacionário do replicador dinâmico; b) há, entretanto, pontos estacionários do replicador dinâmico que não são equilíbrios de Nash; c) Se um ponto é estável, então ele é um equilíbrio de Nash, mas pode existir equilíbrios de Nash que não são estáveis; d) Se um ponto é assintoticamente estável, então é isolado e um equilíbrio perfeito. Discussões mais extensas do problema, assim com as demonstrações das proposições acima mencionadas, podem ser encontradas em SAMUELSON (1997, p. 62-81) e em VEGA-REDONDO (1996, p. 45-46).

Na esfera da biologia, a fórmula do replicador dinâmico é quase sempre derivada de um processo de competição pela sobrevivência de fenótipos (identificados com as estratégias do jogo) que têm diferentes capacidades de gerar descendentes (medidas estas como *payoffs* médios obtidos em jogos populacionais de encontros bilaterais). Em ciência social, a mesma fórmula pode ser obtida de um processo de imitação dinâmica, por meio do qual indivíduos de um população que adotaram uma certa estratégia têm a possibilidade de rever esta adoção, de tal modo que as frequências com que são jogadas vai se modificando durante o jogo até se fixarem, eventualmente, em um ponto ou órbita. (NACHBAR, 1990)

2.1 Do Estado de Natureza à Civilização

Para o primeiro jogo a ser considerado - ou seja, o jogo CDR - tem-se:

$$U [c; v(t)] = 3 - 3v_d(t)$$

$$U [d; v(t)] = 4 - 3v_d(t) - 3v_r(t)$$

$$U [r; v(t)] = 3 - 2v_d(t)$$

$$\text{com } v_c(t) = 1 - v_d(t) - v_r(t)$$

$$U_m [v(t)] = 3 - 2v_d(t) - 2v_d(t)v_r(t)$$

A partir dessas expressões pode-se obter com facilidade as equações dinâmicas do jogo estendido (omite-se a primeira delas, referente à estratégia poliana, porque uma delas é sempre redundante):

$$\dot{v}_d(t) = v_d(t) [1 - v_d(t) - 3v_r(t) + 2v_d(t)v_r(t)]$$

$$\dot{v}_r(t) = v_r(t) [2v_d(t)v_r(t)]$$

Este sistema autônomo de equações diferenciais tem diversos pontos estacionários, os quais podem ser encontrados igualando a zero ambos os termos de seu lado direito (para maior clareza, omite-se deste ponto em diante a dependência das variáveis em relação ao tempo):

$$v_d [1 - v_d - 3v_r + 2v_d v_r] = 0$$

$$v_r [2v_d v_r] = 0$$

É imediato que $(0; 0)$, ponto em que existe apenas a estratégia C, é um deles. Se $v_d \neq 0$ e $v_r = 0$, então $1 - v_d = 0$; logo $(1; 0)$, em que só a estratégia D está presente, vem a ser um outro ponto estacionário. Se $v_d = 0$ e $v_r \neq 0$, então $v_d v_r = 0$, o que é verdadeiro para qualquer ponto $(0; v_r^*) \in H = \{(0; v_r) \mid 0 < v_r \leq 1\}$, logo, os pontos deste conjunto são também estacionários. Em $(0; 1)$ apenas a estratégia R está presente e em H coexistem as estratégias C e R.

Para proceder à análise da estabilidade é preciso considerar o seguinte simplex:

$$\Delta^2 = \{(v_d; v_r) \mid v_d + v_r \leq 1, v_d \geq 0, v_r \geq 0\}$$

Considere-se um ponto interior $(v_d; v_r)$ que pertence ao simplex Δ^2 e a uma vizinhança arbitrariamente pequena de $(0; 0)$; como nesse ponto tem-se que $v_d'(0) > 0$ e $v_r'(0) > 0$, pode-se concluir que $(0; 0)$ não é estável. Considere-se, agora, um outro ponto $(v_d; v_r)$ que pertence a uma vizinhança de $(1; 0)$; como se tem, igualmente, que $v_d'(0) > 0$ e $v_r'(0) > 0$, também é imediato que $(1; 0)$ não é estável.

Para prosseguir é preciso ver que H pode ser particionado em dois subconjuntos $H_1 = \{(0; v_r) \mid 0 < v_r < 1/3\}$ e $H_2 = \{(0; v_r) \mid 1/3 \leq v_r \leq 1\}$. Eis que há um conjunto de pontos em Δ^2 em que $v_d \neq 0$ mas $v_d' = 0$. Para encontrá-los é preciso igualar a zero a expressão $[1 - v_d - 3 v_r + 3 v_d v_r]$, obtendo os seguintes resultados:

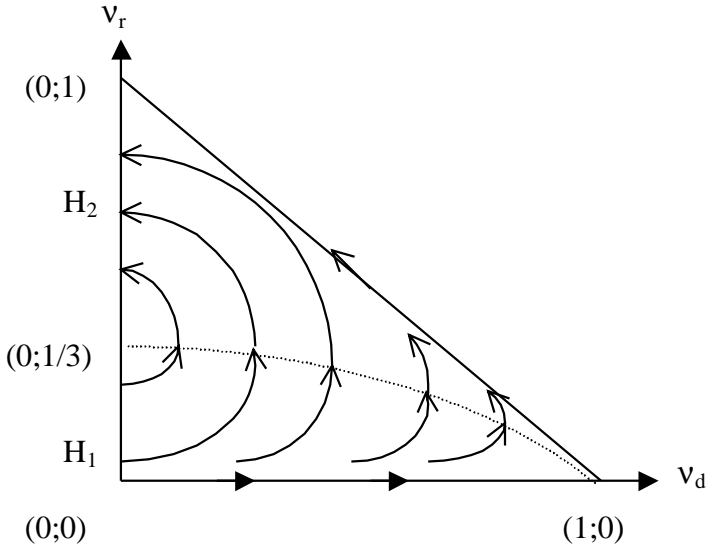
$$v_r = \frac{1 - v_d}{3 - 2v_d}; \text{ com } \lim_{v_d \rightarrow 0} v_r = \frac{1}{3} \text{ e com } \lim_{v_d \rightarrow 1} v_r = 0$$

Empregando um raciocínio semelhante ao desenvolvido anteriormente é fácil verificar que os pontos de H_1 não são estáveis, mas que os pontos de H_2 são estáveis no conceito de Liapunov, mas não assintoticamente estáveis. Para verificar esta última propriedade, considere-se um ponto $(0; v_r^*) \in H_2$; considere-se também, agora, um outro ponto situado no interior do simplex e numa vizinhança do ponto anterior, ou seja, $(v_d^\circ; v_r^\circ) \in \Delta^2 \cap V(0; v_r^*)$, de tal modo que $v_d^\circ > 0$ e $v_r^\circ > v_r^*$. Examinando, agora, as equações diferenciais que formam o sistema em consideração, é fácil mostrar que os seguintes limites são válidos

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_d^\circ = 0 \text{ e, ademais, } \lim_{t \rightarrow \infty} v_r^\circ = v_r^{\circ\circ} > v_r^*$$

Dito em palavras, isto implica que não há convergência em $(0; v_r^*) \in H_2$.

É com certa facilidade que se pode fazer, por meio de simulações, uma análise da dinâmica global deste sistema de equações diferenciais. Os resultados aparecem no gráfico abaixo:



A interpretação destes resultados é imediata. Pode-se começar a extraí-los partindo do ponto $(0; 0)$. Se apenas a estratégia poliana (C) aparece na população, esta situação permanece indefinidamente, desde que não surjam agentes que atuam segundo as estratégias D e/ou R. Tem-se, então, o que pode ser denominado de estado de natureza de Rousseau. Se apenas surgem aqueles que agem por meio da defecção (D), então no equilíbrio final existirão somente indivíduos desta espécie; aqueles que atuam conforme a estratégia poliana vão se reduzindo pouco a pouco até desaparecerem por completo no ponto $(1; 0)$. Assim, tem-se o que pode ser chamado propriamente de estado de natureza de Hobbes, pois vale aí que a vida é “solitária, pobre, suja, bruta e curta”. Se surgem indivíduos que agem segundo a estratégia R, então o equilíbrio se dará em algum ponto de H. Se, porém, surge uma combinação qualquer de D e R, então o equilíbrio final ocorrerá necessariamente em H_2 .

Como um todo, o exercício confirma a tese do teorema popular segundo a qual a cooperação pode surgir espontaneamente num jogo repetido de horizonte indeterminado, estruturalmente não cooperativo. O contexto evolucionário mostra que a estratégia não cooperativa, anti-social, pode ser eliminada da população, desde que existam aí agentes que, por opção estratégica, retaliam tal comportamento e que estão assim vocacionados para a cooperação (ou seja, desde que haja jogadores

que adotaram a estratégia *tit-for-tat*). Estes agentes protegem os cooperadores persistentes (aqueles que optaram pela estratégia poliana), de tal modo que no equilíbrio haja uma composição populacional formada por agentes que escolheram C ou R.

Nesse exercício, que parece confirmar inteiramente as conclusões de Axelrod, a estratégia retaliadora ocupa um papel proeminente e o resultado que tende a ser alcançado pode ser avaliado como “bom”, pois aqueles que atuam por meio desta estratégia agem segundo um princípio de reciprocidade que pode ser assim enunciado: faça aos outros aquilo que eles fazem para você. Como este princípio de comportamento está fundado numa norma de apreciável valor moral, pode-se denominar o estado social resultante pelo termo “civilização”.

2.2 Da Civilização à Barbárie

O segundo jogo a ser examinado vem a ser aquele em que a população contém jogadores que adotam as estratégias poliana, retaliadora e oportunista (CRO). Em relação ao jogo anterior, sai a estratégia D, que lá havia desaparecido, e entra a estratégia O, cuja origem pode ser explicada por mutação do próprio D. Procedendo de acordo com os passos do jogo anterior, encontra-se com facilidade os *payoffs* esperados das três estratégias, assim como o *payoff* médio entre elas:

$$U [c; v(t)] = 3 - 3v_0$$

$$U [r; v(t)] = 3$$

$$U [o; v(t)] = 4 - v_r - v_0$$

$$U_m [v(t)] = 3 - 2v_0 + 2v_0 v_r + 2v_0^2$$

Com base nessas expressões, pode-se chegar aqui, tal como antes, ao sistema autônomo de equações diferenciais:

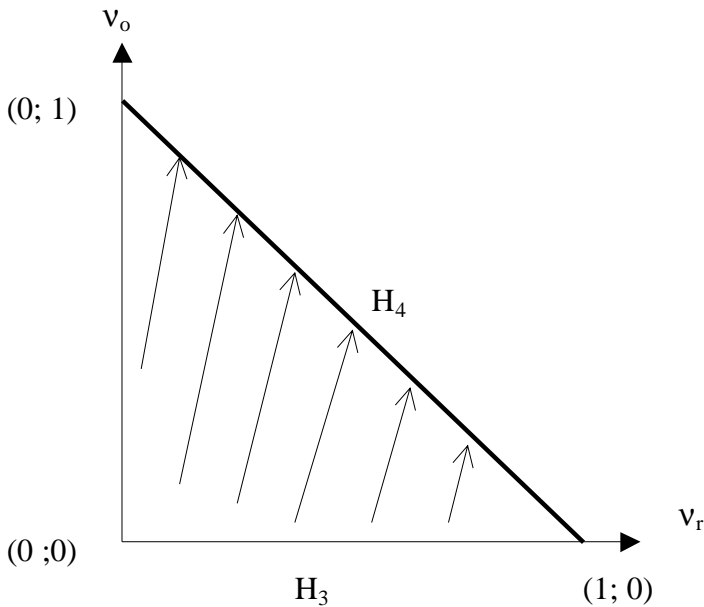
$$\dot{v}_r = v_r (2v_0 - 2v_0 v_r - 2v_0^2)$$

$$\dot{v} = v_0 (1 - v_r + v_0 2v_r v_0 - 2v_0^2)$$

Do mesmo modo que anteriormente, pode-se, então, descobrir os pontos estacionários, fazendo depois a análise da estabilidade. Os seguintes pontos isolados ou pertencentes a segmentos de reta são estacionários: (0; 0), (0; 1),

$(v_r^*; 0) \in H_3 = \{(v_r; 0) \mid 0 < v_r \leq 1\}$, $(v_r^*; v_o^*) \in H_4 = \{(v_r; v_o) \mid v_r + v_o = 1 \text{ com } 0 \leq v_o, v_r \leq 1\}$.

Os resultados da análise de estabilidade global estão no gráfico a seguir. Note-se aí que os pontos de H_3 não são estáveis e os pontos de H_4 apenas têm estabilidade de Liapunov.



A interpretação dos resultados é, novamente, imediata. Se apenas existem agentes que atuam segundo a estratégia poliana, em $(0; 0)$, esta situação tende a permanecer. Se, entretanto, aparecem oportunistas na população, estes tendem a eliminar completamente os indivíduos que cooperam em razão de sua natureza cooperativa. Este estado natural é substituído por outro, em $(1; 0)$, em que o comportamento cooperativo surge meramente porque indivíduos não cooperativos se respeitam mutuamente. Entretanto, diferentemente, se surgem tanto oportunistas quanto retaliadores, uma composição populacional que contém estes dois tipos de indivíduos prevalecerá. A cooperação, agora, decorre antes do medo do que do respeito mútuo. Note-se, ademais, que a proporção de oportunistas na população, enquanto aí subsistirem polianas, tende a crescer mais rápido do que a de retaliadores.

Se no primeiro jogo considerado havia uma tendência para a eliminação da estratégia anti-social, neste segundo há um viés no sentido de fazer com que a estratégia poliana tenda a desaparecer. No primeiro contexto, as oportunidades de sobrevivência da poliana estavam garantidas pela reciprocidade da retaliadora,

enquanto que as da estratégia anti-social estavam severamente limitadas por este mesmo comportamento que premia a cooperação e pune a defecção. Eis que no último contexto, entretanto, a estratégia persistentemente cooperadora está desprotegida. O comportamento cooperador, por princípio, dos que optam pela retaliadora não consegue defendê-la do comportamento predador dos que escolhem a estratégia oportunista. Em consequência, apenas conseguem sobreviver essas duas últimas.

O exercício confirma, mais uma vez, o resultado já clássico, segundo o qual a cooperação emerge num jogo de dilema do prisioneiro com horizonte indeterminado. Entretanto, agora é contrariada uma conclusão que se tornou arraigada após terem sido divulgados os resultados dos torneios de Axelrod, segundo a qual a estratégia retaliadora é sempre a mais robusta. (AXELROD, 1984, p. 169-191) O exercício mostra que a estratégia oportunista é mais forte do que a retaliadora, já que tende a crescer mais rápido e a predominar como opção na população. A cooperação emerge, mas não porque está fundada no princípio de reciprocidade antes referido e que se encontra implícito no comportamento dos indivíduos que empregam a estratégia “*tit-for-tat*”. A mutualidade que existe aqui é perversa: há cooperação porque os agentes com maior capacidade de sobrevivência são oportunistas, agentes do mal, que respeitam apenas os retaliadores que punem os outros oportunistas. Se for possível dizer que estes últimos agem por princípio, aqueles que seguem é o da falta de princípios. Há cooperação, mas o estado social prevalecente pode ser denominado de “barbárie”.

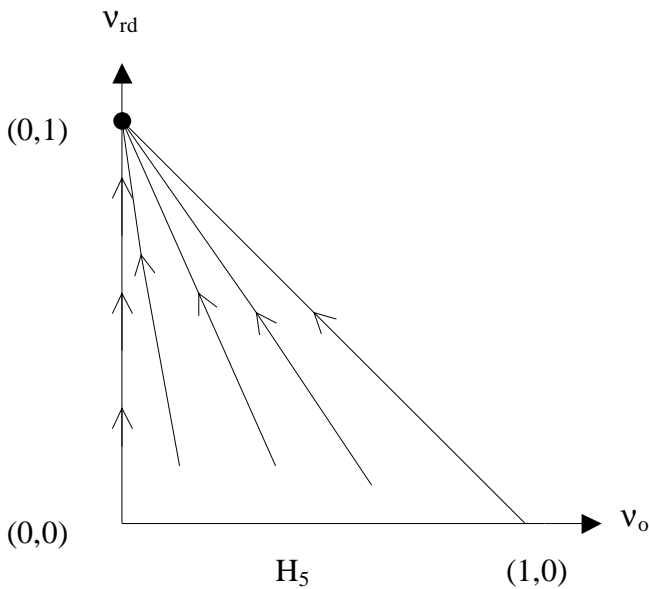
2.3 Da Barbárie ao Estado de Natureza

A estratégia oportunista pode ser encarada como decorrência de uma mutação da estratégia anti-social. Não se pense, porém, que o seu aparecimento seja o fim da história. Até o presente momento supôs-se que os indivíduos são sempre capazes de identificar corretamente os seus adversários. É possível - e mesmo natural - passar, agora, a admitir que os indivíduos estão dotados da capacidade do disfarce e que se utilizam dela para enganar os seus oponentes. Note-se que este recurso é normalmente empregado pelos animais racionais e não racionais na luta pela sobrevivência.

Por exemplo, o mesmo raciocínio poderia ser empregado para considerar uma nova mutação da estratégia que implica jogar sempre a defecção. Por meio dela passa a existir a possibilidade de um comportamento anti-social mais cínico, que aparenta ser retaliador para induzir aqueles que optam pela verdadeira retaliadora ou pela oportunista - que agora se afigura algo ingênua -, a se comportarem de modo cooperativo. À medida que eles fazem isto, o optante da estratégia disfarçadora consegue derrotá-los, porque ele mesmo jogará sempre a defecção.

Num jogo com as estratégias retaliadora, oportunista e retaliadora disfarçada é possível mostrar que esta última acaba predominando, de tal modo que as outras duas tendem a desaparecer. Assim, a sociedade que estava no estado de barbárie retorna ao estado de natureza hobbesiano. A esta conclusão pode se chegar analisando a matriz de *payoffs* apresentada anteriormente, já que a estratégia disfarçadora, indicada pelas letras Rd, lá aparece como estritamente dominante.

O gráfico apresentado em seqüência sintetiza a análise da dinâmica e da estabilidade global do sistema associado de equações diferenciais. Pode-se ver, imediatamente, que $(v_r^*; 0) \in H_5 = \{(v_o; 0) \mid 0 < v_o \leq 1\}$ e $(0; 1)$ são os únicos conjuntos de pontos estacionários desse sistema. Os pontos de H_5 não são estáveis, mas o último, em que há apenas agente Rd na população, vem a ser estável no sentido de Liapunov e assintoticamente.



CONCLUSÕES

No primeiro jogo examinado, as conclusões de Axelrod pareciam se confirmar: mesmo entre agentes egoístas que não se encontram constrangidos por uma autoridade externa a cooperação podia surgir e permanecer. A moralidade, assim, poderia originar-se de uma certa naturalidade anti-social do homem, não requerendo qualquer outro fundamento. No segundo jogo, a cooperação ainda encontrava lugar, mas já não se podia falar mais, propriamente, em moralidade, já que a mutualidade não se encontrava mais baseada em reciprocidade, mas no respeito e no medo. No terceiro jogo, até mesmo a cooperação desaparece...

Depois de mostrar como a “sociedade” em consideração passa do estado de natureza para a civilização, desta para o estado de barbárie e daí retorna ao estado de natureza hobbesiano, é possível enunciar algumas afirmações que contradizem as de Axelrod:

- a) cooperação pode surgir num mundo em que a defecção predomina; entretanto, ela também pode desaparecer num mundo em que existe a cooperação;
- b) a estratégia “*tit-for-tat*” pode prosperar num mundo em que há outras estratégias competindo; entretanto, também é verdade que pode não prosperar, dependendo das estratégias com que compete;
- c) sob o pressuposto do agir egoísta, a cooperação nem sempre está protegida da invasão de outras estratégias menos cooperativas.

Em conseqüência, não é possível garantir que a cooperação possa emergir espontaneamente num mundo de agentes egoístas sem autoridade exterior, havendo, pois, “*reduzida esperança para uma justificação pragmática da moralidade.*” (DANIELSON, 1998, p. 7) Como a sociedade humana requer intrinsecamente a cooperação - provar a sua possibilidade é, pois, insuficiente -, há que existir outro fundamento para a reciprocidade e, enfim, para a moralidade em geral. Os economistas precisam, pois, voltar-se para a tradição filosófica, prestando atenção pelo menos em Aristóteles, Hume e Kant,⁸ se querem sair de seu sono dogmático na compreensão da própria esfera econômica como esfera das interações estratégicas por excelência. A suposta prioridade lógica do agir egoísta em relação ao agir moral, da não cooperação em relação à cooperação (o que, aliás, Axelrod não afirma, mas corrobora), não pode ser sustentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AXELROD, R. *The evolution of cooperation*. USA: Basic Books, 1984.

BINMORE, K. *Fun and games - a text on game theory*. Lexington, MA: Ann Arbor, 1992.

_____. *Game theory and the social contract - playing fair*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1995.

8 O autor do artigo ficaria com a renovação do argumento kantiano no interior da filosofia da linguagem para compreender a moralidade numa perspectiva universalista, ou seja, com Habermas. Esta opção tem profundas conseqüências para a compreensão da Economia como ciência, da teoria dos jogos e da oposição sustentada em seu interior entre jogos cooperativos e não cooperativos. A elaboração disto requer um esforço bem mais extenso do que o necessário para expor uma refutação dos argumentos de Axelrod.

- DANIELSON, P. Introduction. *In: Modeling rationality, morality, and evolution*. Oxford: Oxford University Press, 1998, p. 3-9.
- HOFSTADER, D. R. The prisoner's dilemma - computer tournaments and the evolution of cooperation. *In: Metamagical themes: questing for the essence of mind and pattern*. New York: Bentam Books, 1986, p. 715-734.
- NACHBAR, J. H., Evolutionary selection in dynamic games. *In: International Journal of Game Theory*, v. 19, p. 59-90, 1990.
- PRADO, E. F. S. Metodologia da economia: individualismo ou holismo? *In: Impulso*, n. 13, p. 29-48, 1993.
- _____. A USP e a tragédia dos comunas. *In: Jornal da USP*, ano XIV, n 460, 8/2/1999, p. 2 e *Informações FIPE*, n. 121, fevereiro de 1999, p. 23-25.
- ROUTLEDGE, B. R. Economics of the prisoner's dilemma: a background. *In: Modeling rationality, morality, and evolution*. Oxford: Oxford University Press, 1998, p. 92-118.
- SAMUELSON, L. *Evolutionary game and equilibrium selection*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1997.
- VEGA-REDONDO, F. *Evolution, games e economic behaviour*. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- WEIBULL, J. W. *Evolutionary game theory*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1997.

(Recebido em março de 1999. Aceito para publicação em junho de 1999).
e-mail: eleuter@usp.br