

# Indeterminação entrópica na economia: a exaustão dos recursos naturais\*

Mauricio Fuks\*\*

Sumário: 1. Introdução; 2. Georgescu-Roegen: a irreversibilidade entrópica na termodinâmica clássica e o fenômeno econômico; 3. Entropia, a perspectiva evolucionária e a exaustão dos recursos; 4. Conclusão.

## 1. Introdução

O paradigma hoje predominante na economia não reconhece recursos naturais como um fator de restrição ao contínuo progresso da humanidade. Solow e Tobin, para citar apenas renomados professores agraciados com o Prêmio Nobel, possuem um raciocínio que Georgescu-Roegen classifica de linear em relação aos recursos naturais. Poderíamos sintetizá-lo com afirmações, muitas vezes ambíguas, como as seguintes:

“Eu realmente desejo enfatizar que não há limite claro para o grau de substituição dos recursos exauríveis. Isso significa que não há procedimento lógico automático para, dada a finitude de recursos, obtermos finitude de produção...”<sup>1</sup>

“Utilizações menos valiosas para cada recurso seriam barradas pelos custos crescentes, ou outros materiais seriam substituídos... É claro que esse cenário hipotético ainda não se realizou perante os nossos olhos porque novas descobertas e, o que é mais importante, novas tecnologias continuam sendo desenvolvidas.”<sup>2</sup>

Em outras palavras, a humanidade sempre foi capaz de substituir os recursos que porventura se tornassem escassos e continuará tendo essa habilidade de contínua substituição de recursos. Uma outra versão desse mito, segundo Georgescu-Roegen, refere-se à apologia da eterna capacidade de inventarmos novas fontes tecnológicas capazes de “compensar” qualquer crescente escassez. No jargão próprio da nossa ciência diríamos que a elasticidade de substituição de recursos não-renováveis por capital reproduzível (i.e., gerado pelo homem) é superior à unidade. A mensagem da termodinâmica para economia é claramente oposta a essas óticas do *mainstream*.

O conceito original de entropia foi cunhado por Rudolf Clausius em 1865, e desde então sua história está repleta de controvérsias. Mas isso não altera o fato de que a natureza do fenômeno termodinâmico é facilmente compreensível por qualquer leigo. Como salienta Boulding, trata-se de uma espécie de quase-truísmo. O exemplo clássico refere-se ao trem a

\* Este artigo remete a um dos temas centrais de minha dissertação de mestrado, intitulada *Considerações preliminares sobre a introdução do conceito de entropia na ciência econômica*, apresentada em fev. de 1992 na Escola de Pós-Graduação em Economia da Fundação Getúlio Vargas (EPGE/FGV), e orientada pelo prof. Antonio Maria da Silveira.

\*\* Professor da PUC-RJ.

<sup>1</sup> Solow, Robert. What do we owe the future? *Nebraska Journal of Economics and Business*, 13 (1): 3-16, 1974.

<sup>2</sup> Solow, Robert. Resources and economic growth. *American Economist*, 22 (5): 5.

vapor, inclusive porque a história da termodinâmica está diretamente relacionada ao desenvolvimento da máquina a vapor através das memórias de Sadi Carnot. O carvão utilizado para acionar a máquina transforma-se em cinza, i.e., baixa entropia matéria-energia, *carvão* utilizável pelo homem transforma-se em alta entropia matéria-energia, *cinza* não utilizável. Temos uma transformação qualitativa de energia disponível (carvão) para energia não-disponível (cinza).

Num sentido amplo, porém substancioso, entropia é um índice da quantidade relativa de energia não-disponível numa estrutura isolada, i.e., alta entropia significa uma estrutura na qual a maior parte ou toda energia é não-disponível. O fato de o calor fluir sempre do corpo mais quente para o mais frio, e nunca no caminho contrário, foi generalizado pela Lei da Entropia. Seu enunciado, de acordo com Georgescu-Röegen, é surpreendentemente simples: a entropia do Universo (ou de uma estrutura isolada) cresce contínua e irrevogavelmente, ou seja, o Universo passa por uma contínua degradação entrópica, da estrutura ordenada (energia livre, disponível) para o caos (energia não-disponível de distribuição desordenada). Se o processo entrópico fosse revogável, a energia de um pedaço de carvão, por exemplo, poderia ser reutilizada continuamente. Isto é, temos no fenômeno entrópico uma espécie de denominador comum da escassez. Até certo ponto, uma elevação da população implica uma aceleração da velocidade de utilização dos estoques existentes. Buscaremos, agora, traçar um “painel”, ou mapa da realidade, referente ao trabalho dos dois autores mais renomados que inseriram o fenômeno entrópico na ciência econômica: Georgescu-Röegen e Kenneth E. Boulding.

Por fim, perceberá o leitor que a introdução do conceito de entropia nos conduzirá a uma visão inteiramente nova, distinta do presente paradigma. Refiro-me particularmente a questões relativas à utilização e à classificação dos recursos naturais, bem como a problemas relacionados a estes (como equidade intergeracional) que emergem de modo completamente singular. Parece-me claro que o crescente número de enigmas não resolvidos pelo atual paradigma, como as externalidades difusas (efeito estufa, chuvas ácidas, camada de ozônio), leva-nos a buscar novas “lentes” pelas quais possamos enxergar o fenômeno econômico. Perceberemos, também, que há uma nítida convergência de idéias entre os dois autores mencionados no que se refere à crucial incerteza relativa à finitude dos recursos naturais e ao delineamento de políticas a serem adotadas.

## **2. Georgescu-Röegen: a irreversibilidade entrópica na termodinâmica clássica e o fenômeno econômico**

É necessário iniciarmos nossa tarefa salientando que Georgescu-Röegen, em seu livro *The Entropy Law and the economic process*, lança uma crítica veemente à mecânica estatística. Segundo o autor, este ramo da termodinâmica, desenvolvido posteriormente à termodinâmica clássica por Boltzman, é reflexo do desespero da mente humana em apegar-se à idéia de que a realidade pode ser compreendida apenas pela noção de movimento (*locomotion*). Ou seja, a mecânica estatística seria uma tentativa de retornar ao paradigma newtoniano utilizando-se, inclusive, o conceito de probabilidade. De acordo com Boltzman, teoricamente é possível supor um arranjo de estados que reverta o processo entrópico, i.e., teoricamente, a cinza pode ser reaproveitada para mover um trem, ou um cadáver pode ressuscitar, vivendo uma segunda vida, da velhice para a juventude. Só que a probabilidade de ocorrerem tais eventos é reduzida, de modo que necessitamos observar mais cadáveres e cinzas. O conceito

de probabilidade, dessa forma introduzido, acaba por refutar a definição clássica da Lei da Entropia, pois a condição de “contínua e irrevogável degradação” dá lugar a uma (teoricamente) possível reversão do processo. É de suma importância observarmos essas críticas de Georgescu-Röegen para percebermos precisamente a perspectiva do fenômeno entrópico que o autor utiliza na sua visão de mundo e, particularmente, nas análises de problemas econômicos. Em suas pesquisas interdisciplinares, que buscam compreender o processo na sua totalidade como fundamentalmente entrópico, nosso autor utiliza a termodinâmica clássica, rejeitando as inovações de Boltzman.

O conceito de ordem-entropia não pode divorciar-se da noção intuitiva que separa o que é do que não é útil ao ser humano. Tecidos, aço, madeira, porcelana, petróleo, todos são estruturas ordenadas. A vida se mantém sugando baixa entropia do ambiente e transformando-a em alta entropia (*waste*). Mas o ser vivo, através dessa propriedade de “driblar” a degradação entrópica de sua própria estrutura, não pode impedir a degradação do sistema. Ao contrário, a existência de vida acelera esse processo. Cada ação do homem implica necessariamente aumento do déficit entrópico. O conflito econômico é conflito por baixa entropia, e a natureza do processo econômico, visto como um todo, é fundamentalmente entrópica. Consumimos baixa entropia matéria-energia para nos mantermos em *steady state*. Mesmo uma linha de produção, que poderia parecer um exemplo de reversão do processo — pois os insumos são necessariamente menos complexos que o produto final — só se mantém através de um aumento do déficit entrópico global.

A mecânica clássica acostumou-nos com o poder da ciência de prever e determinar exatamente *quando e onde* um dado evento ocorrerá. Posteriormente, o fenômeno quântico ensinou-nos a nos satisfazermos com a posição mais fraca de que as leis científicas determinam meramente a probabilidade de uma ocorrência. A Lei da Entropia é um caso singular. Não determina quando, em termos de tempo cronometrado, um sistema alcançará um dado nível entrópico, nem exatamente o que ocorrerá. Georgescu-Röegen explica essas duas características do fenômeno entrópico da seguinte forma: a primeira pode ser exemplificada pelo fato de que, através de nossas ações, optamos por uma dada taxa de aceleração do processo entrópico; já a segunda característica segue-se diretamente do fato de que a entropia é apenas um índice médio da distribuição do total de energia do sistema. *Ou seja, os princípios termodinâmicos indicam uma liberdade substancial para o caminho, ou melhor, cronograma temporal do processo entrópico.* Denominamos essa liberdade de *indeterminação entrópica*. A indeterminação entrópica e a novidade via combinação<sup>3</sup> representam precisamente nossas maiores limitações em prever fenômenos.

Mesmo levando-se em consideração as notícias positivas que nos chegam, de que as taxas de crescimento populacional na maior parte do mundo estão-se reduzindo, o problema populacional continua sendo o seguinte: quanto, qual o máximo de quantidade de vida que pode ser sustentada com a dotação natural da humanidade? Quantidade de vida pode ser entendida como somatório dos anos vividos por todos os indivíduos no presente e futuro. Ao nos indagarmos sobre tal questão, imediatamente notamos que a *diferenciação qualitativa* dos recursos da humanidade possui papel-chave na análise. Possuímos: 1) um estoque de baixa-entropia no globo terrestre e 2) um fluxo de energia solar, que lenta porém continuamente diminui de intensidade com a degradação entrópica do sol.

<sup>3</sup> Para uma explicação brilhante desse fenômeno (*novelty by combination*) ver Georgescu-Röegen, Nicholas. *The Entropy Law and the economic process*. 3 ed. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1976. p. 13, 15, 115-9, 127, 206 e 327.

Excluindo-se outras causas, como uma catástrofe nuclear em larga escala, ou epidemia incontrollável, é claro que os recursos naturais representam o fator limitativo no que concerne à extensão da vida da espécie humana. A existência da humanidade está irrevogavelmente relacionada aos instrumentos exossomáticos (i.e., equipamentos que representam extensões dos nossos corpos), conseqüentemente, à utilização de recursos naturais. *Esta é, em última instância, a mensagem de Georgescu-Roegen: a quantidade máxima de vida humana requer taxa mínima de utilização dos recursos no globo terrestre. Segundo o autor, não restam dúvidas: qualquer uso dos recursos naturais para satisfação de necessidades não-vitais implicará menor quantidade de vida no futuro.* É claro que a distinção entre necessidades vitais e não-vitais é dialética e não aritmomórfica. Não creio, entretanto, que tal discussão seja totalmente infrutífera, pois cultivar trigo, por exemplo, é certamente uma atividade vital, enquanto que o mesmo não se pode afirmar em relação à posse de inúmeros carros de luxo.

O professor *emeritus* da Universidade de Vanderbilt conclui com os oito pontos básicos do seu plano bioeconômico mínimo, certamente ilustrativo, pois não analisado contra o pano de fundo da atual lógica capitalista.<sup>4</sup> Reproduzimos a seguir algumas diretrizes:

- 1) proibirmos a construção de quaisquer instrumentos de guerra;
- 2) atingirmos um nível populacional planetário compatível com a alimentação feita exclusivamente à base de agricultura orgânica;
- 3) enquanto o uso de energia solar não se generalizar ou não conseguirmos utilizar a fusão controlada, qualquer desperdício de energia deve ser cuidadosamente evitado, submetido a controle estatal;
- 4) tornarmos ainda mais duradouros os bens duráveis.

### 3. Entropia, a perspectiva evolucionária e a exaustão dos recursos

Kenneth E. Boulding é um dos defensores da perspectiva evolucionária na análise do fenômeno econômico, utilizando necessária e especificamente o conceito de entropia. Sua visão do Universo, e da economia em particular, detecta dois processos que possuem direcionalidade no tempo, i.e., envolvem uma “flecha do tempo”: entropia e evolução. O primeiro aponta para exaustão, perda de estrutura, uniformidade, homogeneidade desestruturada onde nada mais pode ocorrer. O segundo aponta na direção oposta, para uma diferenciação através de estruturas cada vez mais complexas. Boulding resolve esse paradoxo percebendo a evolução como *segregação de entropia*, “geradora de ilhas de ordem e complexidade — desde células até organismos — à custa de maior desordem exterior”.<sup>5</sup>

Para esse pensador, o conceito de entropia é infeliz, pois representa um potencial negativo. Conseqüentemente, inverte seu sentido através de uma generalização: “Se alguma

---

<sup>4</sup> Georgescu-Roegen, Nicholas. *Energia e mitos econômicos. Edições Multiplic, 1*: 385, ago. 1981. Como salienta Thomas S. Kuhn, não cabe a um paradigma, ainda em sua forma embrionária, responder às questões relativas à ciência normal, mas sim gerar promessas de resoluções, caso viermos a aceitá-lo.

<sup>5</sup> Boulding, Kenneth E. *The meaning of the twentieth century*. New York, Harper and Row, 1964. p. 139. “O princípio da evolução parece, à primeira vista, caminhar no sentido contrário ao princípio geral de potencial decrescente. (Deixando de lado questões metafísicas fascinantes, mas perigosas.) O que percebermos no processo evolucionário, porém, pode ser descrito como a utilização de energia para segregar entropia. De modo que, embora o princípio de potencial decrescente mova o Universo como um todo para a entropia e o caos crescentes, o processo evolucionário opera criando mais ordem em alguns pontos à custa de criar menos ordem no restante. Isso é o que denomino *segregação de entropia*.”

coisa acontece é porque havia um potencial para que ocorresse e, tendo ocorrido, esse potencial foi utilizado, gasto”.<sup>6</sup>

Essa forma de descrever o fenômeno nos leva a uma lei de potencial decrescente, ao invés de entropia crescente, e denota a possibilidade de que esse potencial seja recriado. Boulding argumenta que embora isso jamais tenha sido observado, deve ter ocorrido em algum momento, “... a não ser que supuséssemos que o Universo teve início há um tempo infinito do passado, com entropia zero e potencial termodinâmico infinito, o que é uma idéia um tanto excêntrica”.<sup>7</sup> Recalcamos, conseqüentemente, numa indagação cosmológica, o que não nos surpreende, uma vez que tanto no caso de Boulding como no de Georgescu-Roegen, trata-se de pensadores de erudição multidisciplinar.

Boulding advoga a idéia de que o século XX demarca uma segunda grande transição para a raça humana. A primeira transição, da pré-civilização para a civilização — do Paleolítico para o Neolítico e da vila neolítica para a civilização humana — ocorreu há cinco (ou 10) mil anos. Pode-se considerar que essa transição tenha-se efetuado em praticamente todo o planeta.

A segunda transição é denominada por Boulding a da civilização para a pós-civilização ou, se preferirmos outro termo, para a sociedade tecnológica ou desenvolvida. O “grande dilúvio” de conhecimento e transformação tecnológica pode ter tido seu início no século VI, acelerando-se através dos séculos, sendo que ainda hoje há indícios de aceleração na taxa de transformação. Para este artigo, selecionamos apenas um dos sintomas indicados em *The meaning of the twentieth century*. Referimo-nos ao fato de que a profunda significância da atual transição pode ser vislumbrada ao analisarmos o fato de que, em termos de diversas séries estatísticas relacionadas a atividades do homem, a data que divide a história da humanidade em duas partes iguais está bem viva em nossas memórias. Particularmente no que se refere a diversas séries estatísticas sobre a quantidade extraída de alguns metais, 1910 é o ano divisório, i.e., extraiu-se tanta quantidade até o ano de 1910 quanto de 1910 até 1964 (ano de publicação do livro).

De qualquer modo, a transição em si não implica, necessariamente, edificação ética, moral. Tampouco podemos afirmar que seja inevitável. Há uma série de armadilhas: a armadilha da guerra, a armadilha da população e a *armadilha entrópica*. A maioria dos processos econômicos é altamente entrópica, difunde matéria concentrada — sendo a mineração um exemplo nítido. Uma parte considerável de nossas atividades econômicas consiste em transformar matéria concentrada e difundir-la, ou a seu produto, através do planeta. Essa difusão não pode continuar indefinidamente, e uma perspectiva pessimista possui lógica considerável. Segundo nosso autor:

“Em termos de tempo geológico toda reserva acumulada de combustíveis e de metais dissipar-se-á em pouquíssimo tempo... uma questão de séculos. É possível que o presente período seja visto como um episódio breve no qual o homem conseguiu manter uma sociedade de nível elevado sobre uma parte da Terra aos custos de um enorme crescimento populacional e de uma rápida exaustão do seu capital geológico. É possível que em mil anos — um breve período, mesmo em termos de história do homem — nossos descendentes herdarão uma Terra devastada e exaurida... O homem será, então, pressionado até uma sociedade de nível reduzido.”<sup>8</sup>

<sup>6</sup> Boulding, Kenneth E. *Ecodynamics*. Califórnia, Sage Publications, 1978. p. 10.

<sup>7</sup> Boulding, Kenneth E. *Evolutionary economics*. Califórnia, Sage Publications, 1981. p. 148.

<sup>8</sup> Boulding, Kenneth E. *The meaning of the twentieth century*, p. 150.

Felizmente, há também sinais de que uma tecnologia antientrópica, i.e., uma tecnologia que irá concentrar matéria difusa— como o processo Dow ou Haber, “está a caminho”. Em suma, Boulding sustenta que outra perspectiva é também viável. O presente período pode ser encarado como uma oportunidade única na história deste planeta, onde o capital geológico acumulado há milhões de anos pode ser gasto para produzir suficiente conhecimento, possibilitando ao homem uma sobrevivência sem exaurir o seu capital geológico.

Nesse ponto, é necessário enfatizar que Boulding, tanto no seu texto *The meaning of the twentieth century*, como, mais especificamente, em *The economics of the coming spaceship Earth*, salienta não existir uma Segunda Lei da Termodinâmica para matéria. Sendo válida apenas para energia, seria possível conceber um sistema fechado para matéria, que simplesmente circularia de uma forma para outra. Essa visão é, obviamente, contrária à de Georgescu-Roegen, que o critica em seu texto *Energia e mitos econômicos*.<sup>9</sup>

O problema, tanto no nível da matéria como no da energia, é que não sabemos o quão distante estamos de uma tecnologia estável, de ciclo fechado, capaz de operar com novos recursos energéticos, ou com recursos não-exauríveis (energia solar pode ser considerada recurso não-exaurível). Essa incerteza torna desprezível o atual dispêndio em material bélico e consumo frívolo. De forma brilhante, Boulding assinala a incerteza em que nos encontramos:

“Pode ser que o homem possua apenas uma reduzida chance de obter tal tecnologia antientrópica e que cada grama de matéria ou quantidade mínima de energia que dispêndemos de forma não direcionada para a grande transição reduza nossa probabilidade de efetua-la. É possível que a tecnologia esteja facilmente ao nosso alcance e que possamos obtê-la com sobras de matéria e combustível... Parece-me sábio (levando-se em consideração o que está em jogo) trabalharmos com as hipóteses mais pessimistas... concentrando-nos em expandir o conhecimento na direção de um sistema de nível elevado e ciclo fechado.”<sup>10</sup>

#### 4. Conclusão

Em suma, nossa breve exposição do incipiente paradigma entrópico, ou “mapa da realidade”, permite-nos afirmar que há um claro acordo entre os quadros delineados por Georgescu-Roegen e Kenneth E. Boulding, bem como entre o plano bioeconômico do primeiro e as diretrizes, anteriormente expostas, do segundo. O paradigma entrópico, ainda pouco esboçado, entra claramente em choque com a “crescentomania” advogada pela economia-padrão. Como salienta Daly:

“Meios infinitos mais fins infinitos é igual a crescimento contínuo. A economia do crescimento foi simultaneamente excessivamente materialista e não-materialista o suficiente. Ao ignorar os meios primários (i.e., baixa entropia matéria-energia) e as leis da termodinâmica, foi insuficientemente materialista. Ao ignorar a ética e o fim supremo, foi materialista demais.”<sup>11</sup>

A visão da economia que incorpora a termodinâmica certamente não é a da maximização do crescimento. Para Georgescu-Roegen a exaustão é certa, mas a velocidade na qual ela se

<sup>9</sup> Georgescu-Roegen, Nicholas. *Energia e mitos econômicos*, p. 345.

<sup>10</sup> Boulding, Kenneth E. *The meaning of the twentieth century*, p. 150.

<sup>11</sup> Daly, Herman E. *Economics, ecology, ethics: essays toward a steady-state economy*. 2 ed. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1980. p. 10.

dará é indeterminada, dependente das ações, decisões da humanidade. Para Boulding, o indeterminismo e a incerteza em que se encontra o homem são ainda mais delicados: caso não direcionemos todas as nossas forças para obter tecnologia antientrópica, podemos estar desperdiçando nossa única chance de manter uma sociedade de nível elevado.