

---

# A eMergia como indicador de valor para a análise econômica-ecológica

PAULO ANTÔNIO DE ALMEIDA SINISGALLI

Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo – EACH-USP, São Paulo, Brasil  
e-mai: psinisgalli@uol.com.br

## RESUMO

Este artigo aborda a temática da valoração ambiental sob o ponto de vista da Economia Ecológica ou, mais especificamente, de uma de suas linhas teóricas – a Ecologia de Sistemas ou Análise eMergética. Entende-se que a valoração ambiental é um pressuposto básico para a discussão sobre sustentabilidade. O artigo traz uma análise histórica da Ecologia de Sistemas, mostrando o papel da energia na evolução do conceito de eMergia e como este pode ser considerado um indicador de valor. São apresentadas algumas críticas ao conceito, mas reforça-se, ao final, a importância deste indicador para a valoração ambiental dentro dos conceitos da Economia Ecológica.

## ABSTRACT

*This article discusses environmental valuation according to Systems Ecology, considered as a branch of Ecological Economics. Systems Ecology uses matter and energy fluxes to determine environmental values. Environmental valuation is considered here as one important element for the discussion about sustainability. This article analyses Systems Ecology through a historical perspective, showing the role of the energy in the concept of eMergy as a value indicator. We also discuss some criticisms concerning this concept, but show its importance for environmental valuation within Ecological Economics.*

## INTRODUÇÃO

Apesar da grande influência nos meios acadêmicos na segunda metade do século XIX, a linha energética de pesquisa – ligada ao estudo do meio – retomou sua importância apenas na década de sessenta e, principalmente, após 1973 com a influência da crise energética mundial, advinda do aumento no preço do petróleo, restringindo a disponibilidade deste recurso fundamental para a sociedade atual.

Segundo Martinez-Alier (1994), as descobertas da ciência do final do século XIX, tais como as leis da termodinâmica – desenvolvidas para propiciar o entendimento do funcionamento da máquina a vapor – e a teoria evolucionista, proposta por Charles Darwin, contribuíram de forma definitiva para o desenvolvimento de linhas de pesquisa, tanto na física como na biologia, alicerçadas na questão energética, preocupadas tanto com a sua disponibilidade quanto com sua aplicação.

Diversos cientistas têm procurado analisar o sistema econômico com base em pressupostos físicos e biológicos, cujo expoente foi o economista romeno Nicolas Georgescu-Roegen e seu livro seminal “*The Entropy Law and the Economic Process*” (1971). De acordo com Amazonas (2001), a esta abordagem deu-se a denominação de bioeconomia, que posteriormente desembocou na Economia Ecológica.

A economia ecológica é uma vertente que procura analisar o funcionamento do sistema econômico firmada em pressupostos físicos e biológicos. Segundo a definição, “economia ecológica é uma abordagem transdisciplinar que contempla toda a gama de inter-relacionamento entre os sistemas econômico e ecológico” (Costanza, 1991). A economia ecológica procura integrar estes dois sistemas na investigação de um conceito novo, abarcando estas duas disciplinas. Segundo este mesmo autor (Costanza, 1994), esta nova visão incorpora as noções de espaço, tempo e das partes do sistema a serem estudadas, permitindo uma abrangência maior.

As relações entre o processo econômico e as leis da física, sob o ponto de vista desta última, reduzem-se à noção entre a entrada de recursos naturais que são transformados, via uso de energia, em produtos, gerando rejeitos e calor. Pode-se entender que o processo econômico tem um sentido único: da transformação de recursos naturais de baixa entropia em produtos e resíduos de alta entropia. Segundo Amazonas (2001:92), “a entropia é um conceito integrador da análise da interação entre a dinâmica ambiental e a econômica”.

De acordo com Ayres (1998, 1999, 2004), a entropia pode ser entendida de três formas distintas na sua relação temporal: (a) em um período extremamente longo, há o entendimento que a entropia representa o equilíbrio dentro de um nível mínimo de organização, ou melhor, no caos, ou mesmo, fim do calor (*heat death*); (b) em um período intermediário, representa o sentido, ou a flecha, do tempo; (c) no período de uma geração, a energia solar de baixa entropia é constante, porém os recursos naturais de baixa entropia, empregados no processo econômico industrial, sofrem depleção.

A valoração eMergética parte de princípios físicos e biológicos para o estabelecimento de uma moeda comum, capaz de ser aplicada na avaliação tanto de sistemas naturais como de sistemas construídos. Esta

metodologia de valoração ambiental alicerça-se na Ecologia de Sistemas, que pode ser considerada uma linha de pesquisa vinculada à Economia Ecológica. Através de uma conceituação própria, procura valorar os recursos naturais na forma de eMergia, buscando uma forma de integração entre a ecologia e a economia. É uma alternativa à valoração baseada em princípios da economia neoclássica. Essa abordagem possibilita o ordenamento das informações e fluxos de um sistema, através da linguagem energética e materiais, de modo a vislumbrar os elementos e suas interações e, principalmente, quantificá-los (em unidades eMergéticas).

## BREVE HISTÓRIA DO CONCEITO eMERGÉTICO

Foi em 1896, na Academia Imperial de Ciências de Viena, que Ludwig Boltzman (1844 – 1906) pronunciou que a “luta pela vida” travava-se no campo da luta pela disponibilidade energética, isto é, que o sucesso de todas as espécies, assim como a humana, poderia ser analisado em termos de aprendizado do uso das fontes energéticas. Este autor influenciou diretamente Lotka que por sua vez foi a base teórica da Ecologia de Sistemas, proposta por H.Odum. O conceito, introduzido por Boltzman, é o primeiro que procura relacionar as leis termodinâmicas com a evolução das espécies (*apud* Martinez-Alier, 1994)<sup>1</sup>.

No fim do século XIX e início do XX, Wilhelm Ostwald (1853 – 1932) postulou que todas as transformações energéticas possíveis estavam associadas à transformação máxima em um dado período de tempo (Odum, 1994). Este autor também deu inspiração a Lotka, que estabeleceu os princípios que motivaram Odum e Pinkerton (1955) a propor seus postulados. Em 1909, Ostwald (*op.cit.*) descreveu que a história da humanidade estava vinculada ao crescimento na disponibilidade de energia, conforme o princípio enunciado acima. Entretanto, este pesquisador não desenvolveu nenhuma experiência empírica sobre como as sociedades se adaptaram ao fluxo de energia disponível, e de como teria sido o processo de transformação tendo em vista a ampliação deste fluxo e, conseqüentemente, o progresso.

O princípio clássico que correlaciona energia e a teoria da evolução – proposta por Charles Darwin, com base na seleção natural – foi elaborado por Alfred Lotka

<sup>1</sup> Nesta mesma época, fim do século XIX, a idéia de que os organismos na natureza estavam interligados entre si, formando uma rede, estava presente nos meios acadêmicos, podendo ser identificada no clássico ensaio de Stephen Forbes, de 1887, denominado de “The Lake as a Microcosm”. Esta idéia foi importante para o desenvolvimento do conceito de cadeia alimentar, que possui uma íntima relação com o fluxo de energia (Odum, 1968).

(1880 - 1949). Em 1925, Lotka postulou a existência da relação direta entre as leis da termodinâmica e a evolução das espécies. Segundo este pesquisador, todo o excedente de energia disponível que fosse utilizado de forma adequada por qualquer espécie, na sua reprodução, representaria vantagens adaptativas que possibilitariam a ampliação de sua população. Entende-se aqui por excedente de energia disponível, aquela presente no sistema que não está sendo empregada por nenhum dos componentes do mesmo, ou seja, a energia que possui potencial de utilização, mas que não foi devidamente apropriada por qualquer população. Esta formulação estipulou como teoria da evolução o sucesso reprodutivo das espécies, que, por sua vez, é baseada na lei de energia máxima ou fluxo máximo de energia em sistemas biológicos (*apud* Martinez-Alier, 1994; Odum, 1988a).

A teoria de H.T. Odum e Pinkerton, de 1955, postulava que a baixa eficiência da natureza em transferir energia é uma consequência da tendência à maximização da potência de saída do sistema, ao invés da eficiência máxima da utilização da energia em si. Segundo estes autores (*op.cit.*), o Princípio da Máxima Potência é distinto da máxima eficiência do sistema, que é um conceito econômico. Esse princípio fundamenta-se na observação dos sistemas naturais, onde aqueles que persistem são organizados de maneira a garantir o maior retorno da energia para si, aplicando essa energia na retroalimentação e, conseqüentemente, reintroduzir mais energia, reforçando o processo (*apud* Odum, 1968; Odum, 1994).

A lei de energia máxima, ou fluxo máximo de energia em sistemas biológicos, estabelecida por Lotka (*op.cit.*), foi extremamente útil nas formulações gerais de auto-organização dos sistemas (Odum, 1994). Esta lei também forneceu elementos para o desenvolvimento de outros postulados, ampliando o conceito inicial, como aquele proposto por Margalef, em 1963, da maximização de biomassa, ou mesmo, da taxa reprodutiva proposta por Wilson em 1968; do fluxo mínimo de energia direcionado pela menor taxa de geração de entropia de Ilia Prigogine, em 1946 e 1947; ou de outros princípios associados como máxima entropia estrutural, máximo retorno, eficiência máxima e estabilidade máxima. (*apud* Odum, 1994).

H.T. Odum e E.P. Odum demonstraram que as regras gerais mais importantes dos ecossistemas poderiam ser deduzidas através das medidas do metabolismo de uma comunidade, sem a necessidade de informações detalhadas sobre todos os componentes de sua população. Estes pesquisadores também foram os responsáveis pela introdução do diagrama de fluxo de energia, derivado da física e engenharia, o qual aprimorou-se ao longo dos anos (Odum, 1968).

Como descrito anteriormente, H.T. Odum e Pinkerton, em 1955, foram uns dos primeiros a descrever que a sucessão ecológica envolvia mudanças fundamentais nos padrões de fluxo de energia. Segundo estes pesquisadores, quando um ecossistema tende para uma situação Clímax<sup>2</sup> (maturidade), a razão entre produtividade e respiração aproxima-se de um (1), e a relação entre biomassa e produtividade, que pode ser associada com a respiração, cresce. Este fato demonstraria, segundo estes autores, que o ecossistema otimiza sua estrutura, tanto mais quanto o fluxo de energia disponível, em contrapartida à idéia de o ecossistema maximizar a eficiência na produção (Odum, 1968). Estes conceitos serviram de subsídio para a generalização posterior nas análises dos ecossistemas, uma vez que mostravam haver um evidente padrão de comportamento dos mesmos, alicerçado principalmente no fluxo de energia.

## ECOLOGIA DE SISTEMAS

A metodologia denominada Ecologia de Sistemas pode ser considerada uma linha de pesquisa vinculada à Economia Ecológica que, através de uma conceituação própria, procura valorar os recursos naturais, buscando uma forma de integração entre a ecologia e a economia. É uma alternativa à valoração baseada em princípios da economia neoclássica.

Segundo Rohde (1995), a ecologia de sistemas, ou ecologia energética está fundamentada em conceitos cibernéticos<sup>3</sup> e sistêmicos, que tem como base a “quantidade de energia multiplicada por uma transformada que se relaciona com a quantidade de energia em questão”. Esta metodologia sistêmica, inicialmente era

<sup>2</sup> Ponto definido onde a comunidade se encontra estável numa etapa do desenvolvimento (sere), em equilíbrio dentro de si mesma e com o ambiente físico (Odum, 1988a).

<sup>3</sup> Os ecossistemas, além dos fluxos de energia e de materiais, possuem redes de informações, relacionados aos fluxos de comunicação físicos e químicos, que integram todas as partes e governam e regulam o sistema como um todo. Com base nesta observação, os ecossistemas podem ser considerados cibernéticos, possuindo as características necessárias para esta definição: rede de informação, retroalimentação, regulação e estabilidade (Odum, 1988a e Patten & Odum, 1981).

empregada em estudos de ecossistemas naturais e, posteriormente, passaram a incorporar as atividades humanas e suas conseqüências sobre o meio. Segundo este mesmo autor, esta abordagem “oferece subsídios revolucionários no sentido de uma correta avaliação dos valores atribuídos a processos e recursos naturais” (*op. cit.*:45).

A Ecologia de Sistemas surgiu da aplicação da Teoria de Sistemas na Ecologia. Esta linha de pesquisa estuda os ecossistemas de forma global e integrada, definindo, através de símbolos, os componentes e fluxos mais relevantes para analisar o comportamento do sistema como um todo (H.T. Odum, 1994).

Segundo E. Odum (1968), a energia é o fator limitante mais relevante para um ecossistema. O conceito de fluxo de energia proporciona não somente uma avaliação relativa de cada componente dentro do sistema, mas também meios para comparar diversos ecossistemas.

Os fluxos de materiais e de energia são quantificados e avaliados através de conceitos como eMergia e Transformidade que objetivam mensurar, respectivamente, a energia necessária para gerar um fluxo ou armazenamento energético, e para a produção de outro tipo de energia. Ainda, podem-se aplicar indicadores específicos para avaliar a relação entre a energia que entra e sai de um sistema definido, permitindo observar o grau de pressão que uma determinada atividade pode exercer sobre o meio ambiente, ou mesmo avaliar o custo-benefício em termos eMergéticos. De forma simplificada, esta metodologia procura obter a história energética de cada elemento que entra na composição do produto, traduzindo os diversos componentes como materiais e energia em uma mesma linguagem, possibilitando sua comparação e integração.

## VALOR EMERGÉTICO

O desenho de um ecossistema típico representa uma rede de fluxo de energia e de processos de transformação, ao longo do qual a energia é degradada e dispersa, gerando menor quantidade de energia de alta qualidade. Este diagrama de processo – relacionado com o nível hierárquico do sistema – mostra que grandes fluxos de energia de baixa qualidade são convertidos e transformados em pequenos volumes de tipos de energia de alta qualidade.

Estas idéias vão ao encontro dos pressupostos de Georgescu-Roegen e Herman Daly, que, dentro do processo econômico, existe uma cadeia hierárquica definida pelo aumento crescente de entropia, através dos

resíduos e calor, acrescido da qualidade da energia nos produtos gerados. Pode-se pensar como memória energética, ou energia incorporada ou *embodied energy*, a energia necessária para a produção de um bem de consumo, que H.T.Odum denominou de eMergia. Esta memória energética, sob o aspecto econômico, corresponde a toda e qualquer forma de energia transformada para gerar um bem ou serviço (ou seja, toda a energia que entra na cadeia produtiva de um determinado produto). Neste sentido, a energia incorporada ou memória energética, ou melhor, eMergia corresponde a uma medida de valor, mais precisamente a uma medida de **valor-energia** (Amazonas, 2001).

O conceito de eMergia passou por uma evolução, procurando a melhor forma de quantificar e definir a energia dentro dos sistemas. Entre os anos de 1967 e 1971, os tipos de energia de alta qualidade eram expressos em unidades de matéria orgânica (base seca) incluindo madeira, carvão, gás natural e biomassa. No período de 1973 e 1980, as quantidades energéticas de plantas, madeiras e combustíveis fósseis foram diferenciadas. Os cálculos e comparações eram feitos com base em combustíveis fósseis, como o carvão. Entre os anos de 1980 e 1982, estudos reconheceram a contribuição dos fenômenos atmosféricos, como a chuva, o vento e as ondas como expressões da energia solar para a produtividade terrestre. A partir de 1983, há o reconhecimento que a eMergia Solar representa uma base adequada para a representação dos processos globais de transformação. Antes de 1983, eMergia era denominada de “energia incorporada” e Transformidade em “razão de transformação energética” ou “fator de qualidade” (Odum, 1996).

Para se fazer uma análise eMergética integrada, era necessário que os diversos tipos de energia fossem colocados em mesma base, e concomitantemente, deveria ser pensado como transformar os diferentes recursos materiais na forma de eMergia. Os conceitos de eMergia e o da Transformidade permitiram não somente transformar os diversos tipos de energia, tendo como pressuposto a qualidade energética, em uma única expressão, mas também transformar os recursos materiais empregados em termos de energia equivalente necessária para a sua formação. Observa-se que através destes dois conceitos pode-se fazer a correspondência entre os diferentes tipos de energia e matéria (transformidade) em um outro tipo de energia, ou melhor, eMergia.

Segundo Odum (1996, p.7) “*Emergy is the available energy of one kind of previously user up directly and indirectly to make service or product*”, ou seja, é a energia necessária na transformação para gerar um fluxo ou armazenar

mento. Esta eMergia está diretamente associada à fonte primária de energia que é o sol, sendo denominada de eMergia Solar.

Existe uma relação de proporcionalidade entre energia e eMergia, ou seja, quando o armazenamento energético é constante, o mesmo ocorre com a quantidade de eMergia, e quando há um declínio esta relação direta se mantém, com a devida proporcionalidade (Odum, 1996).

A Transformidade é definida como a quantidade de energia de um determinado tipo necessária para gerar a unidade de energia de outro tipo, ou seja, Transformidade é a eMergia por unidade de energia. De acordo com Odum (1996, p.10) “*Solar Transformity is the solar Energy required to make one joule of a service or product* “. Segundo este mesmo autor (*op.cit.*), a Transformidade é maior quanto mais energia de transformação é requerida para gerar o produto.

Estes dois conceitos – Energia e Transformidade – representam a adequação necessária da qualidade de energia que flui em um sistema, possibilitando a integração dos diversos componentes em uma base comum (Odum, 1988b). É importante destacar que, dentro de um processo de transformação, a energia decresce e eMergia aumenta (Odum, 1996).

Dentro do processo de transformação energética, é necessária uma grande quantidade de energia de baixa qualidade (solar) para gerar energia de alta qualidade, como, por exemplo, combustível fóssil. Portanto, para comparar diferentes formas de energia e matéria são necessários cálculos de transformação, que convertem estes elementos em uma “moeda comum”. Esta moeda foi definida com base na fonte primária de energia, que é a luz solar, e denominada como Joules de Energia Solar (em inglês, Solar Energy).

## CRÍTICAS AO VALOR eMERGÉTICO

As críticas sobre a valoração eMergética vêm, principalmente, da assunção que a energia é a base de todo o funcionamento do sistema, sendo também o seu denominador comum, enquanto o papel da matéria é secundário. Para a ecologia de sistemas, a energia entra e sai do sistema, conservativamente, de acordo com as leis da termodinâmica, sendo a matéria mantida em circuito fechado dentro do sistema, ou seja, dá à energia o papel fundamental, como em ecossistemas naturais, onde a matéria é passível de reciclagem indefinidamente. Entretanto, nos sistemas econômicos, a matéria exerce um papel fundamental como fonte de recursos e

despejos, isto é, ela também representa um fluxo (Amazonas, 2001).

Georgescu-Roegen critica o dogma energético da ecologia de sistemas, pois entende que o fator limitante não é a energia, mas sim a impossibilidade da reciclagem contínua de matéria, pois todo o processo de transformação é um processo entrópico, que, no limite, acaba gerando resíduo em um espaço finito, como a terra.

Outro ponto levantado contra o modelo eMergético recai sobre a incerteza das medidas de transformação dos diversos recursos e serviços ambientais na forma de eMergia, pois não se conhece todos os processos envolvidos desde a formação inicial dos materiais, sendo questionável a memória energética de cada elemento. Em outras palavras, a Transformidade de cada material, teoricamente, deveria apresentar uma grande variabilidade, pois está intrinsecamente ligada à cadeia de eventos para a sua formação. Entretanto, este fato não é observado nas tabelas expressas de transformidade.

A crítica mais relevante vem também do caráter circular dos conceitos de eMergia e Transformidade. A eMergia de um determinado produto ou serviço é obtida a partir da transformação, e soma, de todos os elementos presentes na sua formação, ou seja, toda a memória de matéria e energia aplicada na sua formação é transformada em um única “moeda”, definida como Solar emJoule. A transformidade deste produto ou serviço, por sua vez, é obtida através da relação da eMergia Total, que foi empregada no processo, dividida pela energia gerada no processo (Brown & Ulgiati, 2004). No extremo, para cada elemento, a transformidade é obtida pela eMergia, que depende da transformidade deste mesmo elemento.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A corrente com viés energeticista dentro da Economia Ecológica, como menciona Amazonas (2001), que, partindo do conhecimento do funcionamento dos ecossistemas naturais, extrapolou a noção para a economia, que prima pela função preponderante da energia na organização destes dois sistemas, define o valor dos recursos e serviços ambientais com critérios objetivos, determinados por leis físicas, sem as mazelas subjetivas das preferências individuais da Economia Ambiental.

Esta vertente prega o princípio da máxima potência que está baseado no sentido do melhor aproveita-

mento da energia disponível para a estruturação do ecossistema, que é bastante distinto da eficiência econômica, e tem, por denominador comum, a energia. Em outras palavras, para a Ecologia de Sistemas, ou análise eMergética, que alguns autores consideram uma vertente da Economia-Ecológica, o valor energia é transformado em valor eMergia, incorporando a qualidade da energia ao longo do processo hierárquico de transformação para a geração de um produto, sendo um indicador de valor mais apropriado para o estudo das relações ecossistêmicas e econômicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amazonas, M.C. 2001. Valor e meio ambiente. Elementos para uma abordagem evolucionista. Tese doutorado. Instituto de Economia – IE/UNICAMP.
- Ayres, R.U. 1998. The price-value paradox. *Ecological Economics* 25: 17-19.
- Ayres, R.U. 1999. The second law, the fourth law, recycling and limits to growth. *Ecological Economics* 29: 473-483.
- Ayres, R.U. 2004. On the life cycle metaphor: where ecology and economics diverge. *Ecological Economics* 48: 425-438.
- Brown, M.T. & S. Ulgiati. 2004. Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling* 178: 201-213.
- Costanza, R. 1991. *Ecological Economics - The science and management of sustainability*. Columbia University Press, New York.
- Costanza, R. 1994. Economia ecológica: uma agenda de pesquisa. In: P. H. May & R. Serôa da Motta (eds.). *Valorando a natureza - análise econômica para o desenvolvimento sustentável*. pp. 111-144. Editora Campus. Rio de Janeiro.
- Georgescu-Roegen, N. 1971. *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press, Cambridge, EUA.
- Martinez-Alier, J. 1994. *Ecological economics: energy, environment and society*. Blackwell Publishers, Oxford, Reino Unido.
- Odum, E.P. 1968. Energy flow in ecosystems: a historical review. *American Zoologist* 8: 11-18.
- Odum, H.T. & R.C. Pinkerton. 1955. Time's speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems. *American Scientist* 43: 331 - 343.
- Odum, H.T. 1988a. Energy, environment and public policy. A guide to the analysis of systems, UNEP: 109. UNEP Regional Seas Reports and Studies n° 95.
- Odum, H.T. 1988b. Self-organization, transformity and information. *Science* 242: 1132-1139.
- Odum, H.T. 1994. *Ecological and general systems: an introduction to systems ecology*. University Press of Colorado, Colorado, EUA.
- Odum, H.T. 1996. *Environmental accounting: emergy and environmental decision making*. John Wiley & Sons, Inc.
- Patten, B.C. & E.P. Odum. 1981. The cybernetic nature of ecosystems. *The American Naturalist* 118: 886-895.
- Rohde, G. M. 1995. Mudanças de paradigma e desenvolvimento sustentado. In: C. Cavalcanti (ed.). *Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável*. pp. 41-53. Cortez Editora, São Paulo.