

**Em busca do Graal do indicador ambiental sintético único:
contribuições da Termodinâmica e da Teoria da Informação**

Paulo Mantey Domingues Caetano

engenheiro civil (Poli-USP, 1988), mestre em engenharia civil (Poli-USP, 1999), aperfeiçoado em Proteção Ambiental Urbano-Industrial (*Fortbildungsprogramm Städtisch-Industrieller Umweltschutz*) (Technische Universität Berlin / Carl Duisberg Gesellschaft, 1997), MBA Administração para Engenheiros (Instituto Mauá de Tecnologia, 1999), MBA Gestão Estratégica em Meio Ambiente (Instituto Mauá de Tecnologia, 2009); trabalha no Departamento de Planejamento Ambiental da Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente da Prefeitura do Município de São Paulo

paulo.mantey@gmail.com

Resumo: A construção de qualquer indicador, especialmente os ambientais sintéticos, envolve um compromisso entre a complexidade da realidade a ser descrita e a necessária simplicidade na sua concepção. Além disso, os indicadores embutem valores relacionados ao estado da realidade que se pretende alcançar. Apresentam-se aqui contribuições da

Termodinâmica e da Teoria da Informação ao desafio. Para tanto, conceituam-se entropia e exergia de forma a descrever e avaliar três indicadores sintéticos, um relacionado a entropia informacional (Zhang, Yang e Li), outro, que relaciona poluição a alta exergia (Huang et al.), e o último, que usa o conceito de exergia informacional (Jørgensen).

Palavras-chave: entropia, exergia, indicadores sintéticos.

Resumen: La construcción de indicadores, en especial los ambientales sintéticos, implica un compromiso entre la complejidad de la realidad y la necesidad de simplicidad en su diseño. Además, los indicadores expresan valores relacionados con el estado de la realidad por alcanzar. Se presentan aquí contribuciones de la Termodinámica e de la Teoría de la Información para este desafío. Se conceptualizan entropía y exergía con el fin de describir y evaluar tres indicadores sintéticos, uno relacionado con la entropía informacional (Zhang, Yang y Li), otro, que relaciona contaminación a alta exergía, y el último, que utiliza el concepto de exergía informacional (Jørgensen).

Palabras-clave: entropía, exergía, indicadores sintéticos.

Abstract: The design of any indicator, specially the synthetic and

environmental ones, involves a compromise between the complexity of the reality to be described and the need for simplicity in its design. In addition, indicators embody values related to the desired state of the reality. Contributions from Thermodynamics and Information Theory to this challenge, especially the entropy and the exergy, are here presented, in order to describe and evaluate three synthetic indicators, one related to informational entropy (Zhang, Yang e Li), other relating pollution to high exergy (Huang et al.), and the last one using the concept of informational exergy (Jørgensen).

Keywords: entropy, exergy, synthetic indicators.

Introdução

A questão dos indicadores pode ser tratada em dois níveis de volição: desejo de descrever a realidade e desejo de alterá-la. Assim, há no esforço de construir e atualizar indicadores duas intenções: a) descrever; b) constatar até que ponto o descrito se submeteu aos desígnios do responsável pelos indicadores. Ou seja, há uma questão epistemológica e uma questão ética. Ou ainda, usando o jargão filosófico do final do século XVIII, uma questão no âmbito da razão pura e outra questão no âmbito da razão

prática.

No tocante à *razão pura*, atribui-se ao indicador uma tarefa ingrata: ele tem que descrever uma realidade, complexa como todas as realidades, e ao mesmo tempo ser simples, de fácil manuseio e de fácil entendimento. Ele encerra, então, um conflito entre a simplicidade e a complexidade. Situa-se em uma superfície de *trade-off*, sendo a proposição de qualquer indicador uma solução de compromisso (um quadro com dificuldades relacionadas a indicadores é apresentado por MALHEIROS e PHILIPPI JR., 2007).

Tarefa impossível a de propor indicadores considerados satisfatórios? Talvez não, porque muito do avanço da ciência e da técnica deveu-se à capacidade de enxergar a simplicidade na complexidade. Na ciência, em grande parte correspondeu a identificar leis para a simplicidade (análise) e recompô-las para descrever a complexidade (síntese); trata-se de um método extremamente frutuoso nas ciências ditas físicas, e que ainda é considerado um paradigma. Na técnica, em grande parte correspondeu à tentativa de aplicar o ainda freqüentemente insatisfatório arsenal disponível de conhecimento científico

descritivo na tentativa de intervir na realidade.

Tarefa difícil? Sim, bastante. E que se torna mais difícil ainda diante da tarefa de tentar estabelecer indicadores sintéticos, de preferência “únicos”.

Uma maneira satisfatória de delinear um indicador sintético a partir de diversos indicadores corresponde ao método da análise fatorial. Por meio dele, visa-se criar uma função que relacione diversas variáveis e que tenha um igual poder de explicação, evidentemente dentro de um determinado nível de significância considerado adequado. Ela, no entanto, encerra dois problemas: a) nem sempre é possível encontrar tal função; b) se encontrada, os seus parâmetros teriam que ser robustos o suficiente para, no caso de se incorporar novos valores das variáveis, manterem-se dentro de um intervalo de variação pequeno. Evidentemente, nem sempre essas duas condições são satisfeitas e, se satisfeitas, dificilmente o são simultaneamente.

No tocante à *razão prática*, tem-se que qualquer desejo e tentativa de intervir na realidade fazem-se embasados por valores. Ora, valores são conceitos metafísicos, e não podem, em princípio (pelo menos do ponto de vista do positivismo lógico), ser objeto da

ciência. Um exemplo do fracasso de tornar valores objetos de conhecimento científico é muito bem descrito por Myrdal (1962). Quanto à técnica, ela não é capaz de justificar valores, exógenos a ela, mas tem necessariamente que incluí-los em suas avaliações e decisões.

O objetivo do presente é discutir algumas contribuições da Termodinâmica e da Teoria da Informação no tocante à construção de indicadores sintéticos ambientais.

Entropia

A entropia presta-se aos mais diversos usos, conceituações e aplicações. No âmbito da *Termodinâmica Clássica*, ela se relaciona à irreversibilidade, sendo descrita através da desigualdade de Clausius (VAN WYLEN e SONNTAG, 1976). No âmbito da *Mecânica Estatística*, ela se relaciona à desordem (v. EISBERG e LERNER, 1982). A entropia presta-se, no âmbito da *Teoria da Informação*, à medida da quantidade média de informação por mensagem (SHANNON, 1951, YOUNG, 1971, ambos apud NOVAES, 1981). No âmbito da *modelagem urbana, regional e de transportes*, Wilson (1970) utilizou três conceituações de entropia: a) a entropia como a descrição mais

provável de um sistema; b) a entropia como uma distribuição de probabilidade no âmbito da estatística bayesiana (JAYNES, 1957, apud WILSON, 1970); c) a entropia como a melhor estimativa na ausência de informações (LINDLEY, 1965, apud WILSON, 1970). Um exemplo bastante didático da entropia aplicada à modelagem é fornecido por Pooler, 1983, apud Esmer (2005, p.77-87). A estrutura de modelos entrópicos nesse gênero de modelagem é apresentada por Wilson (1970) e por Echenique et al., 1973, apud Novaes (1981). No âmbito da *Ecologia*, Kay (1984), a partir de trabalhos de Wicken, propôs uma hipótese segundo a qual os ecossistemas se organizam de forma a maximizar a degradação do trabalho disponível, ou seja, o máximo trabalho que pode ser extraído da energia armazenada. Segundo Jørgensen (1992, p.149), essa hipótese implica que os ecossistemas sempre se auto-organizam de forma a que não só a variação de entropia do universo seja maior do que zero como também que tal variação seja maximizada. Alguns outros campos do uso da entropia são as teorias sociais, em especial a economia, as avaliações de impacto ambiental e a análise do ciclo de vida de produtos, sem falar, é claro, de suas aplicações em engenharia, em especial a mecânica e

a química.

Uma prova da fertilidade do conceito de entropia é o fato de ele se prestar como conceito articulador à demonstração da equivalência entre diversas teorias e métodos utilizados na modelagem urbana e de transportes. Assim, é notável a equivalência formal entre o modelo logit multinomial (descrito em NOVAES, 1986) e o método da maximização condicionada de entropia. Demonstra-se a equivalência entre este último e o método de maximização de utilidade condicionada por restrições orçamentárias (WILSON, 1970, p.100-5). É possível também demonstrar (v. WILSON, 1970, p.151-5) sua equivalência com o modelo de oportunidades intervenientes, desenvolvido por Stouffler e descrito, por exemplo, por Novaes (1981, p.143-64) e Bruton (1979, p.99-102). Finalmente, ele é relacionado com o modelo gravitacional (WILSON, 1970, p.19).

Indicador sintético de Zhang, Yang e Li

Zhang, Yang e Li (2006) propuseram um indicador sintético de qualidade ambiental urbana lastreado no conceito de entropia informacional.

O indicador anual de entropia informacional sugerido é:

$$\Delta S = -(1/\ell n m) \sum_{i=1,n} (q_{ij}/q_j) \ell n (q_{ij}/q_j)$$

sendo i : índice referente a um indicador de qualidade ambiental; j : índice referente a um evento de avaliação (cada ano em que o valor de um indicador é avaliado); n : número de indicadores; m : número de anos; x_{ij} : valor do indicador i no evento j ; q_{ij} : valor normalizado. Para aumentar a confiabilidade da avaliação é feita uma normalização de cada indicador, de forma a eliminar os efeitos dimensionais (cada indicador tem sua própria unidade). Esse método transforma os dados brutos de forma a gerar dados normalizados entre 0 e 1 para cada índice. Para indicadores de melhoria, o valor bruto é dividido pelo máximo valor para gerar o valor normalizado; para indicadores de piora, a menor perda é dividida pelo valor bruto para gerar o valor normalizado:

$$q_{ij} = x_{ij}/x_i^* \text{ sendo } x_i^* = \max(x_{ij})$$

$$q_{ij} = x_i^*/x_{ij} \text{ sendo } x_i^* = \max(x_{ij})$$

sendo x_{ij} o valor do indicador i para o evento j , e q_{ij} o valor normalizado, calculado a partir dos dados brutos

$$q_j = \sum_{i=1,n} q_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n; j= 1, 2, \dots, m)^1$$

O peso de cada indicador é determinado usando um indicador

1 Provavelmente há um erro no trabalho original, que apresenta $q_{ij} = \sum_{i=1,n} 1_{ij}$.

baseado em entropia da informação:

$$Q_i = (1 - E_i)/(n - e_e) \quad (\sum_{i=1,n} Q_i = 1, 0 \leq Q_i \leq 1)$$

sendo:

$$E_i = -(1/\ln m) \sum_{j=1,m} (q_{ij}/q_i) \ln (q_{ij}/q_i)$$

sendo:

$$q_i = \sum_{j=1,m} q_{ij}$$

$$e_e = -\sum_{i=1,n} \sum_{j=1,m} (q_{ij}/q_i) \ln (q_{ij}/q_i) \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$$

Na opinião de Filchakova, Robinson e Scartezzini (2007), esse indicador é calculável, mas não sucinto nem diagnosticamente útil.

Exergia

A exergia é definida como “o máximo trabalho teórico útil obtido quando um sistema S é trazido ao equilíbrio termodinâmico com o ambiente por meio de processos nos quais S interage somente com seu ambiente” (SCIUBBA e WALL, 2007). Um sinônimo de exergia é a disponibilidade. O conceito de disponibilidade encontra-se formalizado com rigor, por exemplo, em Van Wyllen e Sonntag (1976, p.198-219). De Wulf et al. (2008a e 2008b) apresentam uma síntese do conceito. Importante assinalar que a exergia química está estreitamente relacionada à energia livre de Gibbs.

Dois exemplos de aplicação do conceito de exergia em planejamento regional podem ser encontrados em Leduc e Van Kann (2010) e Van Kann e De Roo (2009).

Filchakova, Robinson e Scartezzini (2007) e Phdungsilp (2007) são um pouco pessimistas em relação à avaliação de sistemas urbanos através do conceito de exergia. Mesmo assim, Balocco et al. (2004) utilizaram o método denominado *Extended Exergy Accounting* (EEA) para avaliar a sustentabilidade de uma área urbana através do estudo do ciclo de vida de edificações. Para tanto, foram definidos dois índices termodinâmicos, η_I e η_{II} , que mostram a eficiência das edificações em relação à primeira e à segunda leis da Termodinâmica. Essa metodologia proporcionou um critério ambiental de ordem termodinâmica para a seleção de alternativas, estratégias e projetos tecnológicos que produzam impactos ambientais menores correlacionados aos maiores índices η_{II} de exergia.

Indicador sintético de Huang et al.

Huang et al. (2007) oferecem um interessante exemplo de uso do conceito de exergia para a definição de um indicador sintético de poluição da água. Eles asseveram que qualquer indicador

sintético proposto seria arbitrário e não descreveria de forma adequada o nível de poluição do corpo d'água. Por outro lado, eles observam que, no caso de emissões, a exergia poderia ser considerada como o potencial de dano ao meio ambiente por conduzir a reações indesejáveis e incontroláveis com componentes do meio ambiente. Assim, a exergia incorporada nas emissões é uma medida efetiva do potencial de impacto no meio ambiente. Quanto mais exergia uma emissão carrega, mais ela se desvia do meio ambiente. Uma emissão de substâncias que são comuns no meio ambiente, como, por exemplo, vapor ou água, carrega menos exergia que emissões de substâncias que são menos comuns, como, por exemplo, metais pesados e lixo radioativo. Dessa forma, a quantidade de exergia contida na emissão constituiria em um excelente indicador sintético.

Exergia no âmbito da Ecologia

Jørgensen postulou uma lei para ecossistemas: “Se um sistema tiver um fluxo de exergia por suas fronteiras, ele procurará utilizar tal fluxo de forma a aumentar sua exergia, isto é, mover-se para uma posição distante do equilíbrio termodinâmico; se mais combinações e processos forem oferecidos para utilizar o fluxo de

exergia, a organização que for capaz de dar ao sistema a mais alta exergia, sob as condições e perturbações prevalecentes, será a selecionada” (JØRGENSEN, 1992, p. 186). O que essa lei informa é que os ecossistemas se mantêm fora do equilíbrio termodinâmico com o meio, com um alto grau de organização e de informação em relação a esse meio, e que o fazem de tal forma que sua exergia seja máxima.

Bendoricchio e Jørgensen, 1997, apud Dewulf et al. (2008) propuseram calcular o conteúdo de exergia de um componente de ecossistema como a probabilidade de produzir o componente considerado em equilíbrio termodinâmico. Para os componentes biológicos de um ecossistema, ela consiste na probabilidade de produzir a matéria orgânica (termo da exergia clássica) e a probabilidade P de encontrar o código genético, isto é, a seqüência correta de nucleotídeos do DNA (termo da exergia informacional), sendo obtida uma expressão relacionando ambos os termos. De Wit (2005) fornece uma síntese do caminho para chegar a essa expressão. Svirezhev (2000) observou uma analogia entre essa expressão e a medida de Kullback; tal medida, situada no âmbito da Teoria da Informação, corresponde à medida da informação

adicional a uma distribuição previamente conhecida; Esmer (2005) mostra aplicações da medida de Kullback na modelagem urbana e de transportes. Jørgensen et al. (2005) aprimoraram os cálculos do conteúdo exergético de seres vivos, apresentando tabelas com os resultados. Jørgensen (1992) relata resultados promissores para a modelagem de ecossistemas utilizando essa lei. Sciubba e Wall (2004) e De Wit (2005) apresentaram críticas a essa abordagem.

Indicador ecológico de Jørgensen

O conteúdo exergético de um ecossistema pode ser utilizado como critério para avaliar a “qualidade”, ou “saúde”, de um ecossistema. Um exemplo pode ser encontrado em Jørgensen (2000). Constanza, 1992, apud Jørgensen (2000) sumariza a definição de saúde ecossistêmica: a) homeostase; b) ausência de doença; c) diversidade ou complexidade; d) estabilidade ou resiliência; e) vigor para o crescimento; f) equilíbrio entre componentes do sistema. Kay, 1991, apud Jørgensen (2000) usa a expressão “integridade ecossistêmica” para se referir à habilidade de um ecossistema em manter sua organização, devendo as medidas dessa integridade refletir os dois aspectos do estado organizacional de um ecossistema: funcional e estrutural. A função

refere-se às interconexões entre os componentes do sistema. Jørgensen (2000) propõe que ela possa ser medida através da quantidade de exergia. A estrutura indica o caminho pelo qual a energia se move no sistema. Jørgensen (2000) propõe que a exergia armazenada no ecossistema poderia ser um indicador razoável da estrutura.

Jørgensen (2000) avaliou a exergia e a exergia específica de doze ecossistemas costeiros, juntamente com nove outros atributos ecológicos, sendo feitas correlações entre todos esses atributos. Ele concluiu que os dois conceitos cobrem uma grande gama de importantes propriedades dos ecossistemas, mas que outros indicadores são necessários também para proporcionar uma avaliação suficientemente abrangente da saúde ecossistêmica.

Conclusões

Foram aqui descritos três indicadores sintéticos: o de Zhang, Yang e Li, o de Huang et al. e o de Jørgensen.

Aos três seria possível opor objeções. Assim, ao primeiro poder-se-ia dizer que ele não é simples nem diagnosticamente útil. Ao segundo, que sua validade depende da justificativa segundo a qual a poluição corresponde a estados de alta exergia. Ao terceiro,

finalmente, que existem restrições teóricas ao conceito de exergia informacional.

Porém, ao autor parece que as críticas ao primeiro indicador são excessivamente severas: a complexidade é relativa, e ele pode vir a se mostrar bastante útil. Quanto ao segundo, a hipótese de alta exergia dos poluentes é engenhosa e instigante, valendo a pena, talvez, investir nela. Quanto ao terceiro, ainda que as objeções teóricas sejam válidas, a exergia informacional constitui-se em uma maneira das mais interessantes de avaliar a distância em relação ao equilíbrio com meio.

Além disso, quer parecer ao autor que tais indicadores se sustentam muito mais do que outros indicadores sintéticos usuais. De fato, dentro do *trade-off* apontado na introdução, parece que eles se constituem em uma excelente solução de compromisso, dado que possuem uma consistência teórica maior. A par de serem, em grande parte, neutros em relação a valores.

Referências

BALOCCO, C. et al. Using exergy to analyse the sustainability of an urban area. **Ecological economics**, n.48, p.231-44, 2004.

BRUTON, M.J. **Introdução ao planejamento dos transportes.**

Rio de Janeiro: Interciência; São Paulo: Edusp, 1979.

DE WIT, R. Do all ecosystems maximize their distance with respect to thermodynamic equilibrium? A comment on the “Ecological Law of Thermodynamics” (ELT) proposed by Sven Erik Jørgensen. **Scientia Marina**, v.69, n.3, p.427-34, 2005.

DEWULF, J. et al. Exergy: Its potential and limitations in environmental science and technology. **Environmental Science Techn.** Vol. 42, n.7, p. 2221-32, Febr., 2008.

_____. **Illustration of the confusion on the informational exergy concept and on the difference between informational storage and information entropy**, 2008b. Disponível em; <pubs.acs.org>.

EISBERG, R.M.; LERNER, L.S. **Física: fundamentos e aplicações: vol. 2.** São Paulo: McGraw-Hill, 1982.

ESMER, Ö. **Information theory, entropy and urban spatial structure.** 2005. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional) – The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle-East Technical University, Ankara. 2005.

JØRGENSEN, S.E. **Integration of ecosystem theories: a pattern.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. (Ecology &

Environment Volume 1)

_____. Application of exergy and specific exergy as ecological indicators of coastal areas. **Aquatic ecosystem health and management**, n.3, p.419-30, 2000.

_____ et al. Calculations of exergy for organisms. **Ecological modeling**, n.185, p.165-75, 2005.

FILCHAKOVA, N.; ROBINSON, D.; SCARTEZINI, J.-L. Quo vadis thermodynamics and the city: a critical review of applications of thermodynamics methods to urban systems.

International Journal of Ecodynamics, v.2, n.4, p.222-30, 2007.

HUANG, L.Q. et al. Exergy as a unified measure of water quality. **Nonlinear science and numerical simulation**, n.12, 663-72, 2007.

KAY, J. **Organization in living systems**. 1984. Tese (doutorado) - Department of Systems Design Engineering , University of Waterloo, Ontario. 1984. Disponível em:

<<http://www.nesh.ca/jameskay/www.fes.uwaterloo.ca/u/jjkay/pubs/thesis/toc.html>>. Acesso em: 11 abr. 2011.

LEDUC, W.R.W.A.; VAN KANN, F.M.G. **Urban harvesting as planning approach towards productive urban regions**. [Delft]:

SREX, 2010. Disponível em:

<http://www.exergieplanning.nl/publicaties/SCUPAD_2010.pdf>.

MALHEIROS, T.F.; PHILIPPI JR., A. Resultados e perspectivas do I Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n.11, p.7-15, dez. 2007.

MYRDAL, G. **Aspectos políticos da teoria econômica**. Rio de Janeiro: Zahar, 1962.

NOVAES, A.G. **Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

PHDUNGSILP, A. A thermodynamic framework for urban energetic metabolism. CONFERENCE ON ENERGY NETWORK OF THAILAND, 3., 2007, [Bangkok].

_____. **Sistemas de transportes: vol. 1: análise da demanda**. São Paulo: Edgard Blücher, 1986.

SCIUBBA, E.; WALL, G. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. **International Journal of Thermodynamics**, v.10, n.1, p.1-26, March 2007.

SVIREZHEV, Y.M. Thermodynamics and ecology. **Ecological modeling**, n.132, p.11-22, 2000.

VAN KANN, F.M.G.; DE ROO, G. Scaling of multi-functional structures as a spatial argument for low exergy planning.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART AND SUSTAINABLE BUILT ENVIRONMENTS, 3., 2009, S.1.

Disponível em:

<<http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB14198.pdf>>.

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.

WILSON, A.G. **Entropy in urban and regional modeling**.

London: Pion, 1970.

ZHANG, Y.; YANG, Z.; LI, W. Analyses of urban ecosystem based on information entropy. **Ecological modeling**, n.197, p.1-12, 2006.