

# Em busca do Graal do indicador ambiental sintético único: Contribuições da Termodinâmica e da Teoria da Informação

Paulo Mantey Domingues Gaetano\*



Resumo
Introdução
Teoria
Indicadores Ambientais Sintéticos
Conclusões
Referências

**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 y 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.

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 na Termodinâmica Clássica

• está relacionada à irreversibilidade

$$\int_{\text{ciclo fechado}} \partial Q/T \geq 0$$



Clausius

Fonte: <gag-system.org>

## Entropia na Mecânica Estatística

• está relacionada à desordem

$$S \equiv k \ln W$$



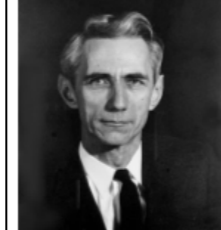
Boltzmann

Fonte: <http://www.fisica.uea.br/~net/biografia/boltzmann.htm>

## Entropia na Teoria da Informação

• está relacionada à informação

$$H = - \sum_i p_i \ln p_i$$



Shannon

Fonte: <http://mybisc.blogspot.com>

## Entropia na modelagem urbana, regional e de transportes

$$p_{ij} = \exp(-\lambda_i \cdot d_{ij}) / \sum_j \exp(-\lambda_i \cdot d_{ij})$$



Wilson

Fonte: <http://www.ucl.ac.uk>

## Entropia como a distribuição mais provável

$$W([T_{ij}]) = T! / \prod T_{ij}!$$

## Entropia de uma distribuição de probabilidade

"Ao fazer inferências com base em informação parcial, nós devemos usar aquela distribuição de probabilidade que tem a máxima entropia sujeita ao que quer que seja conhecido. Essa é a única assunção não enviesada que podemos fazer; usar qualquer outra aumentaria a assunção arbitrária de informação que, por hipótese, nós não temos" (JAYNES apud WILSON, 1970, p. 7).

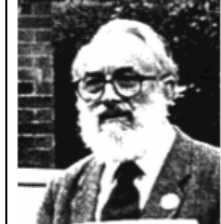


Jaynes

Fonte: <http://bayes.wustl.edu>

## Entropia e Estatística Bayesiana

$$E[\ln p(x|\theta)] = \sum p(x_i|\theta) \cdot \ln p(x_i|\theta) = \sum p_i \ln p_i$$



Lindley

Fonte: <http://www.york.ac.uk>

## Entropia na Ecologia

Segunda Lei da Termodinâmica Atualizada: "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".



Kay

Fonte: <http://www.jameskay.ca>

## Entropia como conceito unificador e articulador

Uma prova da fertilidade do conceito de entropia é o fato de ele se prestar como conceito articulador entre diversas teorias e métodos utilizados na modelagem urbana e de Transportes. É possível demonstrar a equivalência entre o método da maximização condicionada de entropia e os seguintes métodos e teorias:

• método de maximização de utilidade condicionada por restrições orçamentárias;

• método de oportunidades intervenientes;

• modelo gravitacional.

Há ainda uma notável equivalência formal com o modelo logit multinomial.

## 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.

## Exergia na Ecologia

Lei Ecológica da Termodinâmica: "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 prevalentes, será a selecionada" (JØRGENSEN, 1992, p. 186).

$$Ex = RT \sum_{i=0} C_i \ln(C_i/C_{i0})$$



JØRGENSEN

Fonte: <isim2011.org>

## Medida de Kullback da informação

$$K = \sum_{i=1}^n p_i \ln(p/p_0) \geq 0$$

## 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:

$$\Delta S = -(1/\ln m) \sum_{i=1}^n (q_i/q_j) \ln(q_i/q_j)$$

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;  $x_i$ : valor do indicador  $i$  no evento  $j$ ;  $q_i$ : 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:

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

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

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

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

O peso de cada indicador é determinado usando um indicador baseado em entropia da informação:

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

sendo:

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

sendo:

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

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

## Indicador sintético de qualidade ambiental

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 a qualidade ambiental 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.

## Referências

BALOCOCO, C. et al. Using exergy to analyse the sustainability of an urban area. Ecological economics, n.48, p.231-44, 2004.  
BRITTON, 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 Technol., Vol. 42, n.7, p. 2221-32, Febr., 2008.  
LEDUC, W.R.W.A.; VAN KANN, F.M.G. Urban harvesting as planning approach towards productive urban regions. [Delt]: 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.  
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 energy 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/ujkay/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. [Delt]: 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.  
PHUDUNGSI, P. A. A thermodynamic framework for urban energetic metabolism. CONFERENCE ON ENERGY NETWORK OF THAILAND, 3., 2007. [Bangkok].  
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.I. Disponível em: <http://www.irinet.de/daten/scinda/CIB14198.pdf>.  
VAN WYLEM, 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.