

DEGRADAÇÃO AMBIENTAL: UMA ABORDAGEM POR ENTROPIA ¹

ENVIRONMENTAL DEGRADATION: AN ENTROPY APPROACH

André Pedrozini Brandi²
Vania Elisabeth Barlette³

RESUMO

Neste trabalho, a degradação ambiental é discutida a partir da segunda lei da termodinâmica à luz do conceito de entropia. De acordo com a segunda lei, a produção de trabalho útil em um processo irreversível é acompanhada pela produção de energia residual. Muitos autores têm relacionado degradação ambiental com energia residual (entropia) gerada pelo trabalho produzido pela intervenção do homem em processos de produção. A possibilidade de produzir trabalho de modo eficiente significa, no sentido termodinâmico, minimizar a máxima entropia gerada em um processo irreversível. Levando em conta essa consideração, neste trabalho também é reportado um modelo teórico desenvolvido por George Saridis a partir de uma abordagem por entropia para otimizar os efeitos da participação humana na produção de trabalho útil.

Palavras-chave: qualidade de vida, segunda lei da termodinâmica, intervenção humana.

ABSTRACT

Environmental degradation is discussed in this work from the second law of thermodynamics based on the entropy concept. According to this law, production of useful work is followed by production of residual energy in an irreversible process. Many authors have been associating environmental degradation with residual energy (entropy) generated by the work produced by human intervention. The possibility of producing work in an efficient way means, in a thermodynamic sense, to minimize the maximum entropy generated in an irreversible process. Considering this assumption, in this work is also reported a theoretical method developed through by George Saridis an entropy approach to optimize the effects of the human participation when useful work is produced.

¹ Monografia.

² Curso de Especialização em Educação Ambiental. UNIFRA.

³ Orientador.

Key words: quality of life, second law of thermodynamics, human intervention.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado que os processos de produção de trabalho útil que mantêm e promovem a vida moderna, lamentavelmente e de forma indesejável, também promovem a degradação do meio ambiente. Essa observação reflete, no sentido termodinâmico, a degradação de energia que ocorre em processos irreversíveis e é expressa pela segunda lei, a qual estabelece um sentido preferencial na transformação de energia: o de aumento inevitável de entropia (TIPLER, 1984; BALIAN, 1991; HALLIDAY *et al.*, 1996). Em processos irreversíveis, parte da energia torna-se indisponível ou não utilizável, no sentido de que esta não pode ser reaproveitada para trazer melhoria na qualidade de vida do homem. Essa energia residual, rejeitada em muitos processos de produção, e por alguns autores referenciada como energia de baixa qualidade (ODUM, 1983; GLASBY, 1988; SARIDIS, 1998), tem-se traduzido em sérios malefícios ao meio ambiente.

Neste trabalho, a degradação ambiental é discutida a partir da segunda lei da termodinâmica à luz do conceito de entropia. A formulação do conceito de entropia foi de fundamental importância para o desenvolvimento da termodinâmica, da mecânica estatística e da teoria de informação. Com a termodinâmica, surgiu a interpretação do conceito de entropia como medida da irreversibilidade de um processo, a chamada entropia termodinâmica. Novas formas de interpretar o conceito de entropia (CALLEN, 1985; BORGES, 1999) surgiram com a mecânica estatística (entropia como medida de desordem ou entropia estatística) e teoria de informação (entropia como medida de incerteza ou entropia de informação). Nas últimas décadas, o conceito de entropia expandiu-se em várias direções, beneficiando áreas como Psicologia, Economia e Ecologia. Citam-se os estudos sobre evolução de sistemas biológicos em teoria evolucionária de sistemas (SCHULZE & MORI, 1993), otimização de processos aplicados à engenharia (SARIDIS, 1998), crescimento econômico e poluição ambiental aplicados à teoria econômica e ecologia (FUJII, 1982; GLASBY, 1988; SARIDIS, 1998; ODUM, 1983). Nesse contexto, este trabalho também reporta um método teórico desenvolvido por George Saridis (SARIDIS, 1998) para minimizar a máxima entropia resultante do trabalho produzido em processos de produção, os quais têm a participação do homem.

METODOLOGIA

Esta pesquisa tem característica fenomenológica hermenêutica do tipo revisão de literatura (GAMBOA, 1989).

DISCUSSÃO HISTÓRICO-CIENTÍFICA

A segunda lei, no contexto da termodinâmica, pode ser enunciada de várias formas, e todas elas refletem a irreversibilidade na evolução de sistemas macroscópicos em direção ao equilíbrio térmico (TIPLER, 1984; BALIAN, 1991; HALLIDAY *et al.*, 1996; PEREIRA Jr., 1997; BORGES, 1999).

A noção de irreversibilidade já estava presente nos trabalhos de Nicolas Léonard Sadi Carnot sobre transmissão de calor e rendimento de máquinas térmicas, realizados em 1824 (BASSALO, 1998; BASSALO & CATTANI, 1999), como também nos trabalhos realizados em 1851 por Willian Thompson e, em 1850, por Rudolf Julius Emmanuel Clausius (BASSALO & CATTANI, 1999). Clausius, em 1865, em uma nova versão da segunda lei, estabeleceu uma função, que chamou entropia, em analogia à energia (CLAUSIUS, 1865; BASSALO *et al.*, 1999).

Seja um processo termodinâmico, segundo o qual um dado sistema evolui de um estado inicial para um estado final, enquanto troca matéria e energia com a vizinhança. Segundo BORGES (1999), por irreversibilidade entende-se ou a impossibilidade de operar o processo inverso, ou quando o processo inverso é possível, as quantidades de trocas de matéria e energia sob as formas de calor e trabalho do sistema com a vizinhança não serão mais as mesmas. Invariavelmente, em tal ciclo ocorre perda definitiva ou irreversível da capacidade do sistema de produzir trabalho. Nesse processo, parte da energia sob a forma de trabalho é perdida sob a forma de calor, e a variação total da entropia é sempre positiva, ou $\Delta S \geq 0$, que expressa a segunda lei da termodinâmica.

Max Planck, em sua discussão sobre a segunda lei, define um processo irreversível como aquele em que o estado termodinâmico final é o de maior probabilidade termodinâmica ou peso termodinâmico que o estado inicial (PLANCK, 1932). Planck envolveu-se com o problema da irreversibilidade desde 1895 com a derivação microscópica da distribuição espectral da radiação térmica. Em seus trabalhos seguintes, que culminaram com a lei de Wien, em 1899, e a lei de Planck, em 1900, Planck utilizou a termodinâmica macroscópica e as idéias estatísticas desenvolvidas por James Clerk Maxwell e Ludwig Eduard Boltzmann.

Boltzmann desenvolveu, ao longo de sua vida, um trabalho monumental em termodinâmica estatística. Com a concepção de que sistemas termodinâmicos obedecem às leis da mecânica em escala microscópica, e utilizando-se de argumentos estatísticos, foi que Boltzmann, em 1872, na tentativa de compreender o problema da irreversibilidade contido na segunda lei e em busca de uma interpretação mecânica para a entropia, elaborou um trabalho pioneiro sobre a evolução das moléculas de um gás (BALIAN, 1991; PEREIRA Jr., 1997).

Boltzmann utilizou uma função distribuição de probabilidades $f(q,p,t)$ para a posição q e *momentum* linear p de uma partícula de um sistema microscópico, e introduziu uma equação dinâmica, conhecida como teorema-H, para a evolução temporal em direção ao estado de equilíbrio (DIAS, 1994; COUTINHO-FILHO, 1994; MIZRAHI, 1994; VOLCHAN & VI-DEIRA, 2001),

$$H(t) = \int f(q,p,t) \ln[f(q,p,t)] dq dp. \quad (1)$$

No instante t , $H(t)$ mede quanto o sistema microscópico está longe do equilíbrio. No equilíbrio, $H(t)$ atinge o seu menor valor, de modo que, ao longo da evolução do sistema, $H(t)$ é função decrescente com o tempo,

$$dH(t)/dt \leq 0. \quad (2)$$

Boltzmann, no desenvolvimento de seu trabalho foi influenciado, sobretudo, pelas idéias de Maxwell, as quais demonstraram a natureza probabilística da entropia termodinâmica. Foi a partir dessas idéias que, em 1887, Boltzmann identificou o conceito de probabilidade com o número de configurações ou estados mais prováveis em um sistema microscópico, propondo o estado macroscópico de equilíbrio térmico como o estado “mais provável” (BALIAN, 1991; BASSALO et al., 1999).

Assim, pela Eq. 2, é mais provável que os estados percorridos na evolução temporal de um sistema microscópico sejam tais que $H(t)$ seja decrescente, ou, termodinamicamente equivalente, que a entropia termodinâmica S seja crescente. De forma que, para processos irreversíveis, a quantidade S não é conservada. Com isso, para o equilíbrio térmico, Boltzmann fez a equivalência entre $H(t)$ e S ,

$$S = -H \quad (3)$$

e identificou os estados microscópicos de equilíbrio mais prováveis com aqueles para os quais a entropia do estado termodinâmico ou macroscópico é um

máximo. Assim, a evolução espontânea de um processo termodinâmico irreversível corresponde a um aumento de entropia, ou a uma entropia positiva.

ENTROPIA E DEGRADAÇÃO AMBIENTAL

Em termodinâmica, o conceito de entropia, desde o seu início, esteve estreitamente relacionado ao conceito de calor, uma energia degradada relacionada a um processo irreversível. Diversos autores, ao se referirem à segunda lei no contexto da termodinâmica, descrevem entropia como energia degradada (ODUM, 1983; GLASBY, 1988; BALIAN, 1991; TIPLER, 1984; SARIDIS, 1998). Segundo SARIDIS (1998), foi de Boltzmann a idéia pioneira de relacionar entropia como medida quantitativa de deteriorização da qualidade de energia na produção de trabalho útil.

À medida que as idéias estatísticas de James Clerk Maxwell e Josiah Willard Gibbs foram sendo incorporadas ao conceito de entropia por Boltzmann, foi possível demonstrar a natureza mais geral da entropia como uma medida de desordem: a irreversibilidade acompanhando a conversão de trabalho em calor é interpretada como um aumento no movimento desordenado das moléculas de um gás.

No contexto da ecologia, o conceito de entropia como medida de desordem associada com a degradação de energia no meio ambiente é identificado por ODUM (1983), o qual ressalta que “Os organismos, os ecossistemas e a biosfera inteira possuem a característica termodinâmica essencial: eles conseguem criar e manter um alto grau de ordem interna, ou uma condição de baixa entropia” (p. 55).

Relacionado ao problema da degradação de energia resultante de um processo irreversível, está a conseqüente degradação ambiental. De acordo com Rifkin, citado por SARIDIS (1998), o homem ao utilizar energia para produzir trabalho e melhorar sua qualidade média de vida, produz também energia residual de baixa qualidade a qual, irreversivelmente, reduz a qualidade do meio ambiente com a produção de lixo, poluição do ar, poluição de recursos hídricos, e de forma geral, com a redução das fontes de sustentabilidade da vida. Esse autor sugere entropia como medida de degradação, uma energia que tende a deteriorar a qualidade do meio ambiente.

GLASBY (1988) enfatiza que a degradação ambiental é um corolário do crescimento populacional aliado ao crescimento de consumo de energia desta população, e portanto, da atividade econômica. Esse autor relaciona entropia e degradação ambiental ao ressaltar que “Man uses energy to produce order. The second law of thermodynamics requires that the energy used be degraded and that increased disorder (or entropy) results. This disorder can

be thought of as environmental degradation and has been steadily increasing as a consequence of industrialization”(p. 330).

É oportuno introduzir a hipótese Gaia, discutida por JARDIM & CHAGAS (1992), que diz que a vida na Terra tem utilizado sistemas básicos como oceanos, mares e florestas para manter seu ambiente otimizado via um mecanismo de auto-regulação sobre a temperatura e composição química da biosfera. Gaia seria responsável pela alimentação negativa de energia, ou entropia negativa, capaz de minimizar os efeitos da poluição causada pelo homem, “ela traz uma nova visão envolvendo os componentes orgânicos e inorgânicos do nosso planeta, uma visão holística ... (JARDIM & CHAGAS, 1992, p.75). Esses autores ressaltam, ainda, que “independente da escolha de Gaia sobre o destino humano num planeta futuramente poluído ... a atitude mais sadia e coerente é a prevenção. E essa prevenção está hoje centrada não em hipóteses, mas em fatos concretos tais como uma legislação ambiental madura e eficaz, legislação essa que o Brasil, bem como os demais países estão longe de exercitar”(p. 75).

Segundo reporta FUJII (1982), a Terra produz entropia negativa, ou redução de entropia, a uma taxa constante de cerca de $40 \text{ cal cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, enquanto que a entropia positiva, ou aumento de entropia, produzida pelo homem é de cerca de $0,006 \text{ cal cm}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Ou seja, a produção de entropia positiva pelo homem é cerca de 1/10000 da produção de entropia negativa pela Terra. Nessa perspectiva, a produção de entropia positiva pelo homem será igual a produção de entropia negativa pela Terra em pouco mais de 130 anos, se considerada a razão de aumento de consumo de energia pelo homem de 7% ao ano.

Se por um lado, a atuação de Gaia não seria eficiente frente ao elevado crescimento do consumo de energia pelo homem, e por outro, também não tem sido eficiente a prática da legislação ambiental, quais outras soluções têm sido apontadas para contribuir na direção de minimizar a degradação ambiental?

Segundo ODUM (1983), “as opções para um futuro imediato deveriam ser baseadas em fontes que promettessem a melhor produção com a menor entropia”(p. 108). Recentemente, George Saridis (SARIDIS, 1998), utilizando o conceito de entropia de informação ou incerteza, propôs um método teórico para otimização de processos irreversíveis com a finalidade de minimizar os efeitos do aumento da entropia global. Esse autor ressalta que, de acordo com a segunda lei da termodinâmica, produção de trabalho é acompanhada de produção de energia residual, a qual irreversivelmente aumenta o nível global de energia de baixa qualidade do planeta, ou entropia global. A grande contribuição existente na proposta de Saridis é que esta tem impli-

cações na melhoria da qualidade de vida por meio da otimização da intervenção humana nos processos de produção de trabalho útil.

Em seu trabalho, Saridis utilizou o princípio de máxima entropia, introduzido por JAYNES (1957), e formulou o problema de otimização de um processo como incerteza, por parte do projetista, do resultado de seu projeto. Às equações físicas, foi incorporado um termo de intervenção humana ou função $u(q,t)$, com o propósito de minimizar a máxima entropia $-H$ produzida pela intervenção humana $u(q,t)$, ou equivalentemente, com o propósito de reduzir a poluição gerada pela realização de trabalho em processos irreversíveis. Saridis, em sua proposta, fundamentou-se na expressão de Boltzmann dada pela Eq. 1, definindo a entropia $-H$ como na Eq. 3,

$$H(u) = - \int f[u(q,t)] \ln f[u(q,t)] dq, \quad (4)$$

em que $f[u(q,t)]$ é a função densidade de probabilidade de selecionar a função desconhecida $u(q,t)$.

Aplicando-se a segunda lei da termodinâmica, pode-se encontrar $f[u(q,t)]$ que maximiza H ,

$$\frac{\partial H}{\partial f} = 0, \quad (5.a)$$

e,

$$\frac{\partial^2 H}{\partial f^2} < 0, \quad (5.b)$$

resultando em,

$$f[u(q,t)] = \exp[-\lambda - \mu V[u(q,t)]], \quad (6.a)$$

e,

$$H[u(q,t)] = \lambda + \mu E\{V[u(q,t)]\}, \quad (6.b)$$

em que λ e μ são coeficientes constantes, $V[u(q,t)]$ é a energia gerada pelo trabalho produzido devido à intervenção humana, e $E\{V[u(q,t)]\}$ é uma função de $V[u(q,t)]$.

O correspondente valor mínimo de H com respeito a $u(q,t)$ representa a intervenção humana ótima u^* para um dado sistema descrito pelas coordenadas q , que implica em,

$$\frac{dH}{du} = \frac{\partial H}{\partial u} = 0, \quad (7.a)$$

$$\frac{d^2H}{du^2} > 0, \quad (7.b)$$

e,

$$\text{Min}[H(u^*)] \cong \text{Min}[V(u)] \quad (7.c)$$

Com a condição de incompressibilidade temporal da função densidade de probabilidade $f[u(q,t)]$,

$$\frac{df}{dt}[u(q,t)] = 0, \quad (8)$$

e com a função $f[u(q,t)]$ selecionada como na Eq. 6.a, pode-se determinar a partir da Eq. 7.c o $\text{Min}\{V[u(q,t)]\}$, o qual fornece u^* para um dado V apropriado para cada sistema.

A aplicação dessa metodologia requer definições para as funções f e u^* relacionadas a um sistema em particular.

Na iminência de degradação ambiental em larga escala, GLASBY (1988, p. 334) enfatiza, citando Tickell, que a maior ameaça que o homem tem a enfrentar é o seu próprio sucesso como espécie, uma vez que este com a sua atuação sobre o meio ambiente, tem provocado um desequilíbrio energético jamais antes observado. É ponto pacífico entre vários autores que esse desequilíbrio energético é manifestado na forma de aumento de entropia global ou degradação ambiental.

ODUN (1983, p. 110) considera que ecologistas e economistas, de um modo geral, concordam na prática de uma ciência econômica mais holística, com maior atenção para o papel da segunda lei da termodinâmica ou lei da entropia nas transações econômicas. Esse autor enfatiza, citando Brown, que a economia global depende de certos ecossistemas básicos, como os mares, as florestas e a agricultura, e quando estes recursos são gastos ou perturbados, a economia mundial é penalizada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, relaciona-se a degradação ambiental com a energia degradada em termodinâmica. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, a degradação de energia resultante de processos de produção de trabalho útil não pode ser totalmente eliminada. As implicações dessas considerações sobre o meio ambiente, à parte da existência de um programa de legislação ambiental, de programas para redução do consumo de energia e redução do crescimento populacional, podem ser relacionadas a importantes ações, como

por exemplo, desenvolvimento de novos processos de produção de trabalho útil que minimizem o aumento de entropia global. Nessa perspectiva, o presente trabalho também reportou um modelo teórico para otimizar processos de produção de trabalho útil, o qual permite reduzir ao máximo o aumento de entropia gerado pela intervenção do homem nestes processos. A formulação utilizada no modelo contempla um termo “novo”, $u(q,t)$, que representa a intervenção da sociedade no processo de melhoria da qualidade de vida, e pode-se dizer, reflete a postura da sociedade diante dos problemas ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALIAN, Roger 1991. **From microphysics to macrophysics: methods and applications of statistical physics**. vs.1 e 2. New York: Springer-Verlag.

BASSALO, José Maria Filardo. 1998. Nascimento da física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 20, n. 1, p. 56-74.

BASSALO, José Maria Filardo; CATTANI, Mauro Sérgio Dorsa. 1999. Aspectos contemporâneos da termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 21, n. 3, p. 366-379.

BASSALO, José Maria Filardo; NASSAR, Antonio Boulhosa; CATTANI, Mauro Sérgio Dorsa. 1999. Aspectos contemporâneos da mecânica estatística. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 21, n. 4, p. 528-541.

BORGES, Ernesto P. 1999. Irreversibilidade, desordem e incerteza: três visões da generalização do conceito de entropia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. v. 21, n. 4, p. 453-463.

CALLEN, Herbert B.. 1985. **Thermodynamics and an introduction to thermostatistics**. 2.nd. New York: John Wiley & Sons.

CLAUSIUS, Rudolf. 1865. **On different forms of the fundamental equations of the mechanical theory of heat and their convenience for applications**. In: KESTIN, Joseph (ed). 1976. The second law of thermodynamics. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson and Ross.

COUTINHO-FILHO, Maurício D. 1994. Reflexões sobre o desenvolvimento da mecânica estatística: um tributo a Ludwig Boltzmann (1844-1994). **Química Nova**. v. 17, n. 6, p. 536-550.

DIAS, Penha Maria Cardoso. 1994. A hipótese estatística do teorema-H. **Química Nova**. v. 17, n. 6, p. 472-479.

FUJII, Nobuo. 1982. An entropy model of environmental pollution and economic growth. **Applied Mathematical Modelling**, v. 6, p. 431-435.

GAMBOA, S. A. S. 1989. **A dialética na pesquisa em educação**: elementos de contexto. In: FAZENDA, I. (org.) Metodologia da pesquisa educacional. São Paulo: Cortez.

GLASBY, Geoffrey P. 1988. Entropy and environmental degradation. **Ambio**. v. 17, n. 5, p. 330-335.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. 1996. **Física 2**. 4.ed. v. 2. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

JAYNES, E. T. 1957. **Information theory and statistical mechanics**. Physics Review. v. 106, p. 620.

JARDIM, Wilson F.; CHAGAS, Aécio P. 1992. A química ambiental e a hipótese Gaia: uma nova visão sobre a vida na terra? **Química Nova**. v. 15, p.73-76.

MIZRAHI, Salomon S. 1994. **Os processos irreversíveis e algumas de suas equações cinéticas**. Química Nova. v. 17, n. 6, p. 527-535.

PEREIRA Jr., Alfredo. 1997. **Irreversibilidade física e ordem temporal na tradição boltzmanniana**. São Paulo: Editora UNESP.

ODUM, Eugene. 1983. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara.

PLACK, M. 1932. **The second law of thermodynamics**. In: KESTIN, Joseph(ed). 1976. The second law of thermodynamics. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson and Ross.

SARIDIS, George N. 1998. **Optimal control of global entropy for environmental systems**. IEEE Robotics & Automation Magazine. v. 5, n. 3, p. 45-51.

SCHULZE, Georg ; MORI, Shuji. 1993. Increases in environmental entropy demand evolution. **Acta Biotheoretica**, v. 41, p. 149-164.

TIPLER, Paul A. 1984. **Física**. 2.ed. v. 1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

VOLCHAN, Sérgio B.; VIDEIRA, Antonio A. P. 2001. Reversibilidade microscópica versus irreversibilidade macroscópica na mecânica estatística clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 23, n. 1, p. 19-37.