



## CONFORTO TÉRMICO E ANÁLISE EXERGÉTICA: CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES E PERSPECTIVAS

**José Antonio Rabi**

FZEA/USP – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo  
Av. Duque de Caxias Norte, 225, Pirassununga, SP, 13635-900, tel: (19) 3565-4288  
e-mail: [jrabi@fzea.usp.br](mailto:jrabi@fzea.usp.br)

### RESUMO

Os modelos matemáticos têm desempenhado importante papel no tocante à definição de parâmetros para quantificar fenômenos biológicos ou fisiológicos. Neste sentido, este trabalho propõe a definição de um índice de conforto ou estresse térmico pela análise exergética de mecanismos termorreguladores.

### ABSTRACT

Mathematical modeling has played an important role regarding the definition of parameters to quantify biological or physiological phenomena. Accordingly, this paper puts forward the definition of a thermal comfort or stress index based on the exergetic analysis of human thermoregulation mechanisms.

### 1. CONFORTO TÉRMICO E MODELAGEM MATEMÁTICA

Vários parâmetros já foram definidos para avaliar conforto ou estresse térmico em seres humanos: temperatura resultante, temperatura equivalente, temperatura efetiva (nova escala e standard), índice de estresse térmico, taxa estimada de sudorese e voto médio estimado (PARSONS, 1993). Classificados como racionais (se baseados em considerações teóricas) ou empíricos (se obtidos através de correlações estatísticas de relatos de voluntários submetidos a diferentes condições ambientais), tais índices são importantes ferramentas de suporte a projetos bioclimáticos. Em face da iminência de um novo colapso energético no país, iniciativas que poupem recursos energéticos são sempre bem-vindas e a construção de edificações energeticamente eficientes é um louvável esforço nesta direção.

Para tanto, convém analisar o conforto térmico de ocupantes com base em índices capazes de retratar a realidade fisiológica dos mesmos. A associação entre as Ciências Exatas e as Ciências Biológicas tem sido de mútuo interesse quanto à compreensão e à análise de mecanismos fisiológicos. Enquanto novos horizontes de investigação são abertos para as Engenharias, as Ciências da Vida usufruem cada vez mais da combinação da tecnologia da informação com as ferramentas do cálculo.

### 2. TERMORREGULAÇÃO E CONFORTO TÉRMICO: ENFOQUE EXERGÉTICO

A 1ª lei da Termodinâmica lida com variações e trocas de energia de um sistema. Expresso por um balanço, este princípio básico de conservação possui caráter quantitativo e tem sido usado para definir índices racionais de conforto térmico. Quando aplicado para descrever as taxas instantâneas de trocas de calor entre o ser humano e o meio que o envolve, tal balanço assume a forma (BLIGH, 1985):

$$\left(\frac{dE}{dt}\right) = Q_{\text{met}} - W - Q_{\text{evap}} \pm Q_{\text{rad}} \pm Q_{\text{conv}} \pm Q_{\text{cond}} \quad [\text{Eq. 1}]$$

onde  $dE/dt$  é a taxa de variação de energia interna do corpo,  $Q_{\text{met}} - W$  é a taxa de liberação de energia por metabolismo descontada da potência muscular,  $Q_{\text{evap}}$  é a taxa de perda de calor por evaporação e  $Q_{\text{rad}}$ ,  $Q_{\text{conv}}$  e  $Q_{\text{cond}}$  são as taxas de transferência de calor por radiação térmica, convecção e condução.

Por sua vez, a 2ª lei da Termodinâmica atribui um caráter qualitativo às diferentes formas de energia na medida que impõe restrições às transformações possíveis. Expressa em termos de variação de entropia, a 2ª lei só permite as transformações irreversíveis (espontâneas) de uma forma “organizada” de energia (ex: energia potencial) para uma “caótica” (ex: energia térmica). Com base na taxa de geração de entropia, BOREGOWDA *et al.* (2001) propuseram o Índice Objetivo de Conforto Térmico (OTCI).

Da combinação destas duas leis físicas surge a grandeza denominada exergia, introduzida para analisar processos térmicos e químicos em relação ao modo teoricamente mais eficiente, por meio do qual tais processos poderiam ser conduzidos sob a influência do ambiente em questão (KOTAS, 1995). A análise exergética (ou análise de 2ª lei) pode apontar e quantificar as causas de imperfeições termodinâmicas de processos térmicos e químicos, o que não é possível apenas por balanço energético.

Conforme o padrão ASHRAE (FANGER, 1972), o conforto térmico é definido em termos do estado da mente expressando satisfação com o ambiente. Admitindo então que o desconforto advém de alguma forma de desequilíbrio termofísico ou termoquímico provocado pelo meio sobre o ocupante, a análise exergética dos mecanismos termorreguladores pode naturalmente conduzir a concepção de um índice de conforto térmico. Especificamente, tal índice deveria levar em conta as taxas de perdas de exergia decorrentes dos processos fisiológicos termorreguladores, visando retratar os correspondentes níveis de (des)conforto humano ou, do ponto de vista zootecnista, de produção animal.

A exergia admite quatro componentes – cinética, potencial, física e química – e para o seu cálculo o ambiente deve ser especificado (SZARGUT *et al.*, 1988). O chamado “meio morto” corresponde ao estado termodinâmico do meio externo, com o qual o sistema em questão tende espontaneamente a ficar em equilíbrio. Assim quanto maior for o desequilíbrio (ou seria arriscado dizer desconforto?) entre o sistema (ocupante) e o meio morto (ambiente), maior a exergia daquele primeiro.

A perda de exergia  $\Delta B$  de um sistema é a soma das perdas de exergia de cada parte ou processo componente (BEJAN, 1982), estando relacionada com a correspondente geração de entropia  $\Delta S$ , a qual será tanto menor quanto menor for a irreversibilidade do processo. Pela a definição de uma temperatura  $T_0$  de meio morto, o teorema de Gouy-Stodola (SZARGUT *et al.*, 1988) relaciona estas grandezas:

$$\Delta B = T_0 \Delta S \quad [\text{Eq. 2}]$$

Assim, um provável papel da temperatura  $T_0$  seria o de ponderar as diferentes respostas individuais às condições bioclimáticas. Abordagem similar foi adotada por BOREGOWDA *et al.* (2001) ao introduzir o chamado coeficiente adimensional humano  $H$  na definição do OTCI, de modo que tal coeficiente pudesse levar em conta a influência de fatores como idade, sexo, raça, cultura, entre outros.

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEJAN, A. (1982) “Entropy Generation through Heat and Fluid Flow”. Wiley. New York, USA.
- BLIGH, J. (1985) “Regulation of body temperature in man and other mammals”. In: Shitzer, A., Eberhart, R. C. (eds.), “Heat Transfer in Medicine and Biology”. Plenum Press. New York, USA.
- BOREGOWDA, S. C., TIWARI, S. N., CHATURVEDI, S. K. (2001), “Entropy generation method to quantify thermal comfort”. Human Performance in Extreme Environments, v. 6, n. 1, pp. 40-45.
- FANGER, P. O. (1972) “Thermal Comfort - Analysis and Applications in Environmental Engineering”. McGraw-Hill Book Company. New York, USA.
- KOTAS, T. J. (1985) “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”. Butterworths. London, UK.
- PARSONS, K. C. (1993) “Human Thermal Environments”. Taylor & Francis. London, UK.
- SZARGUT, J., MORRIS, D. R., STEWARD, F. R. (1988) “Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Process”. Hemisphere. New York, USA.