

# Análise Exergética do Corpo Humano

**Maurício Silva Ferreira**, Departamento de Engenharia Mecânica, FEI,  
e-mail: [mauricio.ferreira@fei.edu.br](mailto:mauricio.ferreira@fei.edu.br),

**Jurandir Itizo Yanagihara**, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica - USP,  
e-mail: [jiv@usp.br](mailto:jiv@usp.br), home page: <http://www.lete.poli.usp.br>

## Introdução

O mecanismo de regulação da temperatura corporal ainda não está totalmente compreendido, restando muitos pontos a esclarecer. A análise exergética, baseada no primeiro e segundo princípios da termodinâmica, pode ser uma ferramenta útil na análise do sistema termorregulador.

No estudo da regulação da temperatura corporal, a modelagem e simulação computacional do sistema térmico humano são bastante utilizadas. A primeira envolve a aplicação dos princípios de conservação da energia e massa, conceitos de transferência de calor e teoria do controle. Normalmente, a informação que se busca é a temperatura superficial da pele em várias regiões e um valor representativo da temperatura interna. Entre outras aplicações desses modelos, destaca-se a avaliação de conforto térmico. A relação entre as temperaturas e demais variáveis obtidas na simulação com a avaliação de conforto térmico permanece um desafio. Recentemente, Prek (2006) correlacionou sensação térmica com destruição de exergia ou geração entropia, sendo estas determinadas com o auxílio de um modelo simplificado do sistema térmico, conhecido como “modelo de Gagge” (Gagge et al., 1971).

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma análise exergética do corpo humano, modificando um modelo do sistema térmico disponível (Ferreira e Yanagihara, 1997). Trata-se de um modelo composto por um único cilindro dividido em camadas anulares concêntricas representando a pele, gordura, músculo e osso. A razão para a escolha deste modelo é que as idéias implementadas podem ser estendidas para modelos compostos por mais cilindros. Pretende-se comparar os resultados da simulação com dados experimentais e resultados presentes em Batato et al. (1990).

## Modelo do sistema térmico

O corpo humano foi modelado por um único cilindro composto por quatro camadas anulares e concêntricas, cada uma representando um tipo de tecido: núcleo, músculo, gordura ou pele. Cada camada apresenta propriedades e parâmetros uniformes: massa específica, condutividade térmica, calor específico, perfusão de sangue e metabolismo. A massa de sangue existente no corpo humano foi modelada separadamente. As camadas trocam calor entre si por condução na direção radial e através do fluxo de sangue. O corpo humano troca calor com o meio ambiente através de convecção, radiação, evaporação e respiração.

O modelo é composto por equações diferenciais parciais que descrevem a variação de temperatura dos

tecidos e uma equação diferencial ordinária que descreve a variação de temperatura do sangue com o tempo. O método das diferenças finitas foi utilizado na solução dessas equações. Correlações adicionais são usadas para representar o sistema termorregulador humano.

## Análise energética

Considerando-se um volume de controle que envolve o corpo humano, a aplicação de um balanço de energia, assumindo que não há trabalho de fronteira, conduz a:

$$\sum_i \left( m_i \cdot \frac{du_i}{dt} \right) = M - E - C - R - Q \quad (1)$$

sendo que  $u_i$  é a energia interna específica do volume  $i$  da malha ou do volume de sangue do corpo humano;  $m_i$  é a massa do constituinte  $i$ ,  $t$  é o tempo,  $M$  é a taxa de produção de calor pelo metabolismo,  $E$  é a taxa de perda de calor por evaporação,  $C$  é a taxa de perda de calor por convecção,  $R$  é a taxa de perda de calor por radiação e  $Q$  é a taxa de perda de calor pela respiração. Considerando que o corpo humano seja submetido a um processo qualquer, a eficiência energética entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$  foi definida por Batato et al. (1990) como sendo:

$$\varepsilon = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sum_i \left( m_i \frac{du_i}{dt} \right) dt}{\int_{t_1}^{t_2} M dt} \quad (2)$$

O numerador da Equação 2 é a variação da energia interna entre os estados 1 e 2 e o denominador é o calor total gerado.

## Análise exergética

Utilizando-se a mesma fronteira e hipótese empregada anteriormente, a aplicação do balanço exergético resulta em:

$$\sum_i \left( m_i \frac{dex_i}{dt} \right) = Ex_M + Ex_{CR} + Ex_E + Ex_Q - Ex_{dest} \quad (3)$$

Sendo que  $ex_i$  é a exergia específica do constituinte  $i$ ,  $Ex_M$  é a contribuição exergética do metabolismo,  $Ex_{CR}$  é a contribuição exergética da convecção e radiação,  $Ex_E$  é a contribuição exergética da evaporação,  $Ex_Q$  é a contribuição exergética da respiração e  $Ex_{dest}$  é a exergia destruída.

A variação de energia interna pode ser calculada a partir da Equação 1 e de resultados experimentais, sem que seja necessário conhecer a constituição do corpo humano ou empregar um modelo. Entretanto, a variação de exergia não pode ser calculada diretamente através da Equação 3, por causa do último termo do segundo membro, que é a exergia destruída. A variação de exergia deve ser calculada com o auxílio do modelo e, então, a exergia destruída pode ser calculada através da Equação 3.

A eficiência exergética entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$  foi definida por Batato et al. (1990) como sendo:

$$\varepsilon = 1 - \frac{Ex_{dest}}{\int_{t_1}^{t_2} Ex_M dt} \quad (4)$$

## Resultados

O corpo humano, em condições basais, foi submetido a um súbito aumento da temperatura ambiente no instante  $t_1$ , isto é, um degraú de temperatura. As condições inicial, final e de referência utilizadas na simulação são dadas na Tabela 1:

**Tabela 1: Condições empregadas na simulação.**

| Condição    | Inicial | Final | Referência |
|-------------|---------|-------|------------|
| $T$ (°C)    | 30      | 37    | 25         |
| $\phi$ (%)  | 50      | 30    | 30         |
| $p$ (1 atm) | 1       | 1     | 1          |

Sendo  $T$  a temperatura operativa,  $\phi$  a umidade relativa do ar e  $p$  a pressão atmosférica. Os resultados da simulação estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2: Resultados da simulação**

| <i>análise energética</i>     | (J)         | <i>análise exergética</i>        | (J)          |
|-------------------------------|-------------|----------------------------------|--------------|
| $\int_{t_1}^{t_2} M dt$       | 70254       | $\int_{t_1}^{t_2} Ex_M \cdot dt$ | 70254        |
| $\int_{t_1}^{t_2} (C + R) dt$ | -25168      | $\int_{t_1}^{t_2} Ex_{rc} dt$    | 811          |
| $\int_{t_1}^{t_2} E dt$       | 51542       | $\int_{t_1}^{t_2} Ex_E \cdot dt$ | -1711        |
| $\int_{t_1}^{t_2} Q dt$       | 4896        | $\int_{t_1}^{t_2} Ex_Q \cdot dt$ | -192         |
| $\Delta U$                    | 38984       | $\Delta S$                       | 128          |
| -----                         | -----       | $\Delta Ex$                      | 840          |
| -----                         | -----       | $Ex_{des}$                       | 68322        |
| $\varepsilon$                 | <b>0,55</b> | $\eta$                           | <b>0,028</b> |

Em repouso, praticamente toda a exergia fornecida ao corpo humano acaba sendo destruída. Comparando-se os resultados das duas análises, observa-se que, com exceção da contribuição do metabolismo, o peso de cada contribuição muda de um tipo de análise para a outra. Batato et al. (1990) calcularam a contribuição exergética do metabolismo considerando-se as reações de oxidação dos hidratos de carbono, dos lípidios e das proteínas. O débito mássico dessas substâncias foi calculado medindo-se o oxigênio consumido e o gás carbônico liberado. No modelo foi utilizada uma aproximação para determinação da contribuição

exergética do metabolismo. Observando-se os resultados do referido trabalho, nota-se que o metabolismo energético é praticamente igual ao exergético, com diferença inferior a 3 %. Portanto, as contribuições energética e exergética do metabolismo foram consideradas iguais.

As eficiências energética e exergética obtidas com o modelo podem ser comparadas com aquelas apresentadas por Batato et al. (1990):

**Tabela 3: Comparação entre os resultados da simulação e dados semi-empíricos.**

|               |        | Batato et al. (1990) |                 |
|---------------|--------|----------------------|-----------------|
| Rendimento    | Modelo | Média                | Varição         |
| $\varepsilon$ | 0,55   | 0,29                 | 0,19 a 0,49     |
| $\eta$        | 0,028  | 0,0022               | 0,00001 a 0,007 |

Na Tabela 3 pode ser observada uma grande variação nas eficiências apresentadas por Batato et al. (1990). Essa dispersão pode ser atribuída às diferenças na duração nos experimentos e a diferenças individuais, como a porcentagem de gordura corporal.

Outro fator importante é que os indivíduos não foram submetidos, durante um mesmo intervalo de tempo, a um ambiente dito neutro, para que suas temperaturas internas e demais parâmetros fisiológicos se aproximassem de seus valores basais. Isto significa que o estado inicial não era o mesmo para todos os indivíduos. Isso explica, em parte, a discrepância entre os resultados do modelo e os resultados de Batato et al. (1990). No presente trabalho considerou-se que, no estado inicial, o corpo humano estava em neutralidade térmica fisiológica e seu metabolismo basal era de 78W. O processo considerado durou 15 minutos, enquanto que Batato et al. (1990) realizaram experimentos com duração de 2 a 19 minutos e o metabolismo dos indivíduos estava entre 81 e 90 W.

## Comentários finais

Pretende-se implementar as análises energética e exergética em um modelo completo do sistema térmico e ampliar os processos estudados, incluindo realização de trabalho e exposição a mais ambientes.

## Referências bibliográficas

Batato, M.; Lucien; B.; Deriaz, O.; Jequier, E., Analyse exergétique, théorique et expérimentale, du corps humain. Entropie, v. 153/154, p. 120-130, 1990.

Ferreira, M.S.; Yanagihara, J.I., A thermoregulatory model of the human body: exposure to hot environment. Anais do 14º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, 1997.

Gagge, A.P.; Stolwijk, J.A.J.; Nishi, Y., An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. ASHRAE Transactions, v. 77:247-62, 1971.

Prek, M., Thermodynamical Analysis of Human Thermal Comfort, Energy, v. 31, p. 732-743, 2006.