

Transferência de calor, oxigênio e dióxido de carbono nos membros do corpo humano

Cyro Albuquerque Neto, Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental, Escola Politécnica, USP,
e-mail: cyro.albuquerque@poli.usp.br

Jurandir Itizio Yanagihara, Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental, Escola Politécnica, USP,
e-mail: jurandir.yanagihara@poli.usp.br

Introdução

Desde a metade do século passado, diversos modelos matemáticos do sistema térmico e do sistema respiratório do corpo humano foram desenvolvidos. As interações entre esses dois sistemas são conhecidas, porém, só nos dias de hoje, estão sendo modeladas matematicamente.

O presente trabalho mostra alguns aspectos importantes na modelagem matemática dessas interações, aplicadas aos membros do corpo humano. Está dividido em duas partes, o transporte nos tecidos e o transporte no sangue. Tem como base três trabalhos realizados no mesmo laboratório: o modelo do sistema respiratório de Albuquerque-Neto (2005), o modelo do sistema térmico de Ferreira (2001) e o modelo do transporte de oxigênio (O₂) e dióxido de carbono (CO₂) de Turri (2006).

Transporte nos tecidos

Os tecidos presentes no corpo humano têm características de transporte particulares. A pele está em contato com o ambiente e tem fluxo sanguíneo variável. A gordura tem baixa condutividade térmica. O músculo armazena O₂ quimicamente. O osso tem fluxo sanguíneo desprezível.

Os membros são representados por segmentos cilíndricos ou esféricos, com camadas internas para cada tipo de tecido.

A geração de energia no corpo humano (metabolismo) é realizada através da oxidação de alguns compostos com ligações entre carbono e hidrogênio. CO₂, calor e água são gerados como produto. A relação entre o O₂ consumido, a produção de CO₂ e de calor depende do tipo de tecido. O metabolismo também é afetado pela influência da temperatura nas reações químicas.

O O₂ é armazenado dissolvido nos tecidos. Nos músculos, também está ligado com a mioglobina (representada por uma curva de dissociação em função da temperatura). O CO₂ é armazenado dissolvido e como íon bicarbonato. Como esse mecanismo é complexo, sua representação é feita por um único coeficiente, a inclinação da curva de dissociação do CO₂, diferente para cada tipo de tecido.

No contato da pele com o ambiente ocorre transferência de calor por convecção, radiação e evaporação.

A aplicação da equação de condução de calor nos tecidos já foi bastante estudada. Inclui a geração metabólica de calor e o transporte de calor pelo sangue nos pequenos vasos. O sangue que irriga os tecidos vem do sangue arterial presente nos grandes vasos.

Saindo dos tecidos, mistura com o sangue venoso. A equação, em coordenadas cilíndricas, é a seguinte:

$$\rho_t c_{p,t} \frac{\partial T_t}{\partial t} = k_t \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_t}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2} \right] + \hat{V}_{bl} \rho_{bl} c_{p,bl} (T_{ar} - T_t) + \hat{q}_t$$

onde ρ_t é massa específica do tecido, $c_{p,t}$ calor específico do tecido, T_t temperatura do tecido, k_t condutividade térmica do tecido, \hat{V}_{bl} vazão de sangue no tecido, ρ_{bl} massa específica do sangue, $c_{p,bl}$ calor específico do sangue, T_{ar} temperatura do sangue arterial e \hat{q}_t geração de calor.

A equação de transporte dos gases nos tecidos considera a passagem de sangue e o consumo ou geração do gás. Como a quantidade de gás nos pequenos vasos é grande, os volumes de sangue e tecido são separados, com a mesma pressão parcial dos gases. A seguinte equação representa o transporte dos gases nos tecidos (desconsiderando o processo de difusão):

$$\frac{1}{V_t} \left[V_{bl} \frac{\partial C_{g,bl}}{\partial P_{g,t}} + (V_t - V_{bl}) \frac{\partial C_{g,t}}{\partial P_{g,t}} \right] \frac{\partial P_{g,t}}{\partial t} = \hat{V}_{bl} (C_{g,ar} - C_{g,t}) + \hat{V}_{g,t}$$

onde g é gás (O₂ ou CO₂), V_t volume do tecido, V_{bl} volume de sangue nos pequenos vasos, $C_{g,bl}$ concentração do gás no sangue, $P_{g,t}$ pressão parcial do gás no tecido, $C_{g,t}$ concentração do gás no tecido, $C_{g,ar}$ concentração do gás no sangue arterial, $\hat{V}_{g,t}$ geração do gás.

Transporte no sangue

Grande parte do O₂ transportado pelo sangue está reagida com a hemoglobina e uma pequena parte está dissolvida no plasma. O CO₂ é transportado dissolvido, reagido com a hemoglobina e como íon bicarbonato.

As relações entre as pressões parciais dos gases e suas concentrações são necessárias para solucionar as equações de transporte dos gases, nos tecidos e no sangue. Na literatura encontram-se diversos modelos. Os mais completos consideram a influência da temperatura.

A Figura 1 mostra a influência da temperatura na curva de dissociação do O₂, que relaciona a saturação das hemoglobinas com a pressão parcial de O₂.

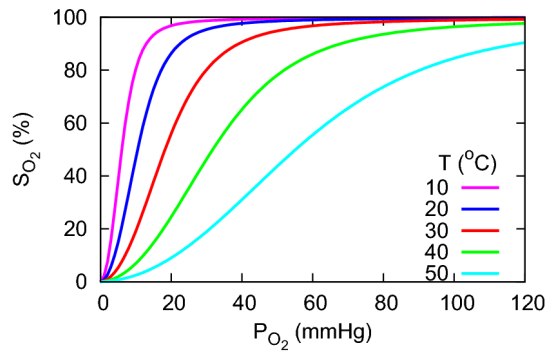


Figura 1: Curva de dissociação do O₂.

O sangue presente em cada membro do corpo humano é dividido em pequenos e grandes vasos. Os grandes vasos são representados por compartimentos, arterial e venoso, com transferência de calor entre eles. As variações da temperatura e da concentração de O₂ e CO₂ são representadas por equações diferenciais ordinárias obtidas a partir de balanços de calor e massa. Entre os compartimentos o sangue passa pelos pequenos vasos, em equilíbrio com os tecidos (mesma temperatura e pressão parcial dos gases).

Solução

A discretização das equações é feita com o método dos volumes finitos. A geração da malha estruturada respeita a geometria das camadas e o sistema de coordenadas. Caso esse seja cilíndrico, os volumes tridimensionais têm seus limites na direção do raio r , do ângulo θ e do comprimento z . As fronteiras dos volumes coincidem com as das camadas.

Um programa na linguagem C++ foi desenvolvido para solucionar as equações do modelo.

Resultados

As figuras a seguir mostram alguns resultados em regime permanente, para uma seção transversal do antebraço humano. É composto por camadas representando músculo, osso, gordura e pele. As Figuras 2, 3 e 4 mostram, respectivamente, a distribuição de temperatura, pressão parcial de O₂ e pressão parcial de CO₂. Como o fluxo sanguíneo é desprezível no osso e na gordura, não são considerados nos dois últimos casos.

A influência da variação da temperatura na distribuição de O₂ e CO₂ pode ser observada na região dos músculos. No caso do O₂, a variação da pressão parcial acompanha a variação da temperatura. Com as condições do sangue de entrada constantes e em regime permanente, essa variação está principalmente relacionada com a curva de dissociação do O₂ (Figura 1). Para uma mesma saturação de O₂, a pressão parcial de O₂ aumenta conforme aumenta a temperatura. Com a variação do CO₂, ocorre um processo semelhante.

Considerações finais

Nesse trabalho foram apresentados brevemente diversos aspectos da interação entre o transporte de calor e dos gases O₂ e CO₂ nos membros do corpo humano.

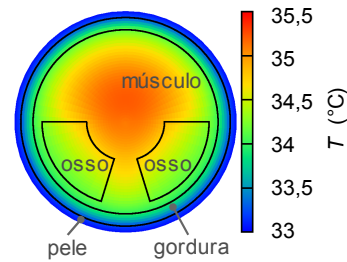


Figura 2: Variação da temperatura em seção transversal do antebraço.

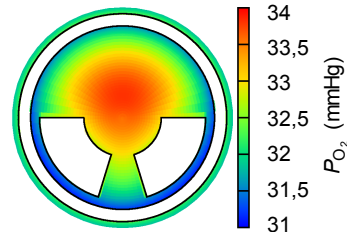


Figura 3: Variação da pressão parcial de O₂ em seção transversal do antebraço.

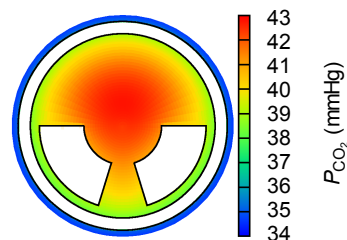


Figura 4: Variação da pressão parcial de CO₂ em seção transversal do antebraço.

Embora só os aspectos diretamente relacionados com os fenômenos de transporte tenham sido discutidos, a modelagem dos membros deve ainda considerar os mecanismos de regulação do corpo humano: mecanismo vasomotor, débito cardíaco, sudorese e calafrio.

A modelagem dos mecanismos apresentados fazem parte de um projeto maior em desenvolvimento, onde a modelagem da transferência de calor e dos gases respiratórios representará todo o corpo humano.

Referências bibliográficas

- Albuquerque-Neto, C., Um modelo do transporte de monóxido de carbono no sistema respiratório do corpo humano. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005
- Ferreira, M.S., Um modelo do sistema térmico do corpo humano. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001
- Turri, F., Análise teórico-experimental do transporte de oxigênio e gás carbônico em oxigenadores de sangue. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006