

Como o corpo humano mantém sua temperatura durante a atividade física

O ser humano é homeotérmico, isto é, possui a capacidade de manter a temperatura corporal dentro de uma faixa razoavelmente estreita (em torno de 36,5 °C)¹, apesar das variações térmicas do ambiente. O equilíbrio térmico é conseguido através do balanço entre a perda e a produção ou aquisição de calor.

Parte da energia liberada pelo funcionamento normal dos órgãos internos e pelos músculos durante a atividade física é energia térmica (calor). Uma pessoa em repouso libera a cada segundo uma quantidade de calor correspondente a cerca de 90 joules. Ao se praticar exercício, a velocidade de produção de calor pelo músculo aumenta em função da intensidade do exercício, que transitoriamente é maior que a velocidade de dissipação de calor do músculo. O primeiro meio utilizado para remover o calor dos músculos durante o exercício é a sua transferência (por condução) para o sangue. A velocidade de transferência do calor é proporcional ao produto do fluxo sanguíneo local e à diferença de temperatura entre o músculo e o sangue arterial. Desta maneira, grande parte do calor produzido pelos músculos trabalhados é transferida para o resto do organismo pela circulação. Quando isso ocorre, a temperatura interna como um todo começa a se elevar, desencadeando reflexos fisiológicos que promovem um aumento da transferência do calor interno para a pele e desta para o meio ambiente. Estes reflexos servem para diminuir e eventualmente cessar o aumento da temperatura do organismo, pois seu aquecimento excessivo durante o exercício reduz a eficiência do sistema circulatório,

O ser humano é homeotérmico (possui a capacidade de manter a temperatura corporal dentro de uma faixa razoavelmente estreita, apesar das variações térmicas do ambiente). O equilíbrio térmico é conseguido através do balanço entre a perda e a produção ou aquisição de calor

limitando a capacidade do coração de liberar sangue oxigenado na velocidade necessária para a pele e para os músculos. Portanto os mecanismos de transferência de calor para o ambiente são fundamentais para a fisiologia humana.

Estando o ambiente externo a uma temperatura mais baixa que a temperatura corporal, há três mecanismos básicos pelos quais se dá a perda de calor para o ambiente: condução, irradiação e, caso a temperatura da pele atinja 37,0 °C, disparando os mecanismos de controle homeostático do hipotálamo, a transpiração [1].

Condução

A transferência de calor por condução ocorre na medida em que o corpo, a uma temperatura maior do que a ambiente, transfere energia através da pele e aquece o ar a sua volta. Nesse caso a transferência se dá molécula a molécula, e portanto depende não apenas da área exposta ao ar mas também dos tipos de moléculas e das formas pelas quais elas estão ligadas e interagem entre si. Esta dependência está expressa pela constante de proporcionalidade k (condutividade térmica do material) na equação básica da condução

$$\frac{Q}{\Delta t} = kA \frac{(T_{\text{corpo}} - T_{\text{ar}})}{d}$$

onde o fluxo de calor transferido por condução (à esquerda) é proporcional à área exposta e ao gradiente de temperatura, no caso entre a pele e o ar ambiente [2]. A distância d representa portanto a distância (no ar) ao longo da qual a temperatura cai da temperatura da pele para a temperatura ambiente. Assumindo uma estima-

.....
Fernanda Luz, Marina Azevedo e Raíza Oliveira

Alunas da 3ª série do ensino médio do Colégio de Aplicação, Universidade Federal do Rio de Janeiro (CAp-UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Roberto Pimentel

Professor de física do Colégio de Aplicação, Universidade Federal do Rio de Janeiro (CAp-UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

E-mail: beto@if.ufrj.br
.....

O corpo humano troca calor com o ambiente através de três processos básicos: condução, irradiação e transpiração. Este último processo constitui a ferramenta básica do organismo para a manutenção de uma temperatura corporal aproximadamente constante. Ele é disparado não apenas quando a temperatura externa é maior do que a temperatura corporal, mas também quando o calor gerado internamente devido à realização de atividades físicas demanda um aumento da taxa com que o corpo perde calor para o ambiente. Monitorou-se não só o aumento da temperatura corporal com a intensidade da atividade física realizada por uma pessoa, mas também a relação entre a frequência cardíaca e a temperatura, destacando uma defasagem que ocorre entre a diminuição da primeira e da segunda à medida em que a intensidade da atividade física é reduzida. Para realizar as medições, usou-se um termômetro eletrônico construído e calibrado pelas autoras dentro do curso de física da 2ª série do ensino médio.

tiva de 5 cm para esta distância, considerando 2 m² como a área exposta do corpo de uma pessoa média e tomando o valor da condutividade térmica do ar ($k_{\text{ar}} = 5,7 \times 10^{-5} \text{ cal}/(\text{s}\cdot\text{cm}\cdot^{\circ}\text{C})$), obtemos uma perda de calor por condução de aproximadamente 10,5 W para uma pessoa exposta ao ar em repouso a 23,0 °C [3].

Irradiação

Todo corpo irradia (e absorve) energia na forma de ondas eletromagnéticas. O fluxo de calor irradiado por um corpo pode ser calculado pela lei de Stefan-Boltzmann

$$\frac{Q}{\Delta t} = \sigma \epsilon A T^4,$$

onde T é a temperatura do corpo em kelvins e A sua área em m². σ é uma constante universal, a constante de Stefan-Boltzmann, e vale $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$. ϵ é a emitância do material considerado. Para o corpo humano podemos considerar $\epsilon = 0,97$.

Entretanto, o corpo não apenas emite calor na forma de radiação eletromagnética como também a absorve do meio externo. A perda "líquida" de calor depende então da temperatura do ar ambiente. Podemos ajustar a lei de Stefan-Boltzmann para levar em consideração a radiação absorvida da seguinte forma

$$\frac{Q}{\Delta t} = \sigma \epsilon A (T_{\text{corpo}}^4 - T_{\text{ar}}^4).$$

Assim podemos calcular que a mesma pessoa, na mesma condição ambiente do cálculo anterior, também estará perdendo 133 W "líquidos" por irradiação. A perda por irradiação, pelo menos neste caso, é portanto muito mais relevante que a perda por condução.

Transpiração

Quando não estamos fazendo exercício físico, se a temperatura ambiente subir acima da temperatura corporal, boa parte da umidade da pele evapora (no mínimo 600 g por dia), "roubando" cerca de 17 W do corpo. Em casos extremos é possível perder até 1,5 litro por hora, levando a perda de calor em uma taxa de quase 2,4 kW! Isso mostra o quão importante (e eficiente) é o processo da transpiração na regulação da temperatura do corpo.

Mesmo no caso mais comum da temperatura ambiente estar abaixo da temperatura corporal, a atividade física intensa pode chegar a um ponto em que as perdas por condução e irradiação não são suficientes para dar vazão à produção interna de calor do corpo. Quando a pele atinge uma temperatura de cerca de 37,0 °C, co-

meçamos a suar. A transpiração é um importante mecanismo de controle da temperatura do corpo². Ela faz uso do alto calor de vaporização da água (580 cal/g a 37°C)³ para retirar quantidades apreciáveis de calor do corpo.

Medição da temperatura corporal durante exercícios físicos

No laboratório de informática do CAP-UFRJ, a uma temperatura ambiente controlada de aproximadamente 23 °C e ar relativamente seco (ar-condicionado), as autoras fizeram uma série de exercícios, de intensidade crescente: 10 min em repouso sentadas (A), 2 min andando rápido (B), 2 min trotando (C), 3 min fazendo deslocamentos laterais (D), e 3 min subindo e descendo de uma cadeira (E). Ao final da série, passavam 5 min andando devagar (F), diminuindo o ritmo, até retornar finalmente ao repouso por mais 5 min (G).

Ao longo dos exercícios, mediu-se a temperatura com o termômetro digital preso a uma das axilas. Os batimentos cardíacos foram medidos simultaneamente através de um freqüencímetro comercial (aparelho utilizado para monitorar a freqüência cardíaca), posto na altura do peito, local onde se consegue sentir bem as pulsações do coração. Junto com esse aparelho vem um relógio digital próprio, que nos mostra a freqüência dos batimentos.

O termômetro digital construído pelo grupo foi conectado a um computador através da porta de jogos (DB-15) e mediu-se a resistência com o auxílio de

um programa específico.⁴ Com o computador, a resistência do sensor (termistor)⁵ pôde ser medida praticamente a cada instante. Esta resistência pode ser convertida em valores de temperatura porque conhecemos a relação entre as duas grandezas para o termistor

$$R(T) = ae^{\frac{b}{T}},$$

em que as constantes a e b são próprias de cada termistor e podem ser determinadas experimentalmente (calibração)⁶. A função inversa

$$T(R) = \frac{b}{\ln \frac{R}{a}}$$

nos dá a temperatura em função dos valores de resistência lidos [4]. Os gráficos a seguir mostram os resultados obtidos.

A temperatura começa estável⁷ e aumenta progressivamente à medida que a atividade física vai ficando mais intensa

(Fig. 1). A fase E, que corresponde à atividade física mais intensa (subindo e descendo rapidamente de uma cadeira) corresponde à temperatura mais alta alcançada, em torno de 37,5 °C. Note que, devido à transpiração, a temperatura se estabiliza neste patamar mesmo com a continuação do exercício.

Quando não estamos fazendo exercício físico, se a temperatura ambiente subir acima da temperatura corporal, a transpiração faz com que boa parte da umidade da pele evapore (no mínimo 600 g por dia), "roubando" cerca de 17 W do corpo. Em casos extremos é possível perder até 1,5 litro por hora, levando a perda de calor a uma taxa de quase 2,4 kW!

O monitoramento da freqüência cardíaca no mesmo período mostra uma repetição do comportamento observado para a temperatura (Fig. 2), com algumas pequenas diferenças. No começo quase não há variação na freqüência cardíaca, mas a partir dos 10 min (fase B), quando a pessoa começa a andar rapidamente, os batimentos sobem bastante. Nos últimos

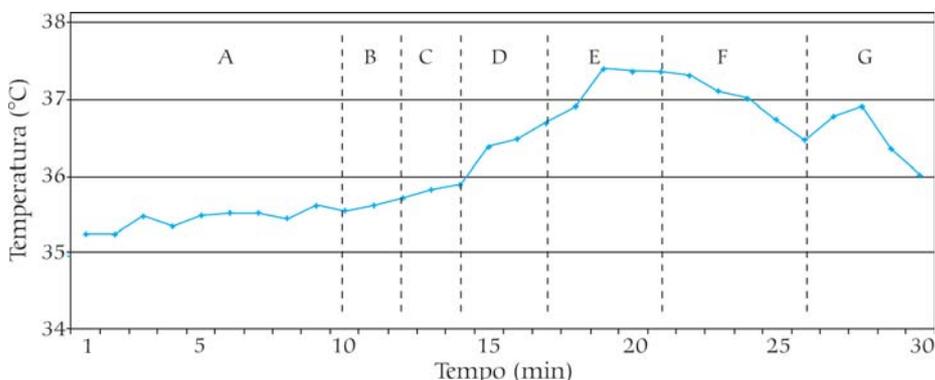


Figura 1 – variação da temperatura corporal (axila) ao longo da série de exercícios realizada.

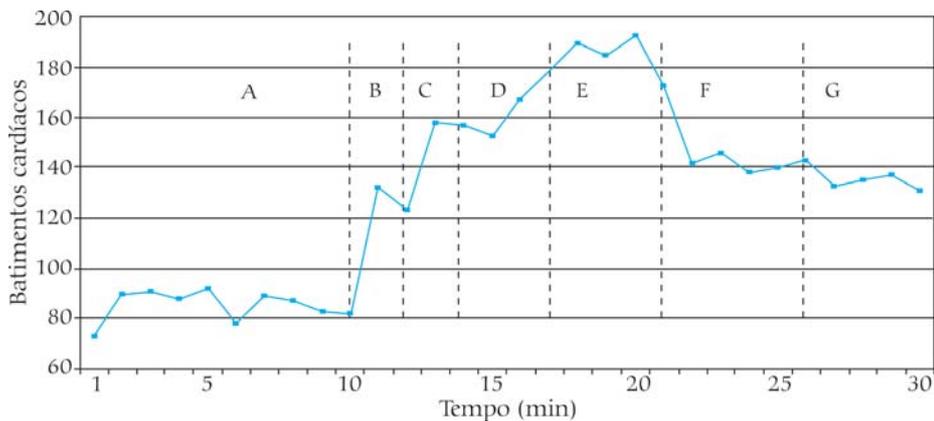


Figura 2 – Variação da frequência cardíaca (em batimentos por minuto) ao longo da série de exercícios realizada.

10 min os batimentos caíram brusca-mente logo que os exercícios encerraram-se, mas depois foram se estabilizando.

Está bem nítida a correlação entre temperatura e frequência cardíaca. Quando os batimentos estão baixos (entre 80 e 100 batimentos por minuto) a temperatura não varia nem um grau Celsius, pois quase não há uma variação da frequência. Já quando há um aumento grande da frequência a temperatura também fica muito mais alta. É interessante perceber que a temperatura não cai tão rapidamente quanto a frequência cardíaca ao final da série de exercícios: quando a frequência abaixou para cerca de 130 ou 140 batimentos por minuto (fase F) a temperatura ainda se manteve alta por algum tempo antes de começar a baixar – em torno de 37,0 °C. Isso significa que a temperatura não “retorna” pelo mesmo caminho à medida que diminuimos a intensidade do exercício, apresentando portanto um efeito de histerese. Por exemplo, em duas situações diferentes (fases B e F), a frequência é de aproximadamente 140 batimentos por minuto, mas com mais de 1,0 °C de diferença entre uma situação e outra.

Conclusão

Se a pessoa estiver com um Índice de Massa Corporal (IMC)⁸ normal, isto é, entre 18,5 e 25 kg/m², seu peso e sua altura não fazem muita diferença na evolução da temperatura. Caso ela esteja fora desta faixa, no entanto, a sua relação superfície-volume provavelmente causará uma diferença. Porém, o que provavelmente mais influencia o perfil da evolução da temperatura e principalmente dos batimentos cardíacos são os hábitos de cada um: no caso de uma pessoa sedentária, o coração vai ter que bombear o sangue a uma velocidade maior do que se ela praticasse alguma atividade, pois ela já estaria acostumada aos exercícios e assim os batimentos não aumentariam tanto [5]. Além disso, no caso da pessoa sedentária, os batimentos cardíacos

O que provavelmente mais influencia o perfil da evolução da temperatura e dos batimentos cardíacos de quem faz exercícios são os hábitos de cada um. No caso de uma pessoa sedentária, o coração vai ter que bombear o sangue a uma velocidade maior do que se ela praticasse alguma atividade, pois ela já estaria acostumada aos exercícios e assim os batimentos não aumentariam tanto

demorariam mais tempo para diminuir e voltar ao normal. A influência de ambos os fatores (IMC e sedentarismo) pode ser estudada pelo método apresentado, o que constitui uma perspectiva de continuação do trabalho.

O trabalho de finalização do curso de física da segunda série do ensino médio do CAP-UFRJ de 2006 envolveu a elaboração de um projeto original baseado no uso de um termômetro digital construído e calibrado previamente pelas alunas como trabalho de grupo do bimestre anterior. A proposta realizada consistiu em estudar os processos pelos quais o corpo troca calor com o meio ambiente e relacionar a variação da temperatura corporal com a frequência cardíaca em diferentes situações: em repouso e praticando exercícios físicos de diferentes intensidades.

Além do caráter transdisciplinar do projeto, que envolveu a articulação de conhecimentos de física do calor com os conteúdos desenvolvidos no curso de matemática sobre as funções exponenciais e logarítmicas e os tópicos de saúde e fisiologia abordados no

curso de educação física, a proposta de trabalho de grupo é relevante no contexto do ensino de física por três outros motivos. O primeiro diz respeito ao caráter experimental do projeto, que supre a deficiência de um espaço específico para esse tipo de pesquisa (laboratório). O segundo reme-

te à importância de relacionar elementos da tecnologia e do dia-a-dia dos alunos (computadores, softwares, eletrônica, termologia, fisiologia e atividades físicas) entre si e com os conteúdos desenvolvidos nas disciplinas escolares. Por último, a proposta relativamente aberta constitui uma atividade de natureza criativa e de caráter cooperativo. O trabalho em grupo pode ser desenvolvido fora do horário de aula, em casa ou na escola, atingindo os interesses de cada grupo de alunos [6].

Agradecimentos

Agradecemos a Ananias Neto e João Faria, alunos do CAP-UFRJ, bem como ao licenciando em física Bernardo Medina. O professor de educação física do CAP-UFRJ, Marcos Pimentel, criou a série de exercícios. Agradecemos ainda ao professor de biologia Igor França, do CAP-UFRJ, pelas dicas de fisiologia, e, finalmente, ao professor Carlos Eduardo Aguiar, do Instituto

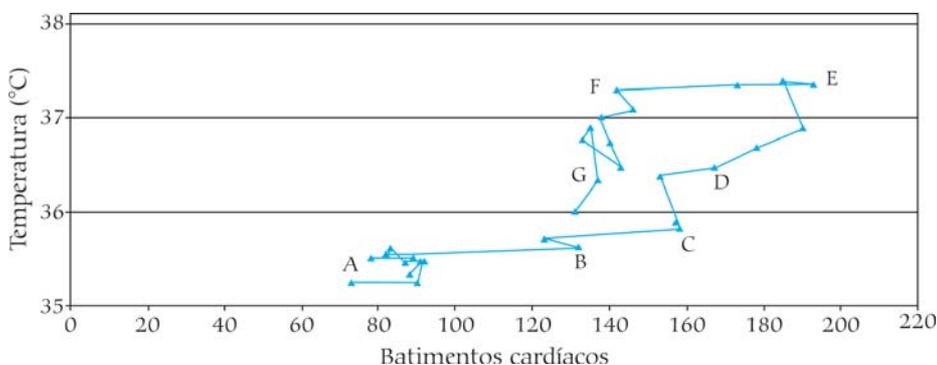


Figura 3 – Correlação entre frequência cardíaca (em batimentos por minuto) e temperatura corporal ao longo da série de exercícios realizada.

de Física da UFRJ, pelas sugestões relativas ao texto.

Notas

¹A temperatura da pele é, no entanto, cerca de dois a três graus mais baixa, em geral.

²Parte do calor é perdido através da umidade do ar exalado na respiração.

³O calor latente de vaporização da água é 540 cal/g no ponto de ebulição, mas a temperaturas mais baixas ele é significativamente maior, dado que as energias de ligação entre as moléculas de água são maiores a temperaturas mais baixas.

⁴O programa utilizado foi o AqDados 2.0 desenvolvido por Ives Solano Araujo (UFRGS) e disponível pela internet em

<http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/software/Aqdados20.zip>.

⁵Elemento de circuito cuja resistência elétrica varia fortemente com a temperatura.

⁶Isto já havia sido feito previamente. Para tanto basta tomar duas temperaturas dentro da faixa de operação do termistor e montar um sistema de equações em que as únicas variáveis são a e b .

⁷A incerteza da calibração é da ordem de 2 °C, portanto o valor em torno de 35,3 °C não deve ser estranhado.

⁸O IMC é um parâmetro fisiológico de uso rotineiro, e é calculado como a razão entre a massa em quilogramas e o quadrado da altura, em metros, de uma pessoa [7].

Referências

- [1] E. Okuno, I.L. Cadas e C. Chow, *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas* (Editora Harbra, São Paulo, 1982), cap. 11.
- [2] L.A. Guimarães e M. Fonte Boa, *Física para o Ensino Médio, Termologia e Óptica* (Editora Galera HiperMídia, Niterói, 2006).
- [3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/coobod.html#c1> (Hyper Physics).
- [4] <http://omnis.if.ufrj.br/~carlos/cap/capjoystick.html>.
- [5] <http://www.gssiweb.com/> (Gatorade Sports Science Institute).
- [6] B. Medina, *Termometria Através do Computador; Projeto de Instrumentação Para o Ensino (trabalho final de licenciatura)* (IF, UFRJ, 2006).
- [7] <http://www.copacabanarunners.net/imc.html>.

É ouro! Brasil campeão da XIII Olimpíada Ibero-Americana de Física

No dia 4 de outubro voltou do México a equipe brasileira da Olimpíada Brasileira de Física (OBF) que participou da XIII Olimpíada Ibero-americana de Física (OIbF). A XIII OIbF ocorreu de 28 de setembro a 3 de outubro, em Morélia, no México, com a participação de 68 estudantes de 19 países. Nossa equipe, selecionada e preparada pela Olimpíada Brasileira de Física, foi formada pelos estudantes Mariana Quezado Costa Lima, George Gondim Ribeiro, Leonardo Mendes Valério Almeida e Deric de Albuquerque Simão e conquistou três medalhas de ouro e uma de prata. A delegação brasileira foi acompanhada pelo Prof. Carlito Lariucci, do Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás. Além das medalhas, a Equipe Brasileira obteve a melhor nota nas provas experimental e teórica, e a primeira posição na classificação geral.

O resultado obtido na XIII OIbF é fruto do trabalho que a Sociedade Brasileira de

Física (SBF) vem realizando por meio da Olimpíada Brasileira de Física, através da Comissão Nacional e das Coordenações Estaduais, com o apoio do CNPq. Foi na edição da OBF 2006 que esses estudantes começaram sua maratona de estudos. Desde então, eles receberam orientação de seus professores, dos coordenadores estaduais da OBF, além de terem feito diversas provas seletivas sob a orientação da Comissão de Preparação. Antes da viagem ao México eles ainda passaram por um treinamento intensivo no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, em São Carlos, sob a Coordenação do Prof. Euclides Marega Júnior, da Comissão de Preparação.

Nossos parabéns à delegação, aos Colégios e Professores que apoiam a Olimpíada Brasileira de Física e dela participam, e a toda a equipe – Coordenadores Estaduais, Secretaria da OBF – que fez o acompanhamento e preparação dos estudantes.



Equipe OIbF: da direita para esquerda, Deric de Albuquerque Simão (Medalha de Prata), Leonardo Mendes V. Almeida, George Gondim Ribeiro e Mariana Quezado Costa Lima (Medalhas de Ouro).



Maiores informações:

<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xviii/>