

# **Termodinâmica em Sistemas Biológicos**

Prof. Romildo Nogueira

## **1. Fundamentos da lógica da organização do universo e a manifestação da vida.**

A física quântica revelou que o universo não é estável quanto supunha os princípios mecânicos e atômicos. As leis da natureza, imutáveis e previsíveis na perspectiva clássica das dimensões macroscópicas, não se aplicam à dimensão microscópica, o que sugere que, a nível subatômico, a realidade é probabilística.

A ruptura decisiva da física quântica com a física clássica, ocorrido em 1927, com os princípios da incerteza e da complementaridade. O princípio da incerteza de Heisenberg estabelece que não se pode conhecer, ao mesmo tempo, a posição e a velocidade de uma dada partícula. O princípio da complementaridade afirma que a matéria ora se apresenta como partícula, ora como onda. Ao contrário do que formulava a visão clássica essas propriedades não são excludentes, mas complementares. Em suma, há mais conexões do que exclusões entre os fenômenos que o racionalismo cartesiano pretende distintos e contraditórios.

Um universo que foi, a princípio, considerado pela ciência como dominado por uma ordem imperturbável: estável, regular e previsível. Neste universo, onde as estrelas estavam sempre nos mesmos lugares; os planetas descreviam, incessantemente, as mesmas órbitas; os ciclos de vida, tanto animal quanto vegetal, se reproduziam, de forma repetitiva, ao longo dos tempos, na multiplicação e na renovação das espécies.

Entretanto, num segundo olhar, a ciência desvendou uma outra realidade: a de um universo - desde a sua origem - sujeito à dispersão, à expansão, sujeito a revoluções e em contínua evolução. Nele, as estrelas nascem, explodem e morrem e acidentes ecológicos e geo-climáticos ocasionam perdas e destruição,

**perturbando e modificando a evolução das espécies e as interações nos ecossistemas. Entretanto, esses incidentes que, a princípio, pareciam só desordem, propiciam uma nova ordem no comportamento do universo.**

**Paul Valery afirma que duas calamidades ameaçam o mundo: a ordem e a desordem. Na verdade, tanto uma quanto à outra, isoladas, seriam catastróficas. Um universo determinista, em que reinasse a ordem pura, seria semelhante a uma máquina, sem novidades, sem criação, sem devir, enfim engessado, e com poucas possibilidades de crescimento. Da mesma forma, um universo regido pela desordem não chegaria à organização, pois seria incapaz de manter e conduzir a novidade e, por conseguinte, seria incapaz de levar uma evolução para frente. “Um mundo absolutamente determinado, tanto quanto um completamente aleatório, é pobre e mutilado; o primeiro, incapaz de evoluir, e o segundo de nascer” (Edgar Morin).**

**O cosmos e a vida surgiram em condições de turbulência, de erupção e de tormenta, portanto em condições de desordem. Essa desordem, derivada de um calor intenso, significa uma agitação desordenada das partículas e dos átomos, que, aleatoriamente se encontram, dando origem à formação de galáxias e da própria vida.**

**Somos todos vivos e não-vivos constituídos da mesma essência. Os seres vivos são constituídos de moléculas desprovidas de vida. Essas moléculas, quando isoladas e examinadas individualmente comportam-se de maneira idêntica a matéria inanimada. Apesar disso, os organismos vivos apresentam atributos peculiares, os quais não são encontrados nos aglomerados de matéria inanimada.**

**Alguns atributos são inerentes aos seres vivos: são complexos e altamente organizados em relação à matéria inanimada; cada parte componente de um organismo vivo tem função específica; tem capacidade de extrair e transformar a energia de seu meio ambiente, a qual eles usam para construir e manter suas intrincadas estruturas, a partir de materiais primários simples (são negentrópicos); tem capacidade de efetuar auto-replicação.**

**A matéria inanimada não tem essa capacidade de utilizar a energia externa para manter sua própria organização estrutural. Ao absorver energia a matéria inanimada geralmente passa para uma situação de maior desordem (são entrópicos).**

**Como os organismos vivos constituídos de moléculas intrinsecamente inanimadas, difere tão radicalmente da matéria não-viva?**

**Por que razão os organismos vivos parecem ser mais do que a soma de seus componentes inanimados?**

**Os filósofos antigos responderiam que os organismos vivos são dotados de uma força vital (vitalismo), que tem sido rejeitada pela ciência moderna. Na atualidade a bioquímica e a biofísica molecular tem como objetivo central determinar como os agregados de moléculas inanimadas, que constituem os seres vivos, interagem entre si para manter e perpetuar a condição vital.**

**As moléculas encontradas na matéria viva, denominadas de biomoléculas, apresentam composição química qualitativamente diferente do meio físico em que vivem. A maioria dos componentes químicos dos organismos vivos é de natureza orgânica. Essas moléculas são ricas em carbono, oxigênio e nitrogênio. Em contraste, os elementos carbono e nitrogênio não são abundantes na matéria inanimada.**

**Os compostos orgânicos presentes na matéria viva ocorrem numa extraordinária variedade e muitos deles são extremamente complexos. Mesmo uma bactéria, uma célula bastante simples, como a *Escherichia coli* contém cerca de 5 mil compostos. No organismo humano, deve existir cerca de 100 mil proteínas diferentes. Além disso, existe uma grande diversidade protéica nos diferentes organismos, de maneira que nenhuma das moléculas protéicas da bactéria *E. coli* é idêntica a qualquer uma das proteínas encontradas no homem, ainda que algumas funcionem de maneira muito semelhante. De fato, cada espécie de organismo tem seu conjunto próprio, quimicamente distinto, de moléculas de proteínas e ácidos nucleicos. Considerando o número de espécies de seres vivos existentes, é uma tentativa inútil tentar isolar, identificar e**

sintetizar todas as moléculas orgânicas encontradas na matéria viva. Por outro lado, a bioquímica e a biofísica molecular tem mostrado que as biomoléculas são formadas por uma lógica bastante simples. As proteínas, por exemplo, consistem de cadeias de aminoácidos ligados covalentemente. São compostos pequenos e de estrutura conhecida e somente vinte categorias diferentes deles são encontrados nas proteínas, que ao se organizarem em diferentes seqüências podem formar a enorme variedade de proteínas existentes nos seres vivos. De maneira similar, todos os diferentes ácidos nucléicos (DNA e RNA) encontrados nos seres vivos são feitos somente por oito monômeros primários, denominados nucleotídeos. Portanto, a lógica molecular da condição vital, parece obedecer aos seguintes axiomas: existe uma simplicidade básica na organização molecular dos seres vivos e existe um princípio básico de economia molecular, que permite ao seres vivos conter as moléculas mais simples possíveis e o menor número possível delas. Existe só o suficiente para permitir a aquisição dos atributos da vida e da identidade específica nas condições ambientais vigentes para ela.

## 2. Transformações de energia nos seres vivos.

A complexidade molecular e a ordem estrutural dos organismos vivos, em contraste com a estrutura ao acaso da matéria inanimada, têm implicações profundas na maneira como o ser vivo transforma a energia absorvida do seu meio para se manter organizado.

Uma breve revisão dos princípios da termodinâmica será realizada como o objetivo de mostrar como o ser vivo utiliza a energia do meio ambiente na sua organização molecular. Isto é contrária, a matéria inanimada que ao absorver energia se desorganiza.

A Termodinâmica surgiu com o advento da revolução industrial, onde o interesse principal era a possibilidade de transformação de calor em trabalho, assim como, à eficiência das máquinas térmicas nesse processo. O princípio da equivalência descoberto por Mayer (1842), foi fundamental na compreensão da

relação quantitativa entre calor e trabalho, e portanto nos processos de produção de trabalho a partir do calor. Segundo este princípio, num processo termodinâmico cíclico, a quantidade total de trabalho dividida pela quantidade total de calor é igual a um valor constante, denominado equivalente mecânico do calor. Se o trabalho e o calor forem medidos em Joule a sua razão é igual à unidade.

$W_{\text{total}} / Q_{\text{total}} = 1$ , ou  $Q_{\text{total}} - W_{\text{total}} = 0$ , ou seja a diferença entre o calor total e o trabalho total num processo termodinâmico cíclico é zero.

Num processo cíclico termodinâmico, quando a variação de uma certa grandeza é nula, diz-se que tal grandeza é uma função de estado. Portanto,  $Q_{\text{total}} - W_{\text{total}}$  é uma função de estado e é denominada de energia interna.

Clausius chamou o princípio da equivalência entre calor e trabalho de primeiro princípio da termodinâmica e o enunciou nos seguintes termos: “Em todos os processos cíclicos em que o calor produz trabalho, consome-se uma quantidade de calor igual ao trabalho produzido, e vice-versa, ao gastar uma certa quantidade de trabalho, obtém-se uma mesma quantidade de calor”.

A primeira lei da termodinâmica é também chamada lei da conservação da energia e é, comumente, anunciada na seguinte forma:

$$\Delta E = Q - W,$$

onde  $\Delta E$  é a energia interna do sistema e  $Q$  o calor fornecido e  $W$  o trabalho realizado pelo sistema.

O primeiro princípio da termodinâmica nada afirma a respeito da possibilidade de uma dada transformação se realizar e nem informa sobre o sentido em que tal transformação pode evoluir.

O segundo princípio da termodinâmica afirma, segundo o enunciado de Clausius, que “é impossível que uma máquina cíclica possa produzir, como único efeito, a transmissão contínua de calor de um corpo de menor temperatura a outro de maior temperatura.”

Considerando uma fonte quente e uma fonte fria como um sistema, pode-se escrever:  $(Q_{\text{fonte quente} \rightarrow \text{sistema}} / T_{\text{fonte quente}}) + (Q_{\text{fonte fria} \leftarrow \text{sistema}} / T_{\text{fonte fria}}) = 0$ .

A quantidade  $Q / T$  é denominada de entropia, é também uma função de estado termodinâmica, ou seja é nula num processo cíclico.

A segunda lei da termodinâmica, do ponto de vista da mecânica estatística, estabelece que os processos físicos e químicos tendem para um aumento da desordem no universo ou da sua entropia. Por exemplo, se é colocado uma gota de um soluto num solvente a tendência natural é a gota se difundir dentro do solvente. Desta maneira, a gota ao se espalhar no interior do solvente não pode mais se organizar em forma de uma gota, aumentando a desordem do sistema. Nesse caso diz-se que o sistema (solvente + soluto) teve sua entropia aumentada. Observe que gota ao se difundir teve sua energia (armazenada no gradiente químico) transformada em energia cinética para difusão do soluto, e portanto o gradiente de energia armazenada se perde no decorrer do processo. Os processos naturais nunca ocorrem de modo a reduzir a desordem global do universo, ou a sua entropia. Como é então que os seres vivos podem criar e manter sua estrutura extremamente ordenada e complexa num meio ambiente que é está sempre aumentando a sua desordem?

Os organismos vivos não constituem exceções às leis da termodinâmica. Eles incorporam, de seu meio ambiente, uma forma de energia que pode ser utilizada por eles nas condições especiais de temperatura e pressão nas quais vivem (energia livre) e, em seguida, repõe ao meio ambiente uma quantidade equivalente de energia em forma, menos utilizável (calor e outras formas de energia). A modalidade utilizável de energia que as células incorporam é denominada energia livre, que pode, ser definida como o tipo de energia capaz de produzir trabalho em condições de temperatura e pressão constantes.

No formalismo termodinâmico a energia livre (de Gibbs) é uma função de estado definida pela combinação das seguintes funções de estado:  $G = E + PV - TS$ , onde  $E$  é a energia interna,  $PV$  o produto da pressão pelo volume e  $TS$  o produto da temperatura pela entropia. Portanto, num sistema onde a temperatura e a pressão estão constantes ou seja, onde possam variar somente

a energia interna, o volume e a entropia, a variável pertinente na avaliação da espontaneidade e do equilíbrio é a energia livre  $G$ . Essa grandeza quando expressa por mol, recebe o nome de potencial químico, e será bastante usado no estudo do transporte de substâncias, seja em meios homogêneos ou heterogêneos.

O meio ambiente dos seres vivos é absolutamente essencial para eles, não somente como uma fonte de energia livre, mas também como uma fonte de matérias-primas. Os organismos vivos são sistemas abertos, pois trocam tanto energia como matéria com o meio ambiente e, ao fazerem isso, transformam ambos. É uma característica dos sistemas abertos o fato deles não estarem em equilíbrio com os seus meios ambientes. Ainda que os organismos vivos pareçam estar em equilíbrio, uma vez que eles não apresentam modificações visíveis, em realidade, eles se encontram em estado estacionário.

### **3. Equilíbrio versus homeostasia.**

Na natureza, os diversos processos, como por exemplo, a queda de um corpo no campo gravitacional, o movimento de uma carga positiva no sentido do campo elétrico e a difusão de um corante num líquido, ocorre sem a influência de um agente externo e sempre no sentido que é o da espontaneidade. Os processos espontâneos buscam os estados de mínima energia e máxima entropia (são entrópicos). Por outro lado, os processos não espontâneos, como por exemplo, a subida de um corpo no campo gravitacional, o movimento de uma carga positiva contrária ao sentido de um campo elétrico, não ocorrem natureza, a menos que agentes externos aos processos tenham participação. Esses processos não-espontâneos não levam o sistema ao equilíbrio e são negentrópicos. Processos com essas características, ocorrem sempre acoplados a processos espontâneos. Quando dois processos estão acoplados aquele que evolui no sentido da espontaneidade recebe o nome de processo movente e o que evolui no sentido não-espontâneo é denominado processo movido.

Um processo só ocorre na natureza, ou seja só há movimento de matéria se existirem “forças” associadas a esses processos. O processo movente evolui a favor da força ao qual ele está relacionado e o processo movido no sentido contrário dela.

Se as forças forem iguais tem-se o equilíbrio do sistema, caracterizado pela ausência da evolução no tempo de qualquer um dos dois processos (movente e movido).

Os seres vivos não se encontram em equilíbrio com o seu meio ambiente, porém em estado estacionário. Esse estado se caracteriza por uma condição de equilíbrio aparente de uma parte do sistema, onde as variáveis de estado características (concentração, densidade, temperatura, volume, etc.), se mantêm inalteradas com o tempo às custas de outros processos. Assim, o nível da água num reservatório poderá não mudar com o tempo porque não entra nem sai água do mesmo (equilíbrio) ou porque a quantidade de água que sai é bombeada de volta (estado estacionário).

As células mantêm seus gradientes eletroquímicos às custas de um processo dinâmico (estacionário), onde a degradação do gradiente eletroquímico de cada íon é compensada por transporte ativo desse íon (com consumo de ATP). Esse processo dinâmico que ocorre nos seres vivos é denominado de homeostasia. A vida se mantém devido a processos homeostáticos e não a processos envolvendo o equilíbrio com o meio ambiente. Equilíbrio celular significa a sua morte. Viver é lutar contra a condição de equilíbrio.

A maquinaria de transformação de energia dos seres vivos é construída inteiramente de moléculas orgânicas frágeis e instáveis, que são incapazes de resistir a temperaturas elevadas, correntes elétricas intensas, ou condições extremamente ácidas ou básicas. A célula viva é também essencialmente isotérmica; a qualquer tempo, todas as partes da célula têm praticamente a mesma temperatura. Além disso, não existem diferenças significantes de pressão entre uma parte e a outra da célula. Por essas razões, as células são incapazes de utilizar o calor como fonte de energia. As células vivas, portanto, não se assemelham às máquinas térmicas ou elétricas, com as quais estamos familiarizados. Ao contrário, elas obedecem a um outro importante axioma da lógica molecular da condição vital: as células funcionam como máquinas isotérmicas. A energia que as células absorvem de seu meio ambiente é armazenada na forma de energia química, cuja utilização permite a realização do trabalho químico envolvido na biossíntese de

componentes celulares, o trabalho osmótico necessário para o transporte de materiais na célula, o trabalho mecânico da contração e locomoção.

#### 4. Temperatura e calor

O conceito de temperatura é intuitivo e está sempre associado à sensação de quente e frio e sua medida é realizada observando-se a expansão de uma coluna de mercúrio, instrumento denominado de termômetro. A idéia de expansão de um determinado volume associado com o aumento da temperatura induz à proporcionalidade entre temperatura (T) e energia cinética translacional média das moléculas (EC) do material que se expande na coluna do termômetro. Considerando, por simplicidade, um termômetro a gás a relação entre a temperatura (T) e a energia cinética média translacional das moléculas do gás  $(EC)_m$  pode ser expressa da seguinte forma:

$$(EC)_m = (3/2) kT,$$

onde k é constante de Boltzmann. Portanto, a temperatura de um sistema está relacionada à energia cinética média translacional das suas moléculas.

A temperatura de um corpo varia quando ele recebe ou fornece “calor”. As moléculas de um corpo estão em constante agitação térmica e são responsáveis por sua energia térmica. Quando o corpo recebe ou cede calor, há um aumento ou diminuição dessa energia térmica, indicado pela variação de sua temperatura. Quando um sistema mantém sua temperatura constante é porque sua energia térmica não varia, e portanto o corpo nem cedeu nem recebeu “calor”. Então, o calor pode ser entendido como a energia que transita entre corpos de diferentes temperaturas colocados em contato, reduzindo a energia térmica de uns e aumentando a energia térmica de outros.

O calor sempre flui do corpo quente para o frio e a quantidade de calor trocada Q, durante a variação de temperatura  $\Delta t$  de um corpo, depende de sua massa, da própria variação da temperatura e do material de que ele é constituído. Assim,

$$Q = mc\Delta t,$$

Onde a constante  $c$  é denominada de calor específico e varia de um material para outro. O calor específico é a quantidade de calor necessária para elevar 1 grama de uma certa substância de 1 °C . O calor específico da água é 1 cal / (g. °C) enquanto o calor específico do ar é 0,17 cal / (g. °C).

Como o homem mantém sua temperatura corporal? O homem mantém, a despeito das variações da temperatura ambiente, a sua temperatura interna entre 36,7 e 37°C, quando medida na boca, ou entre 37,3 e 37,6 °C para medições retais. Isso se deve à existência de mecanismos reguladores que controlam eficientemente a produção e a eliminação do calor corporal. Em ambientes frios, o calor gerado no interior do corpo deve ser conservado, enquanto nos ambientes quentes deve ser dissipado para o meio. A temperatura interna do corpo depende, assim, desse balanço. Os animais que são capazes de controlar a própria temperatura interna são chamados homeotermos.

O homem é um animal homeotermo (sangue quente). Claude Bernard (1876), demonstrou que, nos animais expostos ao frio, o calor corporal era produzido pela contração muscular (termogênese mecânica) e pelas reações bioquímicas exotérmicas (termogênese química).

A termogênese mecânica está baseada na produção de calor que ocorre durante o calafrio. O calafrio é uma resposta muscular apresentada por muitos animais, entre os quais o homem, quando são subitamente expostos ao frio. Pode também ser observado nos estados febris, quando a temperatura corporal ascende rapidamente.

O calafrio é caracterizado por uma contração desordenada dos músculos esqueléticos. Trata-se de uma resposta involuntária e, durante a sua ocorrência, o consumo de oxigênio pode elevar-se de 2 a 5 vezes. O calafrio é resultante de uma atividade nervosa descontrolada. Isso foi mostrado, por Cottle & Carlson, (1954), quando aboliram o calafrio bloqueando a transmissão neuromuscular, usando o curare. Além disso, o uso da fenesina,

droga que atua principalmente na medula, abole também o calafrio, por inibir os neurônios motores (Griggio, 1982).

Os animais homeotermos nem sempre utilizam a termogênese mecânica durante a adaptação ao frio. Pequenos animais (ratos), aclimatados ao frio conseguem produzir calor suficiente para suas necessidades térmicas, pelo uso da termogênese química, ou seja, aumentando seu metabolismo interno. O próprio homem, quando submetido a um ambiente que se esfria vagarosamente, pode compensar a sua demanda de calor, por esse mecanismo.

A termogênese química, apesar de mais lenta do que a termogênese mecânica, é o meio mais importante para manutenção da temperatura corporal. O calor é produzido no corpo humano pelas reações exotérmicas que ocorrem no metabolismo das gorduras, dos açúcares e das proteínas. As gorduras são uma fonte importante de energia térmica, sobretudo aquelas localizadas no tecido adiposo marrom. As células desse tecido convertem com facilidade a energia dos seus estoques. O tecido adiposo marrom existe em camundongo, hamster, macacos, humanos e outros animais.

Alguns animais não utilizam a termogênese mecânica durante a adaptação ao frio. Entre eles o cão, o coelho e a cobaia. O coelho faz a aclimatação ao frio, eriçando os pêlos, com o objetivo de criar uma camada de ar que funciona como isolante térmico.

Nos animais pecilotérmicos (sangue frio), grande parte da regulação da temperatura corporal consiste em alterações do comportamento, como a procura de locais quentes quando a temperatura cai. Isso implica restrições tanto do comportamento quanto do ambiente em que esses animais podem viver.

A produção de calor em situação de metabolismo basal é de aproximadamente 1,5 Kcal / min para um homem adulto com 70 Kg e com 1,8 m<sup>2</sup> de superfície corporal. O calor é gerado principalmente no fígado, cérebro, coração e músculos esqueléticos. Quando em atividade essa produção de calor pode elevar-se até 9,0 Kcal / min para um esforço muito elevado.

**O corpo humano perde calor (termólisis) pelos seguintes mecanismos:**

**Vaporização; Radiação; Convecção; Condução.**

Vaporização é a passagem de uma substância do estado líquido para o estado gasoso. A vaporização pode ocorrer por: i. ebulição que é uma vaporização rápida e turbulenta observada quando o líquido atinge a sua temperatura de ebulição; ii. calefação observada quando o líquido entra em contato com uma superfície superaquecida. Nesse caso, a vaporização é muito rápida e a temperatura do fluido permanece menor do que sua a sua temperatura de ebulição; iii. evaporação processo lento e realizado a baixa temperatura. No corpo humano, a vaporização se faz por evaporação da água pela pele e pelos pulmões.

**A perda de calor corporal por evaporação normalmente equivale à cerca de 20 a 25% do calor total perdido pelo corpo humano. Para cada grama de suor o corpo perde 0,58 Kcal. Nas febres e nas doenças onde ocorrem hiperventilação pulmonar por taquipnéia (respiração curta e acelerada), essa perda é muito aumentada. Nos grandes queimados, ao contrário, a perda de calor por evaporação está prejudicada. Isso ocorre porque a quantidade de líquido que chega à superfície do corpo é muito grande e não há tempo suficiente para sua completa evaporação. Ainda mais, o líquido é rico em proteínas, sobretudo albuminas, o que aumenta sua tensão superficial e prejudica, assim, a sua evaporação. Nesses pacientes, a redução da termólise por evaporação colabora para hipertermia que eles costumam apresentar.**

Na radiação o calor é dissipado por meio de ondas eletromagnéticas. Cerca de 60% da perda de calor corporal é feita por radiação. Todo corpo com temperatura maior do que 0 °C emite radiações eletromagnéticas (raios infravermelhos) devido a sua temperatura. O fluxo de calor resultante se dirige do corpo mais quente para o mais frio. Assim, a taxa de resfriamento de um corpo depende do seu poder emissivo. O fluxo de calor para o meio circundante será tanto maior, quanto maior for a área do emissor e maior for o gradiente térmico entre ele e o meio. A capacidade que a pele tem para receber calor do corpo e, em seguida, dissipa-lo sob forma de radiação eletromagnética é fundamental na transferência de calor entre o corpo e o meio.

Um fator importante na perda de calor por radiação é poder emissivo ou potência emissiva ( $P$ ) de um corpo que é a razão entre o fluxo ( $\varphi$ ) de calor que o corpo emite e a quantidade de calor por unidade de tempo ( $\varphi_n$ ) que seria emitida pelo corpo negro se estivesse submetido às mesmas condições experimentais, ou seja:

$$P = (\varphi) / (\varphi_n)$$

O corpo negro tem as propriedades de absorver totalmente as radiações recebidas, seja ela ultravioleta, luz visível ou infravermelho e emitir radiação de acordo com sua temperatura.

A pele humana, funciona como um irradiador de calor, emite raios infravermelhos com comprimentos de onda que vão de 5 a 20  $\mu\text{m}$ . A pele humana tem uma potência de irradiação igual a 97% daquela do corpo negro, independente da sua cor. Isso mostra que ela tem um excelente poder emissivo.

A pele é a principal fonte de radiação calorífica do corpo humano. O suprimento sanguíneo para esse órgão é abundante e está sob o controle do sistema nervoso central. Nas extremidades, em particular, existem muitas comunicações entre artérias e veias de pequeno calibre. Isso cria condições para a formação de grande fluxo sanguíneo, pois não tendo o sangue que percorrer os capilares, a resistência ao fluxo é baixa. Por esta razão, nas extremidades ocorre grande troca de calor com o meio ambiente.

As mudanças na temperatura ambiente alteram a circulação do sangue na superfície do corpo e isso se deve à liberação de mediadores químicos, tal como a acetilcolina. A temperatura da pele também pode ser alterada por reflexos nervosos. As informações, captadas pelos receptores de frio e de calor situados na pele, chegam ao cérebro através dos nervos sensitivos. Esses sinais são então processados e retornam aos vasos que estão na região do estímulo. Os nervos simpáticos e parassimpáticos conduzem esses estímulos e, assim, controlam a circulação sanguínea da região.

A convecção é a transferência de energia térmica de um sistema para outro que se faz através da movimentação de massas de fluido. Esse movimento provém da diferença entre o empuxo do meio e o peso das partículas do fluido. Quando o ar é

aquecido, ele se expande, aumentando o seu volume e reduzindo sua densidade. Isso faz com que a força de empuxo do meio se torne maior do que o peso da massa de ar expandido e, por conseguinte, a camada de ar é empurrada para cima. O inverso ocorre, quando o ar é resfriado. Assim, quando as moléculas de ar entram em contato com a pele e são aquecidas (por condução), elas se expandem rarefazendo o meio e criando os gradientes de temperatura necessários à formação das correntes de convecção. Por este mecanismo, o ar aquecido sobe e é substituído por uma massa de ar mais fria. O efeito refrigerador, que a convecção do ar exerce sobre a pele, foi chamado de clima privado.

Condução é a forma de transferir calor quando há contato direto entre um corpo frio e outro quente. A condução é importante quando se estuda a perda de calor através das roupas e em situações especiais, como as que ocorrem nos trabalhos ou nos esportes sob a água.

Uma equação para o fluxo de calor pode ser estabelecida. Considere uma barra condutora de calor, isolada do ambiente, ligada a dois corpos mantidos a temperaturas diferentes. A equação que permite calcular o fluxo ( $\Phi$ ) do calor que se propaga do corpo mais quente para o mais frio é :

$$\Phi = -k.S.dT/dX,$$

onde  $k$  é a constante de condutividade térmica da barra,  $S$  é a área da barra e  $dT/dX$  é o gradiente de temperatura ao longo da barra.. A condutividade térmica depende do material onde a condução está ocorrendo. A condutividade térmica do ar é igual a 0,026 cal/ m.s. °C, da borracha 0,372 cal/ m.s. °C, do cobre 401 cal/ m.s. °C e da pele 0,898 cal/ m.s. °C. Portanto, a condutividade do cobre é 15423,08 vezes maior que a do ar e a da pele 34,54. O ar tem uma baixíssima condutividade.

A termoregulação corporal.

A regulação da temperatura corporal depende do ajuste adequado entre a termogênese e a termólisis. Para isto, o organismo possui sensores que registram a temperatura superficial e interna e através dos centros de processamento disponibilizam os efeitores adequados e induzem a adoção de comportamentos próprios às diversas condições ambientais e do organismo.

Num ambiente confortável em repouso e com o corpo desnudo, a maior perda de energia se produz por radiação. Quando o organismo se encontra num ambiente de temperatura elevada ou durante o exercício, aumenta o fluxo da circulação periférica por vasodilatação, o qual favorece o transporte de calor do interior para a superfície corporal por convecção. O esquentamento da pele produz uma maior irradiação. Além disso, diminui a circulação de retorno dos membros pelas veias profundas e, portanto, se reduz a troca de calor em contracorrente, aumentando a temperatura interna e provocando aumento da sudorese.

A resposta ao frio consiste em vasoconstrição periférica, desvio da circulação de retorno dos membros através das veias profundas, aumento da atividade muscular e da taxa metabólica. No homem a proteção contra o frio mais importante se constitui no abrigo, o qual é resultado de um comportamento.

As relações entre os sensores, os centros de processamento e os efetores são descritos em detalhes nos tratados de Fisiologia e não será tratado neste texto.