

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

UM MODELO DINÂMICO DO SISTEMA VASOMOTOR DE

REGULAÇÃO DA TEMPERATURA

CORPORAL

AUTOR: MAURÍCIO SILVA FERREIRA

ORIENTADOR: PROF.DR. JURANDIR ITIZO YANAGIHARA

1995

"Tudo vale a pena
Se a alma não é pequena."

Fernando Pessoa

A meus pais,

Nilson e Marilene,

pelo apoio e paciência durante
o longo caminho até a formatura.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jurandir Itizo Yanagihara pelo estímulo e orientação, ao meu pai e meu irmão, Nilson e Flavio e ao amigo, Fábio Guidugli, pelas sugestões e informações referentes à área médica.

SUMÁRIO

Lista de símbolos

Resumo

1. INTRODUÇÃO, 1

2. REVISÃO DA LITERATURA, 2

3. CONCEITOS BÁSICOS DE REGULAÇÃO TÉRMICA, 4

3.1. Temperatura corporal central e superficial, 4

3.2. Pele e anexos, 5

3.2.1. Epiderme, 6

3.2.2. Derme, 6

3.2.3. Hipoderme, 6

3.2.4. Vasos e nervos da pele, 7

3.2.5. Sistema isolante do corpo humano, 8

3.3. Regulação da temperatura corporal, 8

3.3.1. Mecanismos que reduzem a temperatura corporal, 10

3.3.1.a. Vasodilatação, 11

3.3.1.b. Sudorese, 12

3.3.1.c. Redução na produção de calor, 13

3.3.1.d. Evaporação insensível, 14

3.3.2. Mecanismos que elevam a temperatura corporal, 14

- 3.3.2.a. Vasoconstrição, 14
- 3.3.2.b. Estimulação hipotalâmica dos calafrios, 14
- 3.3.2.c. Excitação química simpática da produção de calor, 15
- 3.3.2.d. Maior produção de tiroxina, 16
- 3.4. Metabolismo energético, 16
 - 3.4.1. O conceito de metabolismo basal, 17
 - 3.4.2. Fatores que afetam o metabolismo energético, 17
 - 3.4.2.a. Exercício, 17
 - 3.4.2.b. Necessidades energéticas para as atividades diárias, 18
 - 3.4.2.c. Efeito de diferentes tipos de atividade, 18
 - 3.4.2.d. Ação dinâmica específica das proteínas, 19
 - 3.4.2.e. Idade, 19
 - 3.4.2.f. Clima, 20
 - 3.4.2.g. Sono, 21
 - 3.4.2.h. Outros fatores, 21

4. EQUACIONAMENTO, 22

- 4.1. Metabolismo, 22
- 4.2. Troca de Calor com o Meio Ambiente, 24
- 4.3. Condução, 24
- 4.4. Convecção, 25
 - 4.4.1. Convecção Natural, 25
 - 4.4.2. Convecção Forçada, 26

4.5. Radiação, 26

4.6. Evaporação Insensível, 27

4.7. Respiração, 28

4.7.1. Aumento da Umidade do Ar, 28

4.7.2. Aumento da Temperatura do Ar, 29

4.8. Evaporação, 30

5. MODELO DO CORPO HUMANO, 31

6. CÁLCULO DAS CONDIÇÕES DE REGIME PERMANENTE, 35

7. MODELAGEM DINÂMICA DO SISTEMA VASOMOTOR, 39

7.1. Epiderme, 39

7.2. Derme, 43

7.3. Núcleo, 46

7.4. Sangue, 50

7.5. Mecanismo de controle, 51

8. RESULTADOS, 54

9. DISCUSSÃO, 55

10. CONCLUSÕES, 57

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, 58

RESUMO

A compreensão de como se processa a regulação da temperatura corporal é fundamental para utilização em tratamento de tumores (hipertermia), doenças que envolvam estados febris e utilização em cirurgias (hipotermia). Dentre os principais mecanismos responsáveis pela manutenção da temperatura corporal destaca-se a regulação vasomotora.

Com o objetivo de contribuir com esse entendimento, o trabalho apresenta um modelo dinâmico, válido para a faixa de regulação vasomotora, que permite calcular as temperaturas de regime permanente dos diversos tecidos do corpo humano, e principalmente, possibilita a simulação em regime transitório das temperaturas do corpo humano, para variações na temperatura e umidade do ar, além de alterações no metabolismo devidas a exercícios físicos.

Para tanto, introduziu-se um capítulo específico dedicado aos aspectos anátomo-fisiológicos do organismo relevantes à elaboração do modelo matemático apresentado e que pode servir para construção de outros mais complexos.

1. INTRODUÇÃO

Uma das mais fascinantes características dos seres humanos, ou de uma forma mais geral dos mamíferos, constitui-se na capacidade de manutenção da temperatura interna do corpo dentro de limites bem estreitos. O chamado mecanismo de termorregulação é o responsável por esse fato. Esse fenômeno biológico é de vital importância para a manutenção da homeostase do organismo como um todo. Além disso, certas doenças acarretam alterações no funcionamento normal desse mecanismo; portanto, se faz necessária a perfeita compreensão da regulação da temperatura corporal. Aplicações nessa área estão relacionadas à utilização de processos de hipotermia e hipertermia no combate à doenças e utilização em cirurgias, além da análise de alterações fisiológicas em indivíduos com queimaduras.

A necessidade de um modelo matemático evidencia-se a partir da dificuldade ou até mesmo impossibilidade de realização de experimentos *in vivo*. A extensa pesquisa feita sobre o assunto revelou a ausência de um modelo desse tipo, que abrangesse não apenas os mecanismos de troca de calor em determinados tecidos ou entre os mesmos, como também o sistema de controle responsável pelos respectivos processos.

Pelo exposto, depreende-se que o objetivo do presente trabalho é fornecer subsídios concernentes a princípios básicos anátomo-fisiológicos como primeira fase da investigação, concorrendo para o, ulterior, estabelecimento de um modelo dinâmico do sistema vasomotor de regulação da temperatura corporal, que possivelmente servirá de base para outros mais complexos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O ponto de partida para a execução desta investigação baseou-se em YANG (1989), que fornece uma visão geral do equacionamento dos tecidos isoladamente em relação à transfêrencia de calor. Apresenta, também, uma idéia do nível atual do conhecimento físico sobre o mecanismo da termorregulação. Ficou evidente a necessidade da coleta de um maior número de informações, por isso consultou-se a BIREME (Biblioteca Regional de Medicina - Organização Panamericana de Saúde), que dispõe de uma base de dados em CD-ROM (Compact Disc - Read Only Memory), utilizando as seguintes palavras chaves :

- **thermoregulation**
- **body temperature regulation**
- **modeling**
- **models**
- **mathematics**

A pesquisa foi feita entre os anos de 1985 até 1995, buscando sempre a intersecção das palavras chaves, com a seleção de uma extensa lista de resumos de trabalhos. Após uma leitura cuidadosa selecionou-se os artigos de interesse sobre o assunto. A BIREME dispunha apenas dos trabalhos de ARKIN et al. (1994) e WERNER; BUSE (1988). Os demais foram obtidos através do SIBI (Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade de São Paulo).

O tema do presente trabalho pertence a uma área de interface entre a engenharia mecânica e a medicina, portanto foi necessário o estudo de aspectos fisiológicos e anatômicos da termorregulação. GUYTON (1992) representa a viga mestra sobre a qual elaborou-se o capítulo 3. Já, JUNQUEIRA; CARNEIRO

(1990), MACHADO (1993), ROHEN; YOKOCHI (1993) e YANG (1989) forneceram subsídios para complementar o capítulo 4. A partir de ROHEN; YOKOCHI (1993) e YANG (1989) estabeleceu-se um modelo geométrico representando o corpo humano.

Retirou-se de WERNER; BUSE (1988) todos os valores de propriedades físicas, massa e volume dos diversos órgãos e tecidos. De ARKIN et al. (1994) escolheu-se o modelo de Pennes para descrever o comportamento em relação à troca de calor entre os diversos tecidos e o sangue. De YANAGIHARA (1984) e HANNA; SCHERER (1986) retirou-se o equacionamento referente à troca de calor a partir da respiração. De outros trabalhos como, por exemplo, HODSON et al. (1986) resultou em uma melhor compreensão matemática de partes específicas integrantes do mecanismo de termorregulação.

3. CONCEITOS BÁSICOS DE REGULAÇÃO TÉRMICA

A introdução de um capítulo como este, que trata especificamente de assuntos ligados à área médica, é de suma importância para a compreensão do mecanismo de termorregulação. Procurou-se fazer um resumo voltado à modelagem a ser desenvolvida, bem como de fácil entendimento evitando ao máximo o uso de nomenclatura fisiológica específica, mantendo-se, entretanto, o rigor necessário.

3.1. Temperatura corporal central e superficial

A temperatura do interior do corpo ou central para pessoas em condições normais (sem enfermidade febril), mantém-se praticamente constante dentro de uma variação de $0,6^{\circ}\text{C}$. É importante salientar que a temperatura central é praticamente uniforme em todo o corpo. A temperatura superficial varia de acordo com a ambiental, portanto sujeita a maiores variações. Esta por si só é importante quando se trata da capacidade da pele na troca de calor. Quanto a uma temperatura corporal normal não existe um valor isolado.

Medidas realizadas em diversas pessoas normais acusaram uma faixa de variação normal dessas temperaturas (vide tabela 1). No entanto, considera-se a temperatura normal média como sendo de 37°C , isto quando medida oralmente; e o valor $0,6^{\circ}\text{C}$ maior quando tomada retalmente. Exercícios físicos e extremos de temperatura ambiental são responsáveis pela ligeira variação da temperatura corporal, uma vez que os mecanismos reguladores de temperatura não são 100% efetivos. Um exercício extenuante acarreta uma produção excessiva de calor, e a

temperatura retal pode então atingir valores entre 38,3°C a 40°C. Por outro lado, se o corpo estiver submetido a um frio extremo, a temperatura retal pode cair para valores inferiores a 36,6°C.

TABELA 1: LIMITES ESTIMADOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA CORPORAL EM PESSOAS NORMAIS.

Condição	Temperatura retal (°C)
exercício intenso	38,3 a 40
esforço intenso, emoção, uns poucos adultos normais, muitas crianças ativas	37,8 a 38,5
variação habitual do normal	36 a 37,8
clima frio	menos 36

FONTE: GUYTON (1992)

3.2. Pele e anexos

A pele recobre a superfície do corpo e é formada por duas porções, uma porção epitelial, a epiderme, e uma conjuntiva, a derme. A pele é um dos maiores órgãos, atingindo 16 % da massa corporal. Entre suas diversas funções encontra-se a proteção do organismo contra a perda de água por difusão (dessecação) e através de suas terminações nervosas, vasos, glândulas e tecido adiposo colabora na termorregulação do corpo. A participação da pele na regulação térmica é explicada em detalhes mais adiante.

3.2.1. Epiderme

A epiderme corresponde a parte mais externa da pele, sua espessura varia de acordo com o local considerado, sendo mais espessa na palma da mão e no pé, onde chega a atingir até 1,5 mm. A epiderme é responsável pela relativa impermeabilidade da pele, o que dificulta a evaporação de água pela sua superfície.

3.2.2. Derme

A derme é o tecido conjuntivo sobre o qual se apoia a epiderme. Ela apresenta espessura variável de acordo com a região, atingindo um máximo de 3mm na planta do pé. Sua superfície externa é extremamente irregular, observando-se saliências (papilas dérmicas) que acompanham as reentrâncias correspondentes da epiderme. Na derme é que são encontradas as glândulas sudoríparas, presentes em praticamente toda a pele. O suor secretado por essas glândulas é uma solução extremamente diluída, contendo pouca proteína, além de sódio, potássio, cloreto, uréia, amônia e ácido úrico.

3.2.3. Hipoderme

A hipoderme não faz parte da pele, é a camada responsável pelo deslizamento da mesma sobre as estruturas na qual se apoia. É nela que se encontra uma camada variável de tecido adiposo, o chamado panículo adiposo.

3.2.4. Vasos e nervos da pele

Os vasos arteriais que suprem a pele formam dois plexos, um no limite entre a derme e a hipoderme, e outro entre as camadas reticular e papilar da derme. Distinguem-se três plexos venosos na pele, dois na posição descrita para as artérias e mais um na região média da derme. Encontram-se, freqüentemente, na pele das mãos e dos pés anastomoses arteriovenosas, que nada mais são do que ligações diretas entre artérias e veias contribuindo para regular a circulação (vide figura 1). Quando a anastomose se contrai, o sangue é obrigado a passar todo pela rede capilar; quando a anastomose se relaxa, uma parte variável de sangue flui diretamente para a vênula, em vez de circular nos capilares. Admite-se que essas estruturas desempenhem um papel importante nos mecanismos de termorregulação do organismo.

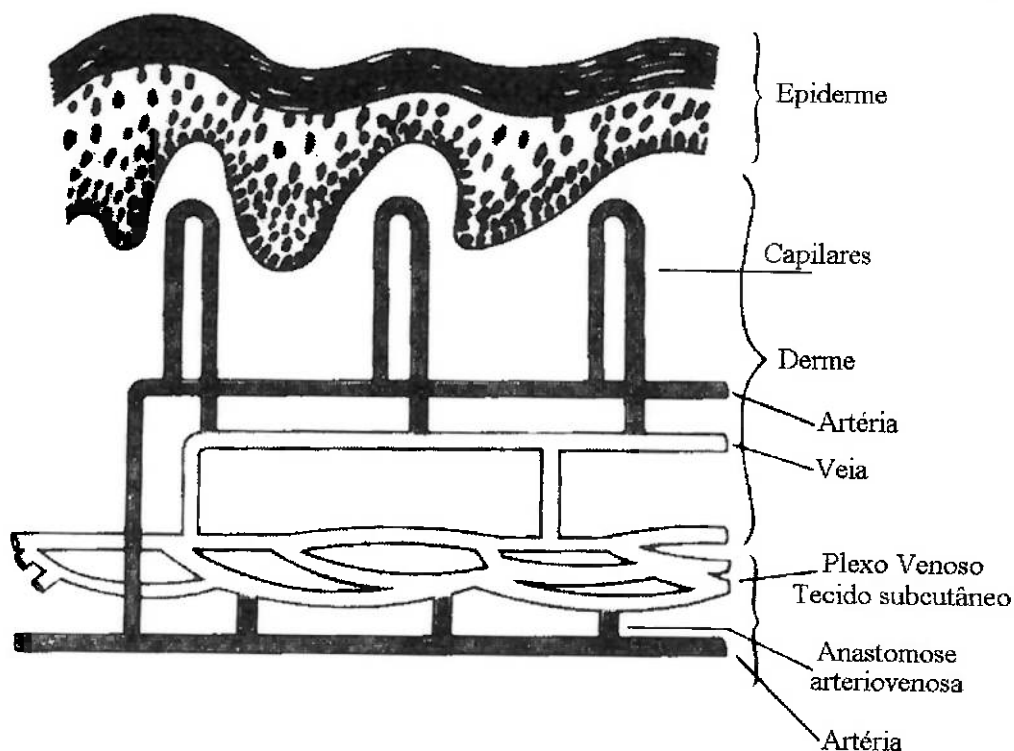


FIGURA 1: CIRCULAÇÃO CUTÂNEA

FONTE: GUYTON (1992)

3.2.5. Sistema isolante do corpo humano

A pele, a gordura e os tecidos subcutâneos constituem um isolante térmico para o corpo. Dos isolantes mencionados a gordura é particularmente importante, uma vez que possui a menor condutibilidade térmica. As propriedades isolantes variam com o sexo. Nas mulheres o isolamento é melhor do que nos homens. Naturalmente, a qualidade do isolamento varia de pessoa para pessoa, pois depende da quantidade de gordura subcutânea, cada milímetro de gordura permite que uma pessoa se sinta confortável em um ambiente de 1 a 1,5 °C mais frio.

A maior parte do calor corporal é produzida nas porções mais profundas do corpo, portanto o isolamento térmico localizado debaixo da pele constitui um importante fator na manutenção das temperaturas internas, apesar de permitir às temperaturas da pele se aproximarem daquela do ambiente.

3.3. Regulação da temperatura corporal

Da figura 2 observa-se que para uma variação da temperatura do ar (ar seco) entre 15,5 a 54,5°C, o corpo nu é capaz de manter indefinidamente uma temperatura corporal central em algum valor em torno de 36,6 a 37,6°C.

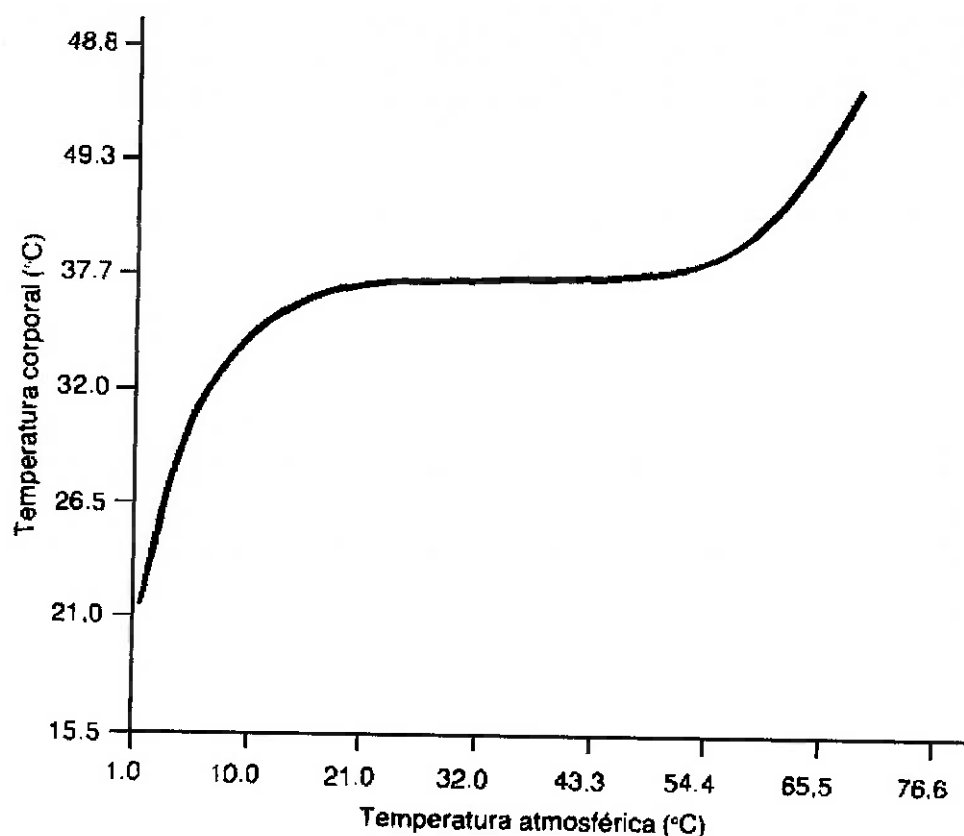


FIGURA 2: EFEITO DAS ALTAS E BAIXAS TEMPERATURAS ATMOSFÉRICAS SOBRE A TEMPERATURA CORPORAL INTERNA

FONTE: GUYTON (1992)

A temperatura é regulada quase inteiramente por mecanismos nervosos de retroalimentação, que em sua maioria operam através dos centros reguladores de temperatura localizados no hipotálamo. Para que este sistema possa funcionar é necessária a existência de detectores de temperatura. A área pré-óptica do hipotálamo possui um grande número de neurônios sensíveis ao calor e, aparentemente funcionam como sensores térmicos úteis ao controle da temperatura corporal. Eles aumentam sua frequência de descarga quando a temperatura se eleva. Existem também poucos neurônios sensíveis ao frio no hipotálamo, no septo e na substância reticular do mesencéfalo. Sensores sensíveis ao frio e também ao calor são encontrados na pele e em certos tecidos profundos

do corpo. Esses sensores produzem sinais que são transmitidos ao cérebro, onde neurônios do hipotálamo modificam suas frequências de descarga. Apesar dos sinais gerados pelos receptores térmicos do hipotálamo serem bem eficientes, outros sensores encontrados em outras partes do corpo também desempenham papéis importantes na regulação da temperatura. Isso é particularmente verdadeiro para os receptores térmicos presentes na pele e em outros tecidos profundos do corpo. A pele possui muito mais receptores ao frio do que ao calor (até dez vezes mais), portanto a identificação de temperaturas periféricas está relacionada em sua maior parte à detecção de temperaturas baixas. Os receptores térmicos profundos são encontrados em apenas algumas partes do corpo, principalmente na medula espinhal, vísceras abdominais e dentro ou ao redor das grandes veias. Esses receptores ficam expostos à temperatura corporal central, provavelmente ligados à prevenção da hipotermia, uma vez que são receptores ao frio. Esses sinais chegam ao hipotálamo só que não estimulam a área pré-óptica, e sim uma área localizada bilateralmente no hipotálamo superior. Os sinais termostáticos oriundos da área pré-óptica também são transmitidos para essa área posterior do hipotálamo. Os sinais são então combinados para desencadear as reações do corpo destinadas a produzir ou perder calor. O mecanismo global para o controle térmico pelo hipotálamo é denominado termostato hipotalâmico.

3.3.1. Mecanismos que reduzem a temperatura corporal

O termostato hipotalâmico, detectando a temperatura corporal excessivamente elevada ou baixa, adota procedimentos apropriados destinados a reduzir ou aumentar o calor trocado. No caso descrever-se-á os procedimentos que aumentam a troca de calor com o ambiente.

3.3.1.a. Vasodilatação

Os vasos sanguíneos penetram através dos tecidos isolantes subcutâneos e se distribuem precisamente nas porções subpapilares. Imediatamente abaixo da pele existe um plexo venoso contínuo que é irrigado por um influxo de sangue. Nas partes do corpo mais expostas, tais quais as mãos, os pés e as orelhas, o sangue é fornecido através de anastomoses arteriovenosas diretas das arteríolas para as veias. O fluxo sanguíneo no interior desse plexo venoso pode variar de pouco mais de 0 até 30 % do débito cardíaco total. Um alto fluxo sanguíneo faz com que o calor seja conduzido das porções internas do corpo para a pele com grande eficiência, contribuindo para um aumento na temperatura da pele. A redução no fluxo sanguíneo promove o efeito inverso. O fluxo sanguíneo para a pele é o mais efetivo mecanismo de transferência de calor do centro corporal para a pele.

O controle da troca de calor para a pele é obtido pelo grau de vasoconstrição das arteríolas e das anastomoses arteriovenosas que fornecem sangue ao plexo venoso cutâneo. Essa vasoconstrição é controlada quase que inteiramente pelo sistema nervoso simpático.

Quando é necessária a redução do calor corporal, os vasos sanguíneos são intensamente dilatados, isso é causado pela inibição dos centros simpáticos no hipotálamo posterior que causam a vasoconstrição.

A regulação vasomotora ocorre para uma faixa de temperatura ambiental entre 25 a 29 °C. A 27 °C um ser humano em repouso e levemente vestido pode facilmente entrar em equilíbrio térmico com o ar estagnado.

3.3.1.b. Sudorese

A estimulação elétrica ou por excesso de calor da área pré-óptica do hipotálamo, produz impulsos que são transmitidos pelas vias autônomas para a medula e, daí, através da atividade efetora simpática para a pele de todo o corpo, causando transpiração. Nas mãos e nos pés pode haver transpiração localizada durante exercício físico ou em certos estados emocionais.

As glândulas sudoríparas são estruturas tubulares formadas por duas partes, uma porção espiralada subdérmica (inervada por nervo simpático) profunda que secreta suor e uma porção ductal que se dirige externamente através da derme e epiderme para a superfície da pele.

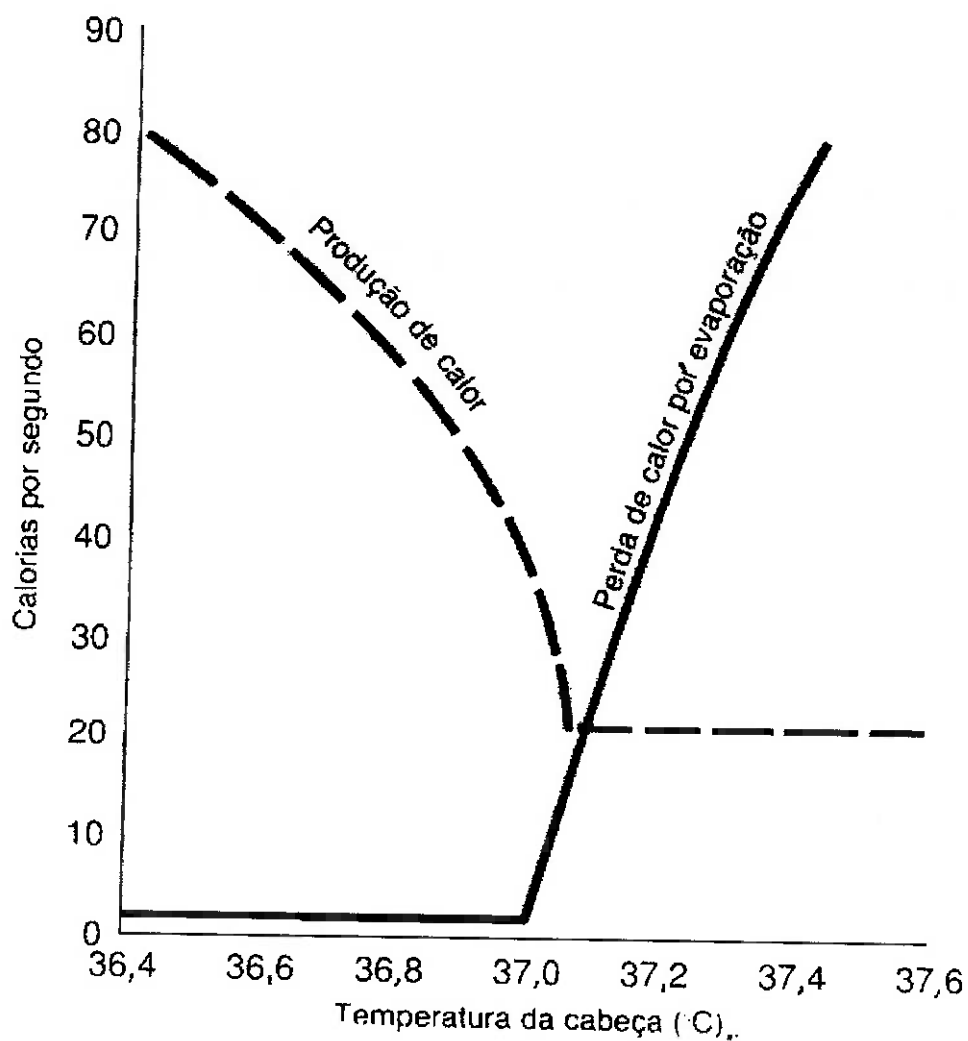
É importante mencionar que uma pessoa normal e não-aclimatada não consegue produzir mais do que aproximadamente 700 ml de suor por hora, porém, quando exposta a um ambiente quente por uma a seis semanas, a pessoa transpira cada vez mais profusamente, muitas vezes aumentando a produção máxima de suor para 1,5 a 2 litros por hora. Quando todo este suor se evapora, é removido dez vezes mais calor do que o valor do metabolismo basal normal. O aumento da eficácia do mecanismo sudoríparo é causado pelo crescimento direto da capacidade de transpiração das próprias glândulas sudoríparas.

A secreção de suor começa quando a temperatura do ar é de 31°C, isto para uma pessoa nua e em repouso, já para pessoas levemente vestidas esta temperatura é de 29°C.

O efeito do aumento da temperatura no sentido de causar sudorese é ilustrado na figura 3.

FIGURA 3: EFEITO DA TEMPERATURA HIPOTALÂMICA SOBRE: PERDA DE CALOR POR EVAPORAÇÃO DO CORPO, PRODUÇÃO DE CALOR CAUSADA PRINCIPALMENTE PELA ATIVIDADE MUSCULAR E PELOS CALAFRIOS

FONTE: GUYTON (1992)



3.3.1.c. Redução na produção de calor

Mecanismos produtores de calor, tais como calafrios e termogênese química (explicados a seguir) são fortemente inibidos.

3.3.1.d. Evaporação insensível

A água evapora insensivelmente a partir da pele e dos pulmões numa quantidade de aproximadamente 600 ml por dia. Na evaporação uma grande quantidade de calor é removida. Infelizmente, essa evaporação insensível de água não pode ser controlada com a finalidade de regulação térmica.

3.3.2. Mecanismos que elevam a temperatura corporal

Quando a temperatura do corpo humano está excessivamente baixa, o mecanismo de termorregulação adota os procedimentos descritos a seguir.

3.3.2.a. Vasoconstrição

A estimulação dos centros simpáticos hipotalâmicos posteriores faz com que ocorra a vasoconstrição cutânea em todo o corpo, diminuindo o fluxo sanguíneo para o plexo venoso cutâneo e fazendo com que menos calor seja transferido do centro do corpo para a pele, contribuindo para a diminuição da temperatura da pele.

3.3.2.b. Estimulação hipotalâmica dos calafrios

No hipotálamo existe uma área denominada centro motor primário para calafrios. Normalmente, esta área é inibida por sinais provenientes do centro de calor, na área termostática pré-óptica. O centro motor primário para calafrios é excitado por sinais frios provenientes da pele e da medula espinhal. Esse centro é

ativado quando a temperatura corporal cai abaixo do nível térmico crítico, (vide figura 3), sinais que causam calafrios são então transmitidos. Esses sinais não causam tremor muscular verdadeiro, aumentam apenas o tônus dos músculos esqueléticos. Quando o tônus se eleva acima de determinado nível crítico começam os calafrios.

Os calafrios nada mais são do que um fenômeno que converte trabalho em calor. Este fenômeno é acompanhado pelo aumento do consumo de oxigênio, da frequência respiratória e pressão do sangue, reações típicas ao frio. A temperatura ambiental correspondente ao início dos calafrios é chamada temperatura crítica. Para um ser humano nu esta temperatura é de 25°C.

3.3.2.c. Excitação química simpática da produção de calor

Conhecida como termogênese química, nada mais é do que o aumento imediato do metabolismo celular ocasionado por estimulação simpática e através de neurotransmissores. O grau de termogênese química é proporcional à quantidade de gordura marrom presente nos tecidos do animal, é um tipo de gordura que contém um grande número de mitocôndrias em suas células. Nos seres humanos adultos, que não possuem quase nenhuma gordura marrom, é raro que a termogênese química faça aumentar a produção de calor em mais de 10 a 15 %. Entretanto, nos lactentes, que possuem uma pequena quantidade de gordura marrom no espaço interescapular, a termogênese química pode fazer aumentar a taxa de produção de calor em até 100 %, o que provavelmente constitui um fator muito importante na manutenção da temperatura corporal normal no recém-nascido.

3.3.2.d. Maior produção de tiroxina

Quando há o resfriamento da área pré-óptica do hipotálamo, ocorre um aumento na produção do hormônio neurosecretor denominado hormônio liberador de tireotropina por parte do hipotálamo. Esse hormônio é levado até a adeno-hipófise onde estimula a secreção do hormônio tireostimulante, que por sua vez estimula uma maior produção de tiroxina pela glândula tireóide. A maior quantidade de tiroxina gera um aumento na taxa de metabolismo celular em todo o corpo. Esse aumento não ocorre imediatamente, leva várias semanas para que a glândula tireóide se hipertrofie antes de alcançar seu novo nível de secreção de tiroxina. E para a glândula tireóide se hipertrofiar é necessário que o ser humano se exponha ao frio extremo por várias semanas, mas raramente os seres humanos se permitem ficar tanto tempo expostos, portanto ainda não se sabe quantitativamente a importância do método tireóide de adaptação ao frio.

3.4. Metabolismo energético

Metabolismo é o conjunto de processos químicos que possibilitam a sobrevivência celular. A energia por eles liberada é proveniente da queima de carboidratos, gordura e proteínas. Na combustão utiliza-se oxigênio e há a produção de dióxido de carbono e água.

O corpo humano apresenta uma eficiência mecânica inferior a 20%. Portanto 80% da energia produzida pelo metabolismo tem de ser dissipada sob a forma de calor. A produção de calor pelo metabolismo pode ser medida por calorimetria direta ou indireta. O método da calorimetria direta consiste em colocar a pessoa dentro de um calorímetro e medir a quantidade de calor liberada pelo corpo. Na calorimetria indireta, a produção de calor é calculada a partir do consumo de oxigênio do organismo. O gasto metabólico pode então ser calculado

com precisão, uma vez que 95% da energia consumida pelo organismo é derivada da reação do oxigênio com os diferentes alimentos.

3.4.1. O conceito de metabolismo basal

Metabolismo basal é a velocidade de utilização da energia no organismo durante o repouso absoluto, mas com a pessoa acordada. A temperatura do ar deve estar entre 20 a 26,5°C.

3.4.2. Fatores que afetam o metabolismo energético

O metabolismo não é fixo, dependendo de uma série de fatores a seguir discriminados.

3.4.2.a. Exercício

O exercício extenuante é o fator que causa o efeito mais dramático sobre o gasto metabólico. Considerando-se o corpo inteiro, o exercício muscular máximo pode aumentar a produção global de calor do organismo por uns poucos segundos, cerca de 50 vezes o normal ou, se mantido por vários minutos, até quase 20 vezes o normal em um atleta bem treinado, o que representa um aumento de 2000 % no metabolismo normal.

3.4.2.b. Necessidades energéticas para as atividades diárias

Quando um homem de 70 kg fica o dia inteiro acamado, gasta cerca de 1650 quilocalorias; se ele senta numa cadeira durante todo o dia gasta cerca de 2000 quilocalorias. O processo de digestão em si consome um adicional de 200 quilocalorias. Na média a necessidade energética diária para um ser humano simplesmente existir gira em torno de 2000 quilocalorias.

3.4.2.c. Efeito de diferentes tipos de atividade

A tabela 2 ilustra o consumo de energia correspondente a diversos tipos de atividade.

TABELA 2: GASTO ENERGÉTICO POR HORA DURANTE TIPOS DIFERENTES DE ATIVIDADES EM UM HOMEM DE 70 KG

Forma de atividade	Kcal/hora
Dormindo	65
Sentado, em repouso	100
Em pé, relaxado	105
Exercício leve	170
Caminhando lentamente (4,82 km por hora)	200
Carpintaria	240
Pintura industrial	240
Exercício intenso	450
Nadando	500
Exercício muito intenso	600
Subindo escadas	1100

FONTE: GUYTON (1992)

3.4.2.d. Ação dinâmica específica das proteínas

Após a ingestão de uma refeição, a intensidade do metabolismo aumenta. Caso contenha grande quantidade de carboidratos ou gorduras, o metabolismo aumenta em cerca de 4 %. No entanto, após uma refeição com grandes quantidades de proteína, o metabolismo em geral começa a aumentar dentro de uma hora, e alcança um máximo de 30 % além do normal, e que persiste por três a doze horas.

4.2.e. Idade

A velocidade metabólica diminui com a idade, aspecto ilustrado na figura 4.

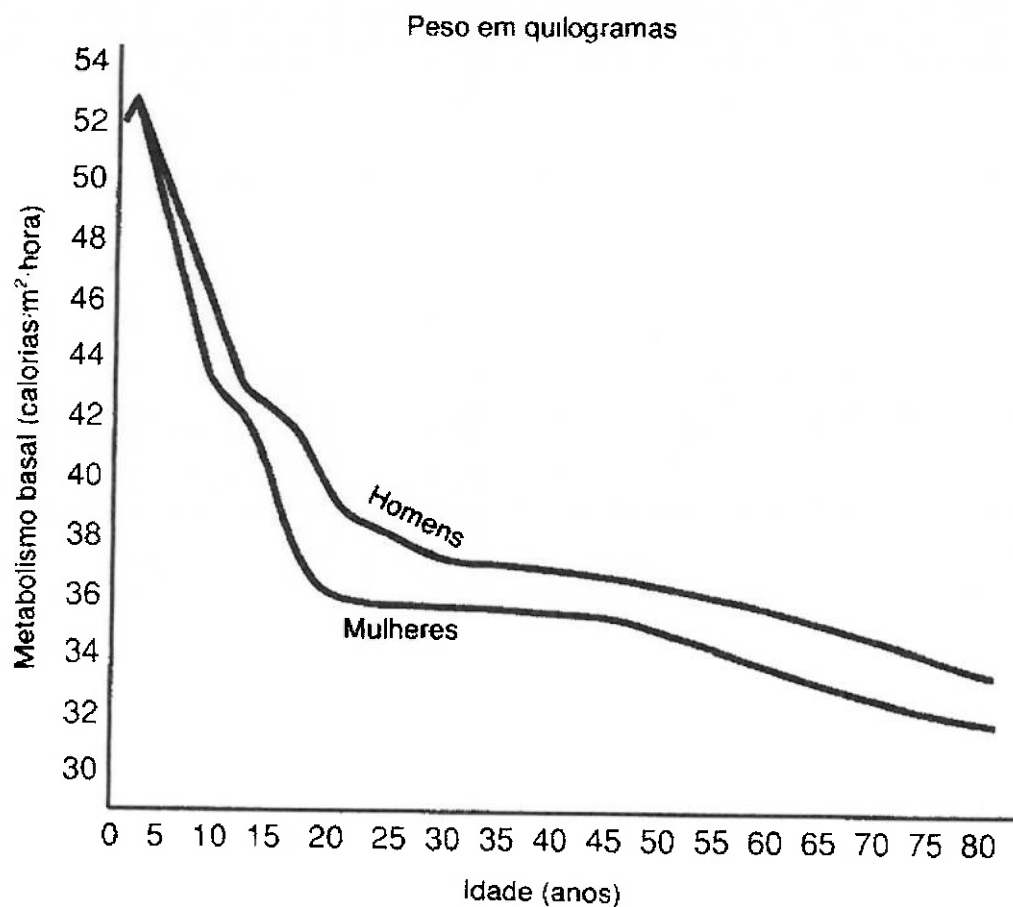


FIGURA 4: INTENSIDADES METABÓLICAS BASAIS NORMAIS EM DIFERENTES IDADES PARA CADA SEXO

FONTE: GUYTON (1992)

3.4.2.f. Clima

Estudos revelam que habitantes de regiões tropicais têm velocidades metabólicas de 15 a 20 % menores do que aqueles moradores do ártico. Essa diferença é devida à adaptação da glândula tireóide, cuja secreção.

respectivamente, aumenta ou diminui em climas frios ou quentes. Um aumento na secreção acarreta outro tanto no metabolismo.

3.4.2.g. Sono

Durante o sono ocorre uma queda na velocidade metabólica de aproximadamente 10 a 15% do normal; provavelmente se deve à diminuição do tônus da musculatura esquelética e, também da atividade do sistema nervoso simpático.

3.4.2.h. Outros fatores

Outros fatores como a termogênese sem calafrios (explicada anteriormente), o hormônio sexual masculino, o hormônio de crescimento, a febre e a desnutrição também influenciam o metabolismo energético.

4. EQUACIONAMENTO

Neste capítulo serão fornecidos os equacionamentos dos diversos fenômenos envolvidos no mecanismo de termorregulação. No capítulo 7 essas equações serão combinadas para formar o modelo.

4.1. Metabolismo

O metabolismo dos tecidos vivos pode ser modelado, para efeito de transferência de calor, como uma geração interna de calor uniformemente distribuída pelo volume do tecido em questão.

Na tabela 3 encontram-se os valores do metabolismo basal dos diversos tecidos e órgãos do corpo humano, bem como a correspondente massa e volume, porcentagem em massa e em volume. No item (4.2.c) encontra-se uma tabela que fornece o metabolismo do corpo humano para diversas atividades.

TABELA 3 - VOLUME, MASSA, DENSIDADE E METABOLISMO BASAL DOS TECIDOS E ÓRGÃOS.

Tecido	Volume (cm³)	Volume (%)	Massa (g)	Massa (%)	Densidade (g/cm³)	Metabolismo Basal (W)
<i>Pele</i>	3287	5,30	3562	5,30	1,085	1,210
<i>Músculo</i>	27688	44,1	30016	44,7	1,085	18,93
<i>Coração</i>	298	0,50	322	0,50	1,080	7,190
<i>Fígado</i>	1441	2,30	1557	2,30	1,080	20,77
<i>Pulmões</i>	1669	2,70	935	1,40	0,560	0,610
<i>Rim</i>	234	0,40	253	0,40	1,080	5,590
<i>Estômago</i>	1276	2,00	1225	1,80	0,960	0,470
<i>Intestino</i>	1682	2,70	1565	2,30	0,930	0,620
<i>Gordura</i>	10153	16,2	9335	14,0	0,920	3,740
<i>Tecido Conjuntivo</i>	4253	6,90	4609	6,90	1,085	1,570
<i>Osso</i>	7575	12,0	10275	15,3	1,357	2,790
<i>Bexiga</i>	27	0,10	25	0,10	0,930	0,010
<i>Glândula Tireóide</i>	37	0,10	40	0,10	1,080	0,010
<i>Baço</i>	245	0,40	265	0,40	1,080	0,090
<i>Esôfago</i>	95	0,20	89	0,10	0,930	0,030
<i>Traquéia</i>	27	0,10	25	0,10	0,930	0,010
<i>Córtex</i>	1374	2,20	1484	2,20	1,080	14,34
<i>Tronco Encefálico</i>	3	0,01	3	0,00	1,080	0,030
<i>Medula Cervical</i>	86	0,10	39	0,10	1,080	0,010
<i>Medula Torácica</i>	73	0,10	79	0,10	1,080	0,030
<i>Olhos</i>	15	0,02	16	0,02	1,080	0,010
<i>Seios Paranasais</i>	16	0,03	0	0,00	0,001	0,000
<i>Sangue</i>	216	0,30	228	0,30	1,059	0,080

FONTE: WERNER; BUSE (1988)

Os dados globais do modelo anatômico disponível são: altura 1,76 m, massa 67 Kg, densidade média 1,07 Kg / dm³, área superficial 1,8 m² e volume 62,7dm³. Cabe aqui uma breve explicação sobre os dados da tabela 3 e 4. O modelo padrão do ser humano foi escolhido arbitrariamente por

WERNER;BUSE(1988) e, a partir daí obtidos os valores das massas e volumes dos diversos órgãos. Em relação as propriedades de cada tecido, WERNER; BUSE (1988) fornecem os valores por eles utilizados em seu trabalho, que também aqui serão utilizados. As incertezas das propriedades estão associadas à dificuldade de medição *in vivo* fazendo, às vezes, com que as medidas tenham de ser feitas *in vitro*. Outra fonte de erro está associada às diferenças de indivíduo para indivíduo.

4.2. Troca de Calor com o Meio Ambiente

A pele, mais especificamente a epiderme, troca calor com o meio ambiente através de cinco mecanismos a saber:

- Condução
- Convecção
- Radiação
- Evaporação Insensível
- Respiração
- Evaporação

4.3. Condução

Apenas quantidades mínimas de calor são perdidas pelo corpo por condução direta a partir de sua superfície para outros objetos, tais como, por exemplo, cadeira ou cama. O processo de condução continua até a temperatura do objeto se igualar à do corpo nu, passando o objeto, então, a funcionar como um isolante

térmico. No presente trabalho não será levado em conta este mecanismo de troca de calor.

4.4. Convecção

A transferência de calor por convecção compreende dois mecanismos:

- Convecção Forçada
- Convecção Natural

Independentemente dos mecanismos acima citados a equação que governa o fenômeno assume a seguinte forma:

$$q_c'' = h_c \cdot (T_E - T_\infty) \quad (4.1)$$

onde: q_c'' = fluxo de calor por convecção (W / m^{-2});

h_c = coeficiente de troca de calor por convecção ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$);

T_E = temperatura da pele, mais precisamente da epiderme($^\circ C$);

T_∞ = temperatura do fluido ao longe, nesse caso, o ar ($^\circ C$);

4.4.1. Convecção Natural

Seria o caso de um ser humano nu em um ambiente com ar estagnado. Para o cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção, NIELSEN; PEDERSON apud YANAGIHARA (1984) fornecem a seguinte expressão:

$$h_c = 2,3842 \cdot (T_E - T_\infty)^{0,25} \quad (4.2)$$

4.4.2. Convecção Forçada

Seria o caso de um ser humano nu em um ambiente com ventilação. COLIN (1981) et al. apud YANAGIHARA (1984) fornecem uma aproximação para o coeficiente de troca de calor por convecção, função da velocidade do ar (v em m/s) dada por:

$$h = 2,7 + 7,4 \cdot v^{0,67} \quad (4.4)$$

onde: h = coeficiente de troca de calor por convecção ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$);

4.5. Radiação

Pode ser descrita pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$q_r'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_E^4 - T_\infty^4) \quad (4.5)$$

onde: q_c'' = fluxo de calor por radiação (W / m^{-2});

ε = emissividade da pele (aproximadamente 0,95);

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$);

Observa-se que a equação 4.5 não é linear. Para que se adeque ao presente trabalho faz-se necessária sua linearização:

$$q_r'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_E^3 + T_E^2 \cdot T_\infty + T_E \cdot T_\infty^2 - T_\infty^3) \cdot (T_E - T_\infty) \quad (4.6)$$

Para a faixa de regulação vasomotora (25 a 29 $^\circ C$) a temperatura da superfície externa da epiderme situa-se entre 29 a 32 $^\circ C$. A equação 4.6 pode ser aproximada, com erro inferior a 1,5 %, por:

$$q_r'' = h_r \cdot (T_E - T_\infty) \quad (4.7)$$

onde:

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_E^3 + T_E^2 \cdot T_\infty + T_E \cdot T_\infty^2 - T_\infty^3) \quad (4.8)$$

para: $T_E = 31 \text{ }^\circ\text{C}$;

$T_\infty = 27 \text{ }^\circ\text{C}$;

$h_r = 5,9348 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

$h_c = 2,4760 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

$h = h_c + h_r = 8,5303 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

4.6. Evaporação Insensível

A parcela de calor dissipada por esse fenômeno não está sujeita aos mecanismos de termorregulação, pois consiste basicamente da difusão de água através da pele e posteriormente sua evaporação. A seguinte equação pode ser usada para descrever o fenômeno:

$$q_e'' = \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot (P_E - P_\infty) \quad (4.9)$$

onde: q_e'' = fluxo de calor por evaporação (W / m^2);

α_e = coeficiente de permeabilidade da pele ($1,271 \times 10^{-9} \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$);

h_{lv} = calor latente de vaporização da água ($2428,4 \text{ KJ} / \text{Kg}$ à $31 \text{ }^\circ\text{C}$);

P_E = pressão de saturação do vapor de água à temperatura da epiderme (Pa);

P_∞ = pressão parcial do vapor de água no ar (Pa);

A pressão parcial do vapor de água no ar pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$P_{\infty} = \phi \times P_v \quad (4.10)$$

onde: P_{∞} = pressão parcial do vapor de água no ar (Pa);

P_v = pressão de saturação do vapor à temperatura do ar (Pa);

ϕ = umidade relativa do ar;

4.7. Respiração

Pode se dividir o calor trocado pela respiração em duas parcelas: calor latente devido ao aumento de umidade e calor liberado devido ao aumento da temperatura do ar.

4.7.1. Aumento da Umidade do Ar

O calor trocado com o meio ambiente pode ser expresso por:

$$q_u = m \cdot h_{lv} \cdot (\omega_{\text{exp}} - \omega_{\infty}) \quad (4.11)$$

onde: q_u = calor devido ao aumento de umidade do ar (W)

m = ventilação pulmonar ($1,0 \times 10^{-4}$ Kg / s);

h_{lv} = calor latente de vaporização da água (2418,8 KJ / Kg à 35 °C);

ω_{exp} = umidade absoluta do ar expirado (Kg água / Kg ar seco);

ω_{∞} = umidade absoluta do ar inspirado (Kg água / Kg ar seco);

É importante notar que a ventilação pulmonar está diretamente relacionada ao metabolismo do corpo; quanto maior o metabolismo, maior o consumo de oxigênio e portanto aumento de ventilação.

MC CUTCHAN; TAYLOR apud YANAGIHARA (1984) fornecem a seguinte expressão para o cálculo da diferença de umidade absoluta entre o ar expirado e o inspirado:

$$\omega_{\text{exp}} - \omega_{\infty} = 0,00277 + 6,5 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\infty} - 0,8 \cdot \omega_{\infty} \quad (4.12)$$

A umidade absoluta pode ser calculada por:

$$\omega_{\infty} = 0,622 \cdot \frac{P_{\infty}}{P - P_{\infty}} \quad (4.13)$$

4.7.2. Aumento da Temperatura do Ar

Corresponde ao calor liberado pelo corpo humano através do aumento da temperatura do ar na respiração. Essa parcela é dada por:

$$q_T = m \cdot C_{p_{ar}} \cdot (T_{\text{exp}} - T_{\infty}) \quad (4.14)$$

onde: q_T = calor devido ao aumento de temperatura do ar (W)

T_{exp} = temperatura do ar expirado ($^{\circ}\text{C}$);

$C_{p_{ar}}$ = calor específico do ar seco a pressão constante
($1,007 \text{ KJ} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

MC CUTCHAN; TAYLOR apud YANAGIHARA (1984) propuseram a seguinte expressão para o cálculo da temperatura do ar expirado:

$$T_{\text{exp}} = 32,6 + 0,066 \cdot T_{\infty} + 32 \cdot \omega_{\infty} \quad (4.15)$$

4.8. Evaporação

Como o presente trabalho trata de um modelo válido apenas para a faixa de regulação vasomotora, o fenômeno de evaporação, isto é a sudorese, não será aqui considerado.

5. MODELO DO CORPO HUMANO

Como uma primeira aproximação ao problema, adotar-se-á o modelo de cilindros concêntricos representando o corpo humano e as diversas camadas de tecidos, como mostra a figura 5.

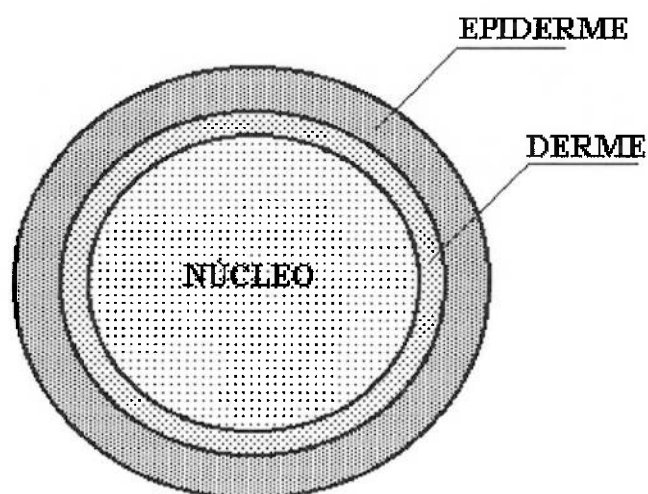


FIGURA 5: MODELO GEOMÉTRICO DO CORPO HUMANO

Observa-se que o corpo humano foi dividido em três camadas:

- Epiderme
- Derme
- Núcleo

O núcleo é formado por ossos, músculos, órgãos e toda hipoderme, incluindo o panículo adiposo. Faz-se necessária a determinação, a partir da hipótese de que o núcleo é formado por um tecido homogêneo, de propriedades médias a ele referentes, como condutibilidade térmica e capacidade térmica. Na tabela 4 encontram-se tabulados os valores dessas propriedades para vários órgãos e tecidos.

Os dados do modelo anatômico disponível são: altura 1,76 m, massa 67 Kg, densidade média 1070 Kg/m^3 , área superficial $1,8 \text{ m}^2$ e volume $0,0627 \text{ m}^3$. Mantendo-se o mesmo volume e altura do modelo disponível, determinou-se o raio de um cilindro que atendesse a esses requisitos. Obteve-se:

L = altura do cilindro (1,76 m);

r_e = raio externo do cilindro ($1,0649 \times 10^{-1} \text{ m}$);

r_{id} = raio interno da camada correspondente à derme ($1,0366 \times 10^{-1} \text{ m}$);

r_{ed} = raio externo da camada correspondente à derme ($1,0555 \times 10^{-1} \text{ m}$);

Para o cálculo do volume da epiderme e da derme assumiu-se, a partir de dados de JUNQUEIRA; CARNEIRO (1990), que a massa da epiderme corresponde a 50 % da massa da derme, obtendo-se:

m_e = massa da epiderme (1,1873 Kg);

m_d = massa da derme (2,3747 Kg);

TABELA 4 - PROPRIEDADES DOS TECIDOS E ORGÃOS HUMANOS

Tecido	Condutibilidade Térmica ($\text{W. m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)	Capacidade Térmica ($\text{KJ. m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)
<i>Pele</i>	0,47	3,68
<i>Músculo</i>	0,51	3,80
<i>Coração</i>	0,47	3,55
<i>Fígado</i>	0,48	3,69
<i>Pulmões</i>	0,28	3,52
<i>Rim</i>	0,48	3,60
<i>Estômago</i>	0,51	3,56
<i>Intestino</i>	0,51	3,56
<i>Gordura</i>	0,21	2,30
<i>Tecido Conjuntivo</i>	0,47	3,20
<i>Osso</i>	0,75	1,70
<i>Bexiga</i>	0,48	3,20
<i>Glândula Tireóide</i>	0,48	3,85
<i>Baço</i>	0,48	3,85
<i>Esôfago</i>	0,48	3,20
<i>Traquéia</i>	0,48	3,20
<i>Córtex</i>	0,49	3,85
<i>Tronco Encefálico</i>	0,49	3,85
<i>Medula Cervical</i>	0,49	3,85
<i>Medula Torácica</i>	0,49	3,85
<i>Olhos</i>	0,87	3,20
<i>Sangue</i>	0,47	3,85

FONTE: WERNER; BUSE (1988)

A partir da tabela 4 obteve-se os seguintes valores para as propriedades médias e metabolismo total do núcleo:

- $k_N = 0,49638 \text{ W. m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$;
- $C_{pN} = 3,1658 \text{ KJ. Kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$;
- $\rho_N = 1,0670 \text{ Kg / m}^3$;
- $q_N = 76,850 \text{ W}$;

Da derme para a epiderme ocorre condução e, optou-se por calcular a resistência à condução levando-se em conta metade da espessura da derme e metade da epiderme, obtendo-se:

$$R_{DE} = \frac{\ln\left(\frac{r_e + r_{ed}}{r_{ed} + r_{id}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_s} \quad (5.1)$$

onde: R_{DE} = resistência térmica à condução da derme para a epiderme ($^{\circ}\text{C} / \text{W}$);

k_s = condutibilidade térmica da pele ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

A partir da equação (5.1), dados da tabela 4 e raios das camadas correspondentes à derme e epiderme obteve-se $R_{DE} = 2,5841 \times 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C} / \text{W}$.

Há também condução de calor do núcleo para a epiderme. Como primeira aproximação, uma vez que o núcleo na verdade é bem heterogêneo e cheio de interstícios entre os diversos órgãos, considerou-se apenas que a condução se dá a partir da metade do raio do núcleo até o raio interno da derme e, desprezou-se a resistência térmica da derme em face da total, chegando-se a:

$$R_{ND} = \frac{\ln\left(\frac{r_{id}}{r_{id} / 2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_N} \quad (5.2)$$

onde: R_{ND} = resistência térmica à condução do núcleo para a derme ($^{\circ}\text{C} / \text{W}$);

Calculou-se $R_{ND} = 1,2628 \times 10^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C} / \text{W}$.

6. CÁLCULO DAS CONDIÇÕES DE REGIME PERMANENTE

Mais adiante, quando se for aplicar a Transformada de Laplace às equações diferenciais, será necessário a utilização do conceito variável perturbação. Deve-se portanto determinar as temperaturas de regime permanente das diversas camadas no modelo, para uma dada temperatura e umidade do ar. É importante mencionar-se que para efeito de modelagem admitiu-se que as diversas camadas apresentam uma distribuição de temperatura uniforme.

O corpo estará em equilíbrio térmico com o meio ambiente se todo o calor produzido pelo metabolismo for rejeitado para o meio. Portanto, essa condição é expressa por:

$$Q = q_r + q_c + q_e + q_u + q_T \quad (6.1)$$

onde: Q = metabolismo basal do corpo humano (78,14 W)

Inserindo as equações (4.9), (4.11) e (4.14) em (6.1) obtem-se:

$$\begin{aligned} Q = & h \cdot (T_E - T_\infty) + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot (P_E - P_\infty) + \\ & + m \cdot C_{par} \cdot (T - T_\infty) + m \cdot h_{lv} \cdot (\omega - \omega_\infty) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Inserindo as equações (4.12), (4.13) e (4.15) obtem-se:

$$\begin{aligned} Q = & h \cdot (T_E - T_\infty) + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot (P_E - P_\infty) + \\ & + m \cdot C_{par} \cdot (32,6 - 0,934 \cdot T_\infty + 32 \cdot \omega_\infty) + \\ & + m \cdot h_{lv} \cdot (0,0277 + 6,5 \cdot 10^{-5} \cdot T_\infty - 0,8 \cdot \omega_\infty) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Inserindo a equação (4.13) em (6.3) obtem-se:

$$\begin{aligned}
 Q = & h \cdot (T_E - T_\infty) + \alpha_e \cdot h_v \cdot A \cdot (P_E - P_\infty) + \\
 & + m \cdot C_{p_{ar}} \cdot [32,6 - 0,934 \cdot T_\infty + 32 \cdot (0,622 \cdot \frac{P_\infty}{P - P_\infty})] + \\
 & + m \cdot h_v \cdot [0,0277 + 6,5 \cdot 10^{-5} \cdot T_\infty - 0,8 \cdot (0,622 \cdot \frac{P_\infty}{P - P_\infty})] \quad (6.4)
 \end{aligned}$$

Como se pretende estudar os mecanismos de vasoconstrição e vasodilatação com respeito a regulação térmica do corpo humano, a temperatura do ar de 27 °C ($T_\infty=27^\circ\text{C}$) é uma boa escolha para a temperatura de equilíbrio. Um detalhe digno de nota é que para o cálculo do calor trocado por convecção utilizou-se o coeficiente de película dado pela equação (4.2) e não aquele obtido para um cilindro vertical. Também deve-se notar que a área presente no equacionamento do calor trocado pela epiderme refere-se à área externa do corpo humano (no modelo 1,8 m²) e não à área externa do cilindro considerado.

Nessas condições, umidade do ar de 70 % e admitindo-se uma pressão atmosférica de 1 atm (101325 Pa) obtem-se:

$$P_\infty = 2478 \text{ Pa};$$

Resolvendo a equação (6.4) determina-se a temperatura da epiderme de equilíbrio com o meio ambiente, como sendo de 30,850 °C.

Impondo à derme que todo o calor gerado pelo metabolismo menos o calor perdido pela respiração (debitado do núcleo) deve ser igual ao calor perdido por condução para a epiderme, obtem-se:

$$Q - q_u - q_T = \frac{1}{R_{DE}} \cdot (T_D - T_E) \quad (6.5)$$

A partir dos valores calculados da temperatura da epiderme ($T_E=30,850^\circ\text{C}$) e calor perdido pela respiração (4,9314 W), obtem-se:

$$T_D = 31,039^\circ\text{C};$$

Deve-se calcular agora as temperaturas de equilíbrio do núcleo e do sangue. Modelou-se o núcleo da seguinte maneira: tecido homogêneo com propriedades médias já calculadas no capítulo (5), troca calor com o meio ambiente através da respiração e, troca calor com o sangue (segundo o modelo de PENNES (1948) apud et al. ARKIN (1994)). O fluxo de sangue que circula pelo núcleo é igual ao débito cardíaco total menos o fluxo de sangue para a derme. O sangue por sua vez recebe calor do núcleo e é refrigerado na derme, onde se processa os mecanismos de vasodilatação e vasoconstrição. Aplicando a primeira lei da Termodinâmica para o núcleo como volume de controle, excluindo-se o sangue, obtem-se:

$$q_N - \frac{1}{R_{ND}} \cdot (T_N - T_D) - (D - \omega_b \cdot m_s) \cdot (Cp \cdot \rho)_b \cdot (T_N - T_b) -$$

$$-q_u - q_T = 0 \quad (6.6)$$

onde: T_N = temperatura do núcleo ($^\circ\text{C}$);

T_b = temperatura do sangue ($^\circ\text{C}$);

D = débito cardíaco ($10,1806 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$);

ω_b = fluxo de sangue para a derme ($3,3333 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{Kg de tecido}$);

m_s = massa da pele (3,5620 Kg);

Aplicando a primeira lei da Termodinâmica para um volume de controle ao redor do sangue, obtém-se:

$$q_b + (D - \omega_b \cdot m_s) \cdot (Cp \cdot \rho)_b \cdot (T_N - T_b) - \\ - \omega_b \cdot m_s \cdot (Cp \cdot \rho)_b \cdot (T_b - T_D) = 0 \quad (6.7)$$

onde: q_b = metabolismo basal do sangue (0,08 W);

Substituindo os valores consegue-se chegar ao seguinte sistema linear de duas equações a duas incógnitas:

$$-418,16 \cdot T_N + 410,24 \cdot T_b = -317,72$$

$$410,24 \cdot T_N - 415,08 \cdot T_b = -150,34$$

Resolvendo-se o sistema linear obtém-se:

$$T_N = 36,707 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_b = 36,648 \text{ } ^\circ\text{C};$$

Pode-se verificar o resultado substituindo os valores obtidos na equação para a derme resultante da aplicação da primeira lei da Termodinâmica:

$$q_D + \frac{1}{R_{ND}} \cdot (T_N - T_D) + \omega_b \cdot m_s \cdot (Cp \cdot \rho)_b \cdot (T_b - T_D) - \\ - \frac{1}{R_{DE}} \cdot (T_D - T_E) = 0 \quad (6.8)$$

onde: q_D = metabolismo basal da derme (1,21 W);

7. MODELAGEM DINÂMICA DO SISTEMA VASOMOTOR

Neste capítulo serão desenvolvidas equações que fornecem a variação temporal das temperaturas de cada camada do modelo adotado. Na sequência, o mecanismo de controle será analisado.

7.1. Epiderme

A epiderme é um tecido sem metabolismo, portanto, sem geração interna de calor, sem fluxo sanguíneo e, que troca calor com o ambiente através de convecção, radiação e evaporação e com a derme, através de condução. Obtem-se, então, a partir da primeira lei da Termodinâmica, a seguinte equação diferencial para a epiderme, com o auxílio das equações (4.1), (4.7) e (4.9):

$$(m \cdot Cp)_E \cdot \frac{dT_E}{dt} = \frac{1}{R_{DE}} \cdot (T_D - T_E) - h \cdot A \cdot (T_E - T_\infty) - \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot (P_E - P_\infty) \quad (7.1)$$

Para que se possa trabalhar adequadamente com a equação (7.1) é necessário introduzir o conceito de variável perturbação. Faz-se necessária a obtenção de retas que aproximem as variações de pressão em função das variações de temperatura do ar e da epiderme para a obtenção do calor perdido por difusão. A partir de uma tabela de vapor de água saturado e umidade relativa de 70 %, obtem-se:

TABELA 5 - PRESSÃO PARCIAL DO VAPOR DE ÁGUA NO AR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO AR

T_{∞} (°C)	P_{∞} (Pa)
24	2073,4
25	2201,5
26	2335,9
27	2478,0
28	2627,1
29	2784,6
30	2949,8

obs: os valores de pressão parcial do vapor de água foram obtidos assumindo uma umidade relativa de 70%.

Aplicando uma regressão linear na tabela 5 obtém-se, com erro inferior a 1%, a seguinte reta para a pressão parcial do vapor de água em função da temperatura de saturação:

$$P_{\infty} = 145,95 \cdot T_{\infty} - 1447,75 \quad (7.2)$$

TABELA 6 - PRESSÃO DE SATURAÇÃO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA EPIDERME

T_E (°C)	P_E (Pa)
28	3753
29	3978
30	4214
31	4462
32	4723
33	4997
34	5285

Aplicando um regressão linear na tabela 6 obtém-se, com erro inferior a 1%, a seguinte reta:

$$P_E = 255,107 \cdot T_E - 3420,89 \quad (7.3)$$

A partir de agora todas as variáveis presentes no equacionamento da epiderme devem ser entendidas como variáveis perturbação. A equação (7.1) pode ser reescrita como:

$$(m \cdot Cp)_E \cdot \frac{dT_E}{dt} = \frac{1}{R_{DE}} \cdot (T_D - T_E) - h \cdot A \cdot (T_E - T_\infty) - \\ - \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot (X \cdot T_E - x \cdot T_\infty) \quad (7.4)$$

onde: $X = 255,11 \text{ Pa} / ^\circ\text{C}$;

$Y = 4487,4 \text{ Pa}$;

$x = 145,95 \text{ Pa} / ^\circ\text{C}$;

$y = 2492,9 \text{ Pa}$;

Expandindo-se a equação (7.4) e, depois agrupando-se os termos semelhantes obtém-se:

$$(m \cdot Cp)_E \cdot \frac{dT_E}{dt} = \frac{1}{R_{DE}} \cdot T_D - \left(\frac{1}{R_{DE}} + h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot X \right) \cdot T_E + \\ + (h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot x \cdot A) \cdot T_\infty \quad (7.5)$$

Aplicando a transformada de Laplace à equação (7.5):

$$(m \cdot Cp)_E \cdot T_E(s) \cdot s = \frac{1}{R_{DE}} \cdot T_D(s) - \left(\frac{1}{R_{DE}} + h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot X \right) \cdot T_E(s) + \\ + (h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot x \cdot A) \cdot T_\infty(s) \quad (7.6)$$

Agrupando-se os termos semelhantes da equação (7.6), obtem-se:

$$[(m \cdot Cp)_E \cdot s + (\frac{1}{R_{DE}} + h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot X)] \cdot T_E(s) = \frac{1}{R_{DE}} \cdot T_D(s) + (h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot X) \cdot T_\infty(s) \quad (7.7)$$

A equação (7.6) pode ser escrita na forma:

$$T_E = \frac{k_1}{\tau_1 \cdot s + 1} \cdot T_D + \frac{k_2}{\tau_1 \cdot s + 1} \cdot T_\infty \quad (7.8)$$

onde:

$$k_1 = \frac{1/R_{DE}}{\frac{1}{R_{DE}} + h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot X} \quad (7.9)$$

$$k_2 = \frac{h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot X}{\frac{1}{R_{DE}} + h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot X} \quad (7.10)$$

$$\tau_1 = \frac{(m \cdot Cp)_E}{\frac{1}{R_{DE}} + h \cdot A + \alpha_e \cdot h_{lv} \cdot A \cdot X} \quad (7.11)$$

$$k_1 = 0,95846;$$

$$k_2 = 0,041540;$$

$$\tau_1 = 10,822 \text{ s};$$

7.2. Derme

Tecido que apresenta metabolismo, fluxo sanguíneo e troca calor por condução com o núcleo e com a epiderme. O fluxo de sangue para a epiderme é variável ($\omega_b(t)$), é resultado da resposta do mecanismo vasomotor à variações das condições ambientais e ou variações do metabolismo do corpo humano. Obtem-se portanto a seguinte equação diferencial, a partir da aplicação da primeira lei da Termodinâmica:

$$(m \cdot Cp)_D \frac{dT_D}{dt} = q_D + \frac{1}{R_{ND}} \cdot (T_N - T_D) + \omega_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_b - T_D) - \frac{1}{R_{DE}} \cdot (T_D - T_E) \quad (7.12)$$

Como se está trabalhando com variáveis perturbação a parcela referente ao metabolismo desaparece da equação acima. Observa-se que a equação não é linear, pois contem o produto entre duas variáveis, sendo necessária a linearização da equação. Linearizando a equação (7.12) obtem-se:

$$(m \cdot Cp)_D \frac{dT_D}{dt} = \frac{1}{R_{ND}} \cdot (T_N - T_D) + \omega_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_b - \bar{T}_D) + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b \cdot (T_b - T_D) - \frac{1}{R_{DE}} \cdot (T_D - T_E) \quad (7.13)$$

Agrupando-se os termos semelhantes da equação (7.13):

$$\begin{aligned} (m \cdot Cp)_D \frac{dT_D}{dt} = & \frac{1}{R_{ND}} \cdot T_N - \left(\frac{1}{R_{ND}} + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{DE}} \right) \cdot T_D + \\ & + \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_b - \bar{T}_D) \cdot \bar{\omega}_b + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b \cdot T_b + \frac{1}{R_{DE}} \cdot T_E \quad (7.14) \end{aligned}$$

Aplicando a Transformada de Laplace à equação 7.14:

$$\begin{aligned} (m \cdot Cp)_D T_D(s) \cdot s = & \frac{1}{R_{ND}} \cdot T_N(s) - \left(\frac{1}{R_{ND}} + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{DE}} \right) \cdot T_D(s) + \\ & + \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_b - \bar{T}_D) \cdot \bar{\omega}_b(s) + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b \cdot T_b(s) + \\ & + \frac{1}{R_{DE}} \cdot T_E(s) \quad (7.15) \end{aligned}$$

A equação (7.15) pode ser escrita na forma:

$$T_D = \frac{k_3}{\tau_2 \cdot s + 1} \cdot T_N + \frac{k_4}{\tau_2 \cdot s + 1} \cdot T_E + \frac{k_5}{\tau_2 \cdot s + 1} \cdot T_b + \frac{k_6}{\tau_2 \cdot s + 1} \cdot \bar{\omega}_b \quad (7.16)$$

onde:

$$k_3 = \frac{1/R_{ND}}{\frac{1}{R_{ND}} + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{DE}}} \quad (7.17)$$

$$k_4 = \frac{1/R_{DE}}{\frac{1}{R_{ND}} + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{DE}}} \quad (7.18)$$

$$k_5 = \frac{\bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b}{\frac{1}{R_{ND}} + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{DE}}} \quad (7.19)$$

$$k_6 = \frac{\rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_b - \bar{T}_D)}{\frac{1}{R_{ND}} + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{DE}}} \quad (7.20)$$

$$\tau_2 = \frac{(m \cdot Cp)_D}{\frac{1}{R_{ND}} + \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{DE}}} \quad (7.21)$$

$$k_3 = 0,019811;$$

$$k_4 = 0,96808;$$

$$k_5 = 0,012110;$$

$$k_6 = 203757 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{Kg tecido} \cdot \text{s} / \text{m}^3;$$

$$\tau_2 = 22,871 \text{ s};$$

7.3. Núcleo

Como dito anteriormente, admitiu-se o núcleo como sendo de um mesmo material com propriedades calculadas através da média ponderada em relação às massas de cada tecido. O fluxo sanguíneo que refrigera o núcleo corresponde ao débito cardíaco total menos o fluxo de sangue para a derme. Deve-se notar que o núcleo também apresenta metabolismo. Aplicando a primeira lei da Termodinâmica para um volume de controle ao redor do núcleo, obtém-se:

$$(m \cdot Cp)_N \cdot \frac{dT_N}{dt} = q_N - (D - \omega_b \cdot m_s) \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_N - T_b) - \\ - \frac{1}{R_{ND}} \cdot (T_N - T_D) - q_u - q_T \quad (7.22)$$

A parcela de calor devida à respiração que, é função da variável perturbação (T_∞) pode ser aproximada por uma reta, através de uma regressão linear:

$$q_u + q_T = -f \cdot T_\infty \quad (7.23)$$

onde: $f = 0,267 \text{ W} / ^\circ\text{C}$;

Substituindo a equação (7.23) em (7.22) obtém-se:

$$(m \cdot Cp)_N \cdot \frac{dT_N}{dt} = q_N - (D - \omega_b \cdot m_s) \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_N - T_b) - \\ - \frac{1}{R_{ND}} \cdot (T_N - T_D) + f \cdot T_\infty \quad (7.24)$$

Linearizando-se a equação (7.24) e lembrando que se esta trabalhando com variáveis perturbação obtém-se:

$$\begin{aligned} (m \cdot Cp)_N \cdot \frac{dT_N}{dt} = & -D \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_N - T_b) + \omega_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_N - \bar{T}_b) + \\ & + \bar{\omega}_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_N - T_b) - \frac{1}{R_{ND}} \cdot (T_N - T_D) + f \cdot T_\infty \end{aligned} \quad (7.25)$$

Agrupando-se os termos semelhantes da equação (7.25) obtém-se:

$$\begin{aligned} (m \cdot Cp)_N \cdot \frac{dT_N}{dt} = & -(D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{ND}}) \cdot T_N + \\ & + \omega_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_N - \bar{T}_b) + \\ & + (D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b) \cdot T_b + \frac{1}{R_{ND}} \cdot T_D + f \cdot T_\infty \end{aligned} \quad (7.26)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação (7.26):

$$\begin{aligned} (m \cdot Cp)_N \cdot T_N \cdot s = & -(D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{ND}}) \cdot T_N(s) + \\ & + \omega_b(s) \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_N - \bar{T}_b) + \\ & + (D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b) \cdot T_b(s) + \frac{1}{R_{ND}} \cdot T_D(s) + f \cdot T_\infty(s) \end{aligned} \quad (7.27)$$

Agrupando os termos semelhantes da equação (7.27) obtem-se:

$$\begin{aligned}
 & [(m \cdot Cp)_N \cdot s + (D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{ND}})] \cdot T_N(s) = \\
 & + \omega_b(s) \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_N - \bar{T}_b) + \\
 & + (D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b) \cdot T_b(s) + \\
 & + \frac{1}{R_{ND}} \cdot T_D(s) + f \cdot T_\infty(s) \quad (7.28)
 \end{aligned}$$

A equação (7.28) pode ser escrita na forma:

$$T_N = \frac{k_7}{\tau_3 \cdot s + 1} \cdot T_b + \frac{k_8}{\tau_3 \cdot s + 1} \cdot T_D + \frac{k_9}{\tau_3 \cdot s + 1} \cdot T_\infty + \frac{k_{10}}{\tau_3 \cdot s + 1} \cdot \omega_b \quad (7.29)$$

onde:

$$k_7 = \frac{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b}{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{ND}}} \quad (7.30)$$

$$k_8 = \frac{1 / R_{ND}}{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{ND}}} \quad (7.31)$$

$$k_9 = \frac{f}{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{ND}}} \quad (7.32)$$

$$k_{10} = \frac{\rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_N - \bar{T}_b)}{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{ND}}} \quad (7.33)$$

$$\tau_3 = \frac{(m \cdot Cp)_N}{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b + \frac{1}{R_{ND}}} \quad (7.34)$$

$$k_7 = 0,98106;$$

$$k_8 = 0,018938;$$

$$k_9 = 6,3852 \times 10^{-4};$$

$$k_{10} = 2051,5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{Kg tecido} \cdot \text{s} / \text{m}^3;$$

$$\tau_3 = 429,87 \text{ s};$$

7.4. Sangue

O sangue resfria o núcleo retirando calor e é resfriado em sua passagem pela derme. A variação de sua temperatura pode ser equacionada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} (m \cdot Cp)_b \frac{dT_b}{dt} = & (D - \omega_B \cdot m_s) \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_N - T_b) - \\ & - \omega_B \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_b - T_D) + q_b \quad (7.35) \end{aligned}$$

Linearizando a equação (7.35) obtém-se:

$$\begin{aligned} (m \cdot Cp)_b \frac{dT_b}{dt} = & D \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_N - T_b) - \\ & - \omega_B \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_N - \bar{T}_b) - \bar{\omega}_B \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_N - T_b) \\ & - \omega_B \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_b - \bar{T}_D) - \bar{\omega}_B \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (T_b - T_D) \quad (7.36) \end{aligned}$$

agrupando os termos semelhantes da equação (7.36):

$$\begin{aligned} (m \cdot Cp)_b \frac{dT_b}{dt} = & (D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_B \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b) \cdot T_N - \\ & - \omega_B \cdot (m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_N - \bar{T}_D)) - \\ & - D \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot T_b + \bar{\omega}_B \cdot m_s \cdot \rho_b \cdot Cp_b \cdot T_D \quad (7.37) \end{aligned}$$

Aplicando a Transformada de Laplace e, agrupando os termos semelhantes, a equação (7.37) pode ser escrita na forma:

$$T_b = \frac{k_{11}}{\tau_4 \cdot s + 1} \cdot T_N + \frac{k_{12}}{\tau_4 \cdot s + 1} \cdot T_D - \frac{k_{13}}{\tau_4 \cdot s + 1} \cdot \omega_b \quad (7.38)$$

onde:

$$k_{11} = \frac{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b - \bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b}{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b} \quad (7.39)$$

$$k_{12} = \frac{\bar{\omega}_b \cdot \rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b}{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b} \quad (7.40)$$

$$k_{13} = \frac{\rho_b \cdot m_s \cdot Cp_b \cdot (\bar{T}_N - \bar{T}_D)}{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b} \quad (7.41)$$

$$\tau_4 = \frac{(m \cdot Cp)_b}{D \cdot \rho_b \cdot Cp_b} \quad (7.42)$$

$$k_{11} = 0,98834;$$

$$k_{12} = 0,011663;$$

$$k_{13} = 198295 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{Kg tecido} \cdot \text{s} / \text{m}^3;$$

$$\tau_4 = 51,991 \text{ s};$$

7.5. Mecanismo de controle

A partir das equações 7.8, 7.16, 7.29 e 7.38 pode-se chegar na função de transferência de malha aberta do modelo, que apresenta a seguinte forma:

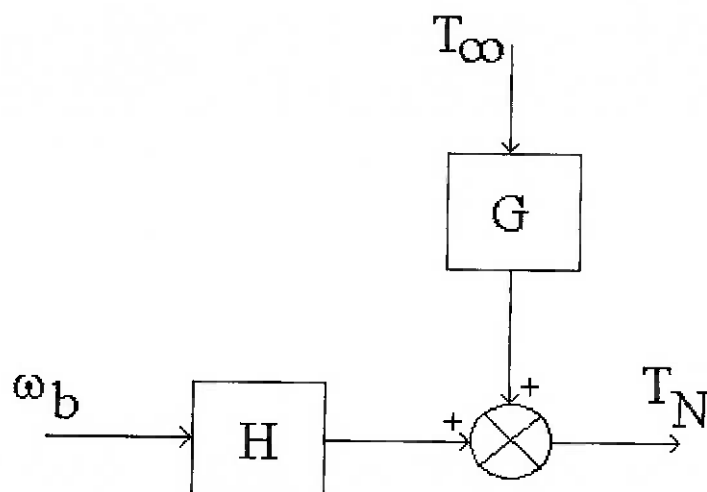


FIGURA 5: DIAGRAMA DE BLOCOS

A variável que se deseja controlar é a temperatura do núcleo. A influência devida às variações na temperatura do ar devem repercutir o menos possível na temperatura interna do corpo. O mecanismo de controle é o responsável pela pequena flutuação da referida temperatura.

Considerando-se apenas o fenômeno biológico vasodilatação e modelando-se o sistema de contração muscular da parede dos vasos implicados no processo através de uma válvula de comportamento linear, e seguindo a mesma conduta para a transmissão do sinal dos receptores hipotalâmicos, chegamos ao seguinte diagrama de blocos:

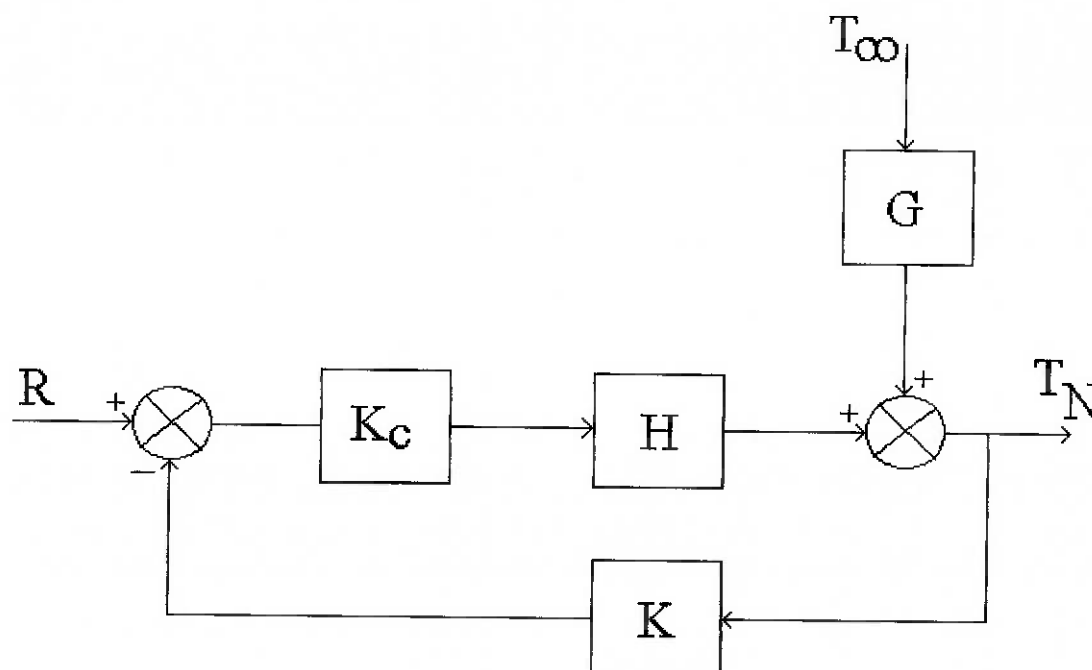


FIGURA 6 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE MALHA FECHADA

obs: K_c engloba o K da válvula e do controlador.

Para uma primeira aproximação poderia se utilizar um controlador proporcional e, simular o sistema para uma entrada (temperatura do ar) do tipo degrau. Modelos mais complexos poderiam ser obtidos utilizando-se um controlador integral derivativo.

8. RESULTADOS

Para as seguintes condições, temperatura do ar de 27 °C, umidade relativa do ar de 70 %, metabolismo basal de 78,14 W, ar estagnado e dados das tabelas 3 e 4, obteve-se os seguintes valores para as condições de regime permanente:

$$T_E = 30,850 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_D = 31,039 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_N = 36,707 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_b = 36,648 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

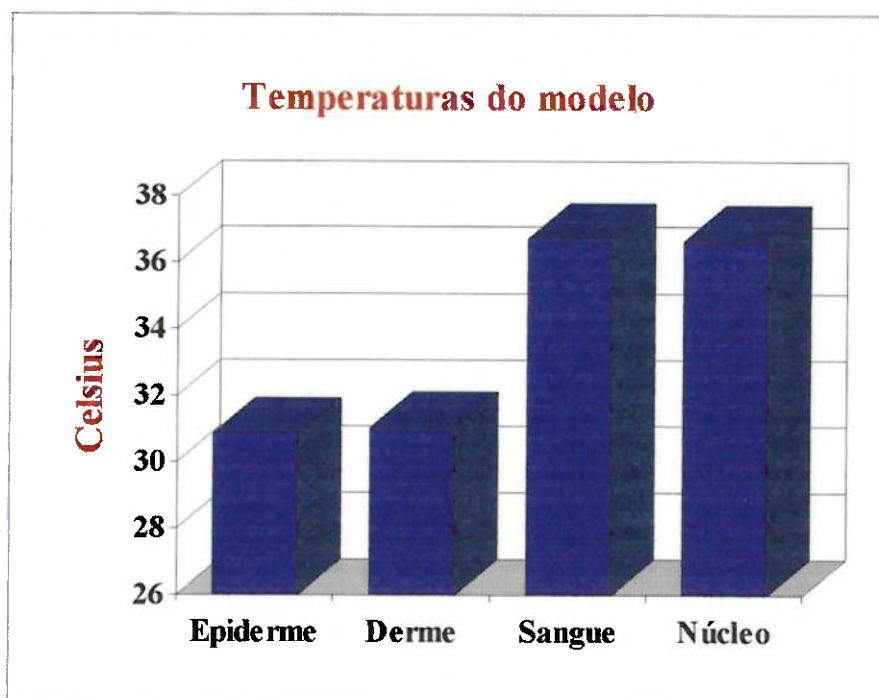


FIGURA 7 - RESULTADOS DO MODELO

9. DISCUSSÃO

As temperaturas de regime permanente foram obtidas para condições específicas, vistas anteriormente. Através do modelo poderia se obter as temperaturas das diversas camadas variando-se os parâmetros de entrada, como por exemplo a umidade relativa do ar, temperatura do ar, sempre na faixa de 25 a 29 °C que é aquela de regulação vasomotora.

Os resultados obtidos apresentam-se de acordo com a lógica. Não há dados na literatura para se comparar com os fornecidos pelo modelo adotado. Observando-se as informações finais constantes do trabalho pode-se inferir que a temperatura da epiderme é sempre bem próxima da temperatura da derme, fato bem razoável, pois a resistência à condução entre as duas camadas é muito pequena. A grande diferença de temperatura entre a derme e o núcleo, salientada na figura 7, pode ser explicada pela elevada resistência à condução, devida, em parte, à baixa condutibilidade térmica do tecido adiposo. Quanto ao núcleo e o sangue as temperaturas são muito próximas, fato decorrente do pequeno fluxo de sangue que vai para a derme nas condições de metabolismo basal.

As principais fontes de erro que agem sobre o modelo são as variações nos valores das propriedades de cada tecido, entretanto, na literatura observam-se grandes diferenças desses parâmetros de trabalho para trabalho. Essa variação é causada, muitas vezes, por características individuais ou diferentes métodos experimentais, vale dizer: medição *in vivo* ou *in vitro*.

Um modelo mais complexo poderia ser construído dividindo-se o núcleo em três camadas, uma referente aos músculos, outra à gordura e a última ao conjunto órgãos, ossos e demais tecidos. Aprimoramentos no modelo geométrico poderiam ser obtidos modelando os membros superiores e inferiores e o tórax por cilindros e, a cabeça por uma esfera, pois tais formas são as que mais se aproximam da realidade biológica. Para verificação dos dados obtidos nesses modelos é

obrigatória a realização de experiências com animais ou até mesmo com seres humanos, como as desenvolvidas por TIKUISIS (1989).

10. CONCLUSÕES

O modelo apresentado mostrou-se adequado na previsão das condições de regime permanente do corpo humano, mesmo considerando-se a falta de termos de comparação. Para que o trabalho se tornasse completo, seria necessária a obtenção da função de transferência de malha fechada e, posteriormente a simulação do sistema para condições ambientais diversas, como por exemplo mudança de um ambiente a uma certa temperatura para outro com temperatura mais elevada. Mais uma vez, não haveria meios de se comparar os resultados obtidos com dados experimentais. A ausência de trabalhos experimentais, na literatura enfocada, sobre a dinâmica da termorregulação, permite apenas analisar-se qualitativamente o modelo aqui apresentado.

O trabalho apresenta uma introdução sobre os mecanismos de regulação da temperatura corporal, do ponto de vista fisiológico, indispensável para a compreensão de futuros modelos. A introdução aborda todos os mecanismos utilizados pelo corpo humano na manutenção da temperatura interna. O modelo que foi apresentado, de forma inédita, admite a previsão das temperaturas das diversas camadas de indivíduo sujeito às variações na temperatura do ar. Tal assertiva exclui os mecanismos da sudorese, calafrios entre outros levando em conta somente a vasoconstrição e vasodilatação, o que está de acordo com o objetivo principal do trabalho que consiste na contribuição, mesmo que modesta, para um melhor entendimento do mecanismo de termorregulação.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arkin, H.; Xu, L.X.; Holmes, K.R. Recent developments in modeling heat transfer in blood perfused tissues. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 41, n.2, p.97-107, 1994.

Guyton, A.C. **Tratado de fisiologia médica**. 8. ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1992.

Hanna, L.M. A theoretical model of localized heat and water vapor transport in the human respiratory tract. **Journal of Biomechanical Engineering**. v.108, p.19-27, 1986.

Hodson D.A.; Eason, G.; Barbenel, J.C. Modeling transient heat transfer through the skin and superficial tissues-1: surface insulation. **Journal of Biomechanical Engineering**. v.108, p.183-8, 1986.

Huang, H.W.; Chan C.L.; Roemer, R.B. Analytical solutions of Pennes bio-heat transfer equation with a blood vessel. **Journal of Biomechanical Engineering**. v.116, p.208-212, 1994.

Incropera, F.P.; Witt, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 3.ed. Rio de Janeiro. Guanabara Koogan, 1992.

Irvine, T. F.; Liley, P.E. **Steam and gas tables with computer equations**. Academic Press, 1984.

Junqueira, L.C.; Carneiro, J. **Histologia básica**. 7. ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1990.

Machado, A. **Neuroanatomia funcional**. 2. ed. Belo Horizonte, Atheneu, 1993.

Ogata, K. **Engenharia do controle moderno**. Rio de Janeiro, Prentice Hall, 1982.

Rohen, J.W.; Yokochi, C. **Anatomia humana**. 3. ed. São Paulo, Manole, 1993.

Tikuissis, P. Prediction of the thermoregulatory response for clothed immersion in cold water. **European Journal of Applied Physiology**. v.59, p.334-341, 1989.

Werner, J.; Buse M. Temperature profiles with respect to inhomogeneity and geometry of the human body. **Journal of Applied Physiology**. v. 65, p. 1110-18, 1988.

Yanagihara, J.I. **Conforto térmico contribuições ao estudo do critério de Fanger**. São Paulo, 1984. 64p. Trabalho de graduação - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Yang, W.-J. **Biothermal-Fluid sciences principles and applications**. Hemisphere Publishing Corporation, 1989.

- De acordo: ABNT-NBR 6023 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.