
EL FRÍO Y LA AUSENCIA DE CALOR

The cold and the absence of heat

José Rafael Jiménez Guzmán*

Resumen: El siguiente artículo tiene como objetivo aclarar el concepto de la energía transitoria en forma de calor cuando es recibida o emitida por el cuerpo humano la cual activa el sistema termorregulador haciendo que una persona sienta “calor” o “frío”, respectivamente. Los ingenieros mecánicos utilizan estos conceptos y los relacionan al diseño de los sistemas de climatización de edificaciones y medios de transporte con la finalidad de lograr la comodidad térmica en las personas que ocupan esos espacios.

Palabras claves: Energía, metabolismo, temperatura, calor, calentamiento, frío, enfriamiento, comodidad térmica.

* Coordinador de Ingeniería General y docente de la carrera de Ingeniería Mecánica del INTEC.

Abstract: The following article aims to clarify the concept of transient energy as heat when received or emitted by the human body which activates the thermoregulatory system making a person feel "hot" or "cold" respectively. Mechanical engineers use these concepts and relate to the design of air conditioning systems of buildings and vehicles in order to achieve thermal comfort in people who occupy those spaces.

Keywords: Energy, metabolism, temperature, heat, heating, cool, cooling, thermal comfort.

1. Introducción

Muchas personas incluidas profesionales universitarios cuando se le pregunta que entienden por el “frío”, la gran mayoría responde: “Ausencia de calor”. Para verificar si es un problema de semántica, si se busca en un diccionario el significado del término “ausencia”, por ejemplo en el Diccionario Enciclopédico Vergara éste indica: *ausencia: 3) Falta o privación de alguna cosa. No estar presente una persona o cosa en el lugar en que era de esperar.*

Esto quiere decir que conforme a esa definición del frío, el calor no existe o no está presente cuando ocurre este fenómeno. Hasta que se demuestre lo contrario, esto es sólo posible cuando se lleva una sustancia al cero absoluto ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$) y se cumple el postulado de la 3ra. Ley de la Termodinámica que reza: “*El valor de la entropía de la materia es cero solamente a la temperatura de cero absoluto*”, o lo que equivale a decir, que el calor como energía es nulo.

Aun cuando estamos familiarizados con la propiedad física conocida como temperatura como un medio para saber cuándo un cuerpo está “caliente” o “frío”, no es fácil ofrecer una definición exacta de este concepto. Fundamentados en nuestras sensaciones

fisiológicas, expresamos el nivel de temperatura de manera cualitativa con vocablos tales como: congelado, frío, templado, tibio, caliente, ardiente, etc.; sin embargo, no es posible asignar valores numéricos a estas condiciones basándonos solamente en esas sensaciones. Además, en ocasiones nos da la sensación que los sentidos nos engañan. Para cuantificar esa propiedad física debemos recurrir a la Ley Cero de la Termodinámica, en la cual se fundamentan los termómetros. Esto lo podemos comprobar con un sencillo y rápido experimento el cual puede realizarse en la tranquilidad de nuestros hogares. Colocamos tres envases: uno con agua caliente (que no le vaya a quemar, por supuesto), otro con agua bien fría y el tercero con agua tibia. Introduzca una mano en el envase con agua caliente y la otra en el envase con agua fría por un rato. Inmediatamente después introduzca ambas manos en el tercer envase que contiene el agua tibia. Notará que en la mano que estaba en el agua caliente sentirá el agua fría mientras que la que estaba en el agua fría sentirá el agua caliente. Esta experiencia demuestra la relatividad de los términos “frío” y “caliente”, debido a que nuestros sentidos han percibido dos sensaciones diferentes de calor para una misma temperatura. El mecanismo de este supuesto engaño de nuestro sentido del tacto será explicado más adelante.

Podemos sentir en forma subjetiva si un objeto está frío o caliente en relación con nuestro cuerpo, pero no podemos recordar, después de un tiempo, qué tan caliente o frío estaba dicho objeto. Tampoco podremos determinar cuál es la diferencia de temperatura de un cuerpo con respecto a otro.

La energía transitoria en su forma conocida como calor, es un concepto un tanto abstracto, que aunque no se ve físicamente, se puede sentir. La Segunda Ley de la Termodinámica impone, que para que esta forma de energía pase de un cuerpo a otro debe existir una diferencia de temperatura entre ellos y la dirección será desde el cuerpo de mayor temperatura al que tiene menor temperatura.

Así, el cuerpo humano, incluyendo el del resto del reino animal, puede discriminar sobre lo caliente o frío. En el primer caso, cuando sentimos que un cuerpo está caliente se debe a que ese cuerpo tiene mayor temperatura que el de la piel, o sea, que recibimos el calor, mientras que cuando lo sentimos frío, la temperatura de nuestro cuerpo es mayor que el otro y le estamos transmitiendo calor. Este fenómeno sensitivo o fisiológico es responsabilidad del sistema metabólico de cada especie. Esto es lo que ocurre en el sencillo experimento de más arriba. Al colocar la mano que estuvo en el envase con agua caliente, la piel alcanza la temperatura del agua caliente hasta lograr el equilibrio térmico. Cuando la colocamos en el agua tibia, que obviamente tendrá menor temperatura que la superficie de la piel, le transmitimos calor hacia el agua tibia activando a su vez la “alarma” que nos dice que estamos disipando mayor cantidad de calor que lo normal y sentimos “frío”. En el caso de la mano en el agua fría, cuando la introducimos al envase con agua tibia, ésta tendrá mayor temperatura que la piel, activando también la “alarma” que nos indica que estamos recibiendo más calor de lo normal y por tanto la sentimos “caliente”. Como vemos, en ambos casos interviene el calor.

2. Antecedentes históricos sobre el calor

El calor siempre se percibió como algo que produce una sensación de calidez, por lo que se podría pensar que su naturaleza fue una de las primeras cosas que la humanidad entendió. Esta percepción es la que motiva a la falsa definición del fenómeno del frío enseñada y aprendida por los estudiantes de este concepto.

La explicación de la naturaleza del calor se debe gracias al desarrollo en el siglo XIX de la teoría cinética, la cual considera que las moléculas se encuentran en continuo movimiento y por tanto poseen energía cinética. De esta manera, el calor se define como la energía relacionada con el movimiento aleatorio de átomos y moléculas.

A pesar que entre el siglo XVIII y a principios del siglo XIX se sugirió que el calor es la manifestación del movimiento en el ámbito molecular, la opinión prevaleciente sobre el calor hasta la mitad del siglo XIX se fundamentó en la teoría del calórico propuesta en 1789 por el químico francés Antoine Lavoisier, en la que exponía que el calórico era una sustancia sin masa, incolora, inodora e insípida que podía pasar de un cuerpo a otro. Cuando el calórico entraba a un cuerpo incrementaba su temperatura y cuando salía ésta disminuía. Cuando el cuerpo no podía asimilar más calórico, se decía que estaba saturado de calórico. Esta interpretación dio lugar a los términos líquido saturado y vapor saturado aún empleados en la actualidad.

Esta teoría experimentó serias críticas inmediatamente se introdujo en el mundo de las ciencias de la época, donde ya se sostenía que la energía no podía crearse ni destruirse (Principio de la conservación de la energía o 1ra Ley de la Termodinámica). Sin embargo, se sabía que el calor podía generarse de modo indefinido, por ejemplo al frotar entre sí dos pedazos de madera. Luego, en 1798, el científico norteamericano Benjamín Thompson demostró en sus artículos que el calor podía generarse de forma continua por el efecto del rozamiento. Más adelante, los experimentos realizados en el 1843 por el inglés James P. Joule, fueron los que convencieron a los escépticos de que el calor no era una sustancia, desvaneciendo el concepto de la teoría del calórico de Lavoisier. A pesar que fue abandonada por completo a mediados del siglo XIX, esta teoría contribuyó en gran medida al desarrollo de la termodinámica y la transferencia de calor (Cengel, 2008).

3. El metabolismo

¿Qué sucedió en el experimento que sugerimos hacer más arriba?

Las actividades metabólicas de los miembros del reino animal, incluidos obviamente los seres humanos, resultan casi completamente en calor que debe ser disipado y regulado continuamente

para mantener la temperatura normal en el cuerpo. Para lograr esto, poseen un mecanismo termorregulador cuyo principal objetivo es asegurar que los órganos vitales (corazón, hígado, pulmones, cerebro, etc.) permanezcan térmicamente protegidos. Para el caso del cuerpo humano, los ajustes al sistema circulatorio, control de las actividades moleculares y tales procesos regulatorios persiguen mantener su temperatura interna promedio en 37 °C. Este valor de la temperatura puede variar ligeramente dependiendo de la edad, género y raza. Pero en sentido general, este es la que fisiológicamente se emplea como referente para determinar la condición de normalidad en la termorregulación de temperatura interna del cuerpo.

La pérdida insuficiente o ganancia de calor excesiva de calor tiende a un sobrecalentamiento del cuerpo (hipertermia), y una pérdida excesiva de calor resulta en un enfriamiento excesivo del cuerpo (hipotermia). Si la temperatura interna del cuerpo llega a ser menor de 28 °C, puede inducir a una arritmia cardíaca e incluso la muerte, y si alcanza una temperatura mayor de 46 °C, puede producir daños irreversibles al cerebro. Inclusive a temperaturas de la piel menor de 18 °C o mayor de 46 °C produce dolor. Por lo tanto, una regulación cuidadosa de la temperatura del cuerpo es una función crítica del sistema termorregulador para mantener la salud. Así, cuando el cuerpo está recibiendo más calor de lo normal al exponerlo ante un cuerpo que se encuentra a mayor temperatura, el sistema termorregulador nos hace sentir “calor”, como una señal de esta irregularidad. Del mismo modo, si estamos expuestos a un cuerpo o ambiente que se encuentra a menor temperatura que la del cuerpo, expedimos mayor cantidad de calor de lo normal y el sistema termorregulador nos hace sentir “frío”. Como vemos pues, en ambos casos son sensaciones fisiológicas para indicarnos la anormalidad en la transferencia de calor entre el cuerpo y su entorno.

El hipotálamo, una glándula localizada en el cerebro, es el órgano central que controla la temperatura del cuerpo. Este tiene millones de ramificaciones nerviosas termo sensores y está bañado por

sangre arterial. Debido a la rápida tasa de recirculación de la sangre y la sangre que retorna se mezcla en el corazón antes de regresar al cuerpo, la sangre arterial es un indicativo de la temperatura interna promedio del cuerpo. El hipotálamo también recibe información sobre la temperatura desde las terminales termo sensores localizadas en la piel y en otras localizaciones (Hensel, 1981).

Esta glándula termorreguladora controla varios procesos fisiológicos para mantener estable la temperatura del cuerpo. Su comportamiento en el control es primeramente proporcional a las desviaciones de las temperaturas normales con algunos aspectos de respuestas con función integral o derivada. El proceso fisiológico más importante es regular el flujo sanguíneo a la piel: cuando la temperatura interna aumenta sobre la temperatura superior permisible por el cuerpo, más sangre es enviada a la piel. Esta puede ser la razón cuando una persona tiene fiebre, la piel se le pone rojiza o cuando nos exponemos a una fuente de calor que se encuentra a altas temperaturas. Esta vasodilatación de las venas de la piel permite incrementar el flujo sanguíneo hasta unas 15 veces (1.7 mL/seg-mt² en reposo a 25 mL/seg-mt² en extremo calor) para permitir el intercambio de calor entre la piel y el ambiente. Cuando el cuerpo se somete a la condición contraria, o sea, la temperatura cae por debajo de la temperatura inferior admisible por el cuerpo, el flujo sanguíneo se reduce por la acción vasoconstrictora de las venas para preservar el calor dentro del cuerpo. Esto tiene un efecto aislante similar a la de colocarse un abrigo. En esta condición, la tensión de los músculos aumenta para generar calor adicional (Hensel, 1981).

Por otro lado, cuando el cuerpo es sometido a altas temperaturas, ocurre la sudoración. Este mecanismo de defensa es una forma poderosa para enfriar la piel y aumentar la pérdida de calor desde el interior, disipando calor latente. Esta función y su control son más avanzados en los humanos que el resto de animales. El mecanismo de este proceso es absolutamente necesario conocerlo para lograr lo que en climatización se denomina la comodidad térmica o *comfort* en

tasas metabólicas por encima del nivel de descanso (Fanger, 1967). Para comprender el concepto de la comodidad térmica, la norma ASHRAE 55 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2005) define la comodidad térmica o *comfort* como “la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente que le rodea”. Esto significa, que en un ambiente climatizado artificialmente (aire acondicionado) que nos hace sentir frío, no se satisface esta condición.

Las glándulas sudoríparas bombean el sudor hacia la superficie de la piel para su evaporación. Si las condiciones son favorables para que esta se efectúe, la superficie de la piel puede permanecer relativamente seca aún a altas tasas de sudoración con muy poca percepción de sudor. En el caso desfavorable para la evaporación, el sudor se riega por toda la superficie cutánea manteniéndose “pegajosa”. Pero, ¿cuándo la condición es favorable o no para la evaporación?

El cuerpo, a través de la piel, intercambia calor con el ambiente, que no es más que aire atmosférico. El aire atmosférico está compuesto de aire seco más vapor de agua. El aire como sustancia higroscópica puede absorber humedad. Mientras menos humedad contenga el aire atmosférico, más se facilita la evaporación del agua contenida en el sudor. En esta condición al efectuarse la evaporación, la temperatura del agua contenida en sudor disminuye sintiéndose la sensación agradable que llamamos “fresco” mientras que las sales y otros constituyentes permanecen en la piel y se van acumulando. Por otra parte, si la atmósfera está muy saturada de humedad, la evaporación del sudor se dificulta y la piel se torna en una condición incómoda resultando pegajosa por las sales y otros constituyentes del sudor.

Un medio para determinar cuando el aire atmosférico es favorable o no para la evaporación del agua es considerando la temperatura de bulbo seco del aire y la humedad relativa, variables físicas necesarias, entre otras, para lograr la condición de comodidad térmica o *comfort*.

4. Balance térmico

Como el propósito del sistema termorregulador del cuerpo es mantener esencialmente la temperatura interna del cuerpo constante en 37 °C, con fluctuaciones normales de ± 1 °C, puede asumirse que para largas exposiciones a un ambiente constante o moderado con una tasa metabólica constante, existe un balance térmico o de energía en el cuerpo, o sea, la producción de calor será igual al calor disipado, y no habrá un almacenamiento importante de calor dentro del cuerpo. El balance de energía para esta condición es:

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = Q_K = Q_R + Q_C \quad (1)$$

Donde:

H = Producción de calor interno en el cuerpo humano.

E_d = Pérdida de calor por difusión del vapor de agua a través de la piel.

E_{sw} = Pérdida de calor por evaporación del sudor desde la superficie de la piel.

E_{re} = Pérdida de calor latente a través de la respiración.

L = Pérdida de calor por respiración seca.

Q_K = Calor transferido desde la piel a la superficie externa de la ropa por conducción.

Q_R = Pérdida de calor por radiación desde la superficie exterior de la ropa y los objetos circundantes al ambiente.

Q_C = Pérdida de calor por convección desde la superficie externa de la ropa y el ambiente.

Esta ecuación expresa que la producción de calor interno H menos la pérdida de calor por evaporación a través de la piel ($E_d + E_{sw}$) y por la respiración ($E_{re} + L$) es igual al calor conducido a través de la ropa (Q_K) y disipado a la superficie exterior de la ropa por radiación y convección ($Q_R + Q_C$). Se asume que la evaporación correspondiente a E_{sw} y E_d toma lugar en la superficie de la piel.

Este balance de energía es necesario para que el cuerpo se mantenga dentro de la comodidad térmica o *confort*. De romperse este balance por adición o disipación de calor hacia o por el cuerpo, el sistema termorregulador nos hace sentir “calor” o “frío”, respectivamente.

A continuación describimos cada uno de los términos que conforman el balance de energía.

A. PRODUCCIÓN DE CALOR INTERNO (H)

La energía liberada por el proceso de oxidación en el cuerpo humano por unidad de tiempo (tasa metabólica M) es algunas veces parcialmente convertida a energía mecánica externa W , pero es principalmente convertida en calor interno del cuerpo, H , de manera que;

$$M = H + W \quad (2)$$

Aplicando la definición de la eficiencia mecánica;

$$\eta = \frac{W}{M} \quad (3)$$

$$H = M(1 - \eta) \quad (4)$$

Que expresada por área de superficie del cuerpo o Área DuBois

$$\frac{H}{A_{Du}} = \frac{M}{A_{Du}}(1 - \eta) \quad (5)$$

A_{Du} se refiere al área de superficie del cuerpo desnudo. La ecuación más útil para medir el área de un cuerpo desnudo fue establecida por el anatomista holandés Eugène F. DuBois (DuBois, 1916) en 1916, y se describe como:

$$A_{Du} = 0.202m^{0.425}l^{0.725} \quad (6)$$

Donde:

A_{Du} = Área de la superficie Dubois, m^2

m = Masa del cuerpo, kg

l = Altura, mt

Un factor de corrección $f_d = A_d/A_{Du}$ debe aplicarse a los términos de transferencia de calor desde la piel para tomar en cuenta la superficie ocupada por la ropa. Este factor se puede encontrar en el ASHRAE-Fundamentals (2005). El resto de los términos del balance térmico son expresados según el valor de A_{Du} .

La magnitud de M/A_{Du} es función de la actividad que esté realizando la persona, que tiene un rango desde una actividad sedentaria hasta trabajo pesado o deportes.

B. PÉRDIDA DE CALOR POR DIFUSIÓN EN LA PIEL (E_d)

La difusión del vapor de agua a través de la piel es una parte de la transpiración insensible, un proceso no sujeto al control del sistema termorregulador. La magnitud de la difusión por unidad de área se asume como proporcional a la diferencia entre la presión parcial del vapor de agua saturada P_s en la piel y la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera, P_v (Bredber, 1956). La ecuación para el cálculo de la pérdida de calor por difusión a través de la piel resulta en:

$$E_d = h_{fg} \kappa A_{Du} (P_s - P_v) \quad (7)$$

Donde:

E_d = Pérdida de calor por difusión a través de la piel

h_{fg} = Calor latente de vaporización del agua a 35 °C

κ = Coeficiente de permeabilidad de la piel

P_s = Presión del vapor de agua saturado a la temperatura de la piel (mm Hg)

P_v = Presión parcial del vapor de agua a la temperatura del aire atmosférico (mm Hg)

El calor latente de vaporización del agua a 35 °C es de 2,418 Kjoule/kg.

La magnitud del coeficiente de permeancia de la piel fue analizado por Tohru Inouye (Inouye, 1953). Para una persona en actividad sedentaria, el análisis lo determinó en un valor de 6.1×10^{-4} kg/hr-mt²-mm Hg.

Tabla N.º 1
Generación típica de tasas metabólicas
para varias actividades del cuerpo humano

Actividad	Tasa metabólica, W/m²
Descansando	
Durmiendo	40
Reclinado	45
Sentado, tranquilo	60
Parado, relajado	70
Caminando sobre superficie nivelada	
0.9 mt/seg	115
1.2 mt/seg	150
1.8 mt/seg	220
Actividades de Oficina	
Leyendo, sentado(a)	55
Escribiendo	60
Escribiendo a máquina o computadora	65
Archivando, sentada(o)	70
Archivando, parada(o)	80
Caminando	100
Empacando	120
Manejando	
Automóvil	60 a 115
Vehículo pesado	185
Actividades Ocupacionales Misceláneas	
Cocinando	95 a 115
Limpieza de la casa	115 a 200
Sentado(a), con movimientos importantes de miembros del cuerpo	130
Trabajo con Máquinas	
Aserrando madera	105
Trabajo ligero	115 a 140
Trabajo pesado	235
Cargando sacos de 50 kg	235
Trabajo con pico y pala	235 a 280
Actividades Misceláneas de Ocio	
Baile	140 a 255
Ejercicios / calistenia	175 a 235
Baloncesto	290 a 440
Levantamiento de pesas	410 a 505

Fuente: Fundamentals: ASHRAE 2005, SI Ed.

C. PÉRDIDA DE CALOR POR EVAPORACIÓN DE LA SECRECIÓN DEL SUDOR (E_{sw})

Para una temperatura del aire, la secreción de sudor y una presión parcial del vapor de agua moderada, es razonable asumir que todo el sudor secretado se evapora. De todos los términos que componen la ecuación del balance térmico (1), la temperatura de la piel t_s y la secreción de sudor E_{sw} son las únicas variables que influyen para mantener el balance de energía y, por ende, la sensación de comodidad térmica. Para una persona realizando cierto nivel de actividad, la vestimenta que esté usando en ese momento y las condiciones del ambiente, surgirá una combinación de la temperatura de la piel y la secreción de sudor a fin el balance de energía quede satisfecho. El sistema termorregulador es bastante efectivo y el balance térmico se mantiene dentro de un amplio límite de variables del ambiente (temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y humedad relativa del aire), correspondiendo a un amplio límite de parámetros fisiológicos (temperatura de la piel y secreción del sudor).

Sin embargo, satisfacer la ecuación del balance térmico (1) está lejos de ser una condición para la lograr la comodidad térmica o *comfort*. Dentro de los amplios límites de las variables del ambiente para el cual el balance térmico puede ser mantenido, hay solo un estrecho intervalo donde se logra la comodidad, en el cual intervienen la temperatura de la piel y la secreción de sudor.

Por estudios realizados por P.O. Fanger (Fanger, 1967), se pueden determinar valores medios de la temperatura de la piel y la secreción de sudor sujetos a diferentes niveles de actividades, para considerar la comodidad térmica. Este experimento fue realizado con hombres y mujeres de mediana edad. Se determinaron las siguientes ecuaciones:

$$\bar{t}_s = 35.7 - 0.032 \frac{H}{A_{Du}} \quad (8)$$

y

$$\bar{E}_{sw} = 0.42 A_{Du} \left(\frac{H}{A_{Du}} - 50 \right) \quad (9)$$

De la ecuación (8) se deduce que al aumentar la actividad, la temperatura de la piel disminuye, permitiendo un incremento de adición de calor hacia el cuerpo desde el entorno o ambiente.

Para una actividad sedentaria, donde la tasa metabólica es de 50 kcal/hr-mt², la secreción de sudor es nula. Para actividades moderadas más altas es necesaria la sudoración para poder mantener la comodidad térmica.

D. PÉRDIDA DE CALOR LATENTE POR LA RESPIRACIÓN (E_{re})

Calor y vapor de agua se transfieren al aire aspirado por el mecanismo de convección y la evaporación desde la mucosa del tracto respiratorio. Una vez el aire alcanza los alvéolos, éste alcanza la temperatura interior del cuerpo y se satura con vapor agua. En la medida que el aire se mueve hacia el exterior a través del tracto respiratorio cierta cantidad de calor se transfiere de nuevo al cuerpo y el agua se condensa pero el aire expirado a través de la nariz todavía contiene más calor y vapor de agua que el aire aspirado desde el ambiente. La respiración resulta entonces en una pérdida de calor latente y sensible desde el cuerpo.

$$E_{re} = h_{fg} \dot{V} (\omega_{ex} - \omega_a) \quad (10)$$

Donde;

E_{re} = Pérdida de calor latente por la respiración

\dot{V} = Ventilación pulmonar (kg/hr)

ω_{ex} = Humedad específica del aire expirado (kg agua/kg aire seco)

ω_a = Humedad específica del aire aspirado (kg de agua/kg aire seco)

h_{fg} = Calor latente de evaporación del agua a 35 °C

La ventilación pulmonar es principalmente una función de la tasa metabólica, aunque se han observado diferencias menores entre

tareas de trabajo donde los movimientos de los brazos y las piernas son dominantes. Según los datos obtenidos en los análisis realizados por E. Asmussen y M. Nielsen (Asmussen E. & Nielsen, 1946) y luego revisado por F. D. Liddell (Liddell, 1963), se ha determinado que la siguiente expresión lineal es útil para los fines prácticos para determinar la ventilación pulmonar para diferentes tipos de trabajos:

$$\dot{V} = 0.0060M \quad (11)$$

Donde:

M = Es la tasa metabólica y depende de la actividad.

E. PÉRDIDA DE CALOR POR RESPIRACIÓN SECA (L)

La pérdida de calor desde el cuerpo debido a la diferencia de temperatura entre el aire aspirado y el expirado puede expresarse como:

$$L = \dot{V}c_p (T_{ex} - T_a) \quad (12)$$

Donde;

C_p = Calor específico a presión constante del aire seco (1.005 KJ/kg- °C)

F. CONDUCCIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE LA ROPA (Q_k)

La transferencia de calor entre la superficie de la piel y la ropa (obviamente, la persona debe estar vestida) es un tanto complicada, ya que envuelve los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, ya que intervienen espacios de aire entre la piel y la ropa. En lo relativo a la conducción, este mecanismo cumple con la Ley de Fourier de conducción. Asumiendo que el calor transferido es unidimensional y en estado estable, la ecuación de conducción de calor de Fourier se reduce a:

$$Q_k = A_{Du} \frac{(T_s - T_{cl})}{R_{cl}} \quad (13)$$

Donde:

Q_k = Calor por conducción a través de la ropa, Joule/seg

A_{Dn} = Área de superficie del cuerpo humano, mt^2

T_s = Temperatura de la superficie de la piel, °C

T_{cl} = Temperatura de la superficie exterior de la ropa, °C

R_{cl} = Resistencia térmica de la ropa, $(mt^2 \cdot ^\circ C)/Watts$

Aquí vemos la importancia de la ropa dependiendo de la estación del año, o la exposición de la persona a un ambiente determinado. En el caso del verano, la ropa debe tener una resistencia térmica que posibilite la transferencia de calor hacia el ambiente y a su vez facilite la traspiración del sudor. En el caso contrario, en ambientes fríos que se encuentran a bajas temperaturas, la resistencia térmica de la ropa debe ser alta para minimizar la transferencia de calor hacia el ambiente y nuestro sistema termorregulador no nos haga sentir frío.

Hay literatura donde se establecen resistencias térmicas empíricas para diferentes tipos de vestimentas.

G. PÉRDIDA DE CALOR POR RADIACIÓN (Q_R)

El intercambio de energía radiante ocurre entre el cuerpo humano, el ambiente y todos los objetos que le rodean. Esta energía radiante o por radiación térmica cumple con la ley de radiación térmica de Stefan-Boltzmann:

$$Q_R = A_{ef} \varepsilon \sigma \left[(T_{cl} + 273.15)^4 - (T_{imr} + 273.15)^4 \right] \quad (14)$$

Donde:

Q_R = Pérdida de calor por radiación, Joule/seg

A_{ef} = Área efectiva de transferencia de calor por radiación del cuerpo vestido, en mt^2

ε = Emisividad de la superficie exterior de la ropa

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W/mt^2 \cdot K^4$)

T_{cl} = Temperatura de la superficie externa de la ropa, °C

T_{imr} = Temperatura media radiante del ambiente, °C

Sin embargo, la geometría del intercambio radiante entre el cuerpo humano y el ambiente ofrece algunas dificultades debido a la irregularidad de los contornos del cuerpo producidos por las extremidades, protuberancias y ángulos de re-entrada. Como el cuerpo humano no es en su totalidad convexo, habrá alguna inter-radiación entre partes del cuerpo y el área efectiva de la ecuación (12). Desde luego, no será el área de superficie actual del cuerpo vestido sino un área reducida por la siguiente relación:

$$A_{ef} = f_{ef} f_{cl} A_{Du} \quad (15)$$

Donde:

- f_{ef} = Factor de radiación efectiva = Área efectiva por radiación del cuerpo vestido / área del cuerpo vestido
 f_{cl} = Relación del área de superficie del cuerpo vestido al área de superficie del cuerpo desnudo.

H. PÉRDIDA DE CALOR POR CONVECCIÓN (Q_C)

La pérdida de calor por convección obedece a la Ley de enfriamiento de Newton. Esta cantidad de calor puede determinarse de la siguiente ecuación:

$$Q_C = A_{Du} f_{cl} h (T_{cl} - T_{\infty}) \quad (16)$$

Donde:

- Q_C = Pérdida de calor por convección, Joule/seg
 h = Coeficiente de convección, W/mt² - °C
 T_{cl} = Temperatura de la superficie de la ropa, °C
 T_{∞} = Temperatura del ambiente, °C

El coeficiente de convección h , depende del tipo de proceso de convección. Para aire tranquilo, o con baja velocidad, el coeficiente de convección se determina aplicando el mecanismo de la convección libre o natural. Para altas velocidades del aire (por la acción

de un ventilador o abanico), se considera el mecanismo de convección forzada. Determinar este coeficiente, en ambos casos, es un tanto complejo, pues el fenómeno incluye, además de transferencia de calor, el flujo de masa y velocidad del aire como fluido que intercambia calor con el cuerpo.

5. Conclusiones

Como puede colegirse, el cuerpo humano continuamente intercambia calor con el ambiente que le rodea. La dirección del flujo de calor dependiente quien tenga mayor temperatura determinará la dirección de la energía en forma de calor. Para la ocurrencia de este fenómeno, se debe tener en cuenta la temperatura del ambiente o cuerpo externo al cuerpo humano y la temperatura de la piel. La piel posee millares de terminales termo sensoriales que envían la señal al hipotálamo y este a su vez se encarga de indicarnos si estamos recibiendo más calor de lo normal, lo cual tiende a aumentar la temperatura interna del cuerpo, nos hace sentir calor, pudiendo llegar a la condición de hipertermia.

En el caso opuesto, si es el cuerpo quien emite el calor hacia el ambiente o cuerpos externos, si la cantidad de calor sobrepasa el límite admisible nos hace sentir frío, como una advertencia que podemos llegar a una condición de hipotermia. Estas dos situaciones están condicionadas a la segunda Ley de la Termodinámica, el calor siempre fluirá desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. Como vemos, en todo caso tiene que estar *presente* la energía transitoria que conocemos como *calor*.

6. Referencias bibliográficas

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. (2005). *Standard 55*. New York: ASHRAE.
- Asmussen, E., & Nielsen, M. (1946). Studies on regulation of respiration in heavy work. *Acta Physiologica*, 12, 171-188.
- Bredber, D. (1956). The difusion of water vapour through human skin. *Journal of Physilogy*, 132, 225-231.
- Cêngel, Y., & Borges, M. A. (2008). *Thermodynamics an engineering approach* (6ta. Ed.). New York: McGraw-Hill.
- DuBois, E. (1916). A formula to estimate aproximate surface area, If height and weight are known. *Archives of Internal Medicine*, 17, 863-871.
- Fanger, P. O. (1967). Calculation of thermal confort: Introduction of basic confort equation. *ASHRAE Transactions*, 73 (2), III 4.1.
- Hensel, H. (1981). *Thermoreception and temperature regulation*. London: Academic Press.
- Inouye, T. (1953). Effect of relative humidity on heat loss of men exposed to environment of 80, 76 y 72 °F. *ASHVE Transaction*, 59, 329-346.
- Liddell, F. (1963). Estimation of energy expediture from expired air. *Journal of Applied Physiology*, 18, 25-29.

José Rafael Jiménez Guzmán

Es ingeniero mecánico egresado de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez (UPR-RUM) en 1971; con estudios de maestría en Ingeniería Mecánica con concentración en Ciencias Térmicas (1971-1972) por la misma Universidad donde se inició en la docencia universitaria. Fue docente adscrito a la Escuela de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Católica Madre y Maestra (1973-1979).

En 1984 se inicia como docente del INTEC, convirtiéndose en el primer coordinador de la carrera de Ingeniería Mecánica desde su ingreso hasta el 2003. A partir de esta fecha pasa a desempeñarse coordinador de Ingeniería General y docente de la carrera de Ingeniería Mecánica. Además es miembro del Colegio Dominicano de Ingenieros y Arquitectos (CODIA-1668) National Fire Protection Association (NFPA-812607) y American Society of Heating, Refrigerating, Air Conditioning Engineers (ASHRAE-05165790).

Email: Jose.rafael@intec.edu.do
jimelec@wind.net.do

Recibido: 31/01/2014

Aprobado: 25/02/2014