

Introducción

La valoración del confort y del estrés térmico revisten cada día mayor importancia y son múltiples las publicaciones que abordan el tema. Un ambiente térmico inadecuado causa reducciones de los rendimientos físico y mental, y por lo tanto de la productividad; provoca irritabilidad, incremento de la agresividad, de las distracciones, de los errores, incomodidad al sudar o temblar, aumento o disminución de la frecuencia cardíaca, etc..., lo que repercute negativamente en la salud e incluso, en situaciones límite, puede desembocar en la muerte.

Es común que la presentación del análisis del microclima se haga mediante índices evaluativos, omitiendo el proceso de desarrollo y análisis, lo que hace difícil la comprensión y la posterior toma de decisiones. Con frecuencia la lectura de los artículos científicos que abordan el tema impide tener una visión de conjunto, ya que habitualmente se presenta el resultado final obviando el proceso de creación (la teoría en que se apoya el índice) y el análisis, planteando únicamente la fase de evaluación, lo que a nuestro modo de ver agudiza un problema acuciante, la falta de conocimiento de qué se está haciendo y lleva al ergónomo, al ingeniero, o al higienista a tomar decisiones mediatizadas por las previsiones sugeridas por los autores de los índices analizados.

Con este libro se pretende no sólo abordar la problemática del ambiente térmico en el ámbito laboral, sino también ayudar a comprender el complejo problema de la interacción entre éste y la persona.

A través de los diferentes capítulos tratados el lector podrá ahondar en un índice determinado, reflexionar sobre la complejidad de la termorregulación humana, resolver un problema concreto o, mediante el programa informático Spring 3.0, modelar diferentes situaciones y analizar resultados divergentes en función de los cambios en algunas de las variables que definen y configuran el microclima que rodea a la persona y que potencia o limita sus capacidades de acción y toma de decisiones.

La proporción de trabajadores que desarrollan su actividad en el sector de servicios es cada vez más numerosa, y son frecuentes los problemas creados por la falta de confort térmico, por lo que es de gran interés disponer de criterios de valoración y métodos de control para estas situaciones.

Mientras tanto, los estados críticos de estrés térmico se siguen manteniendo no sólo en la industria siderometalúrgica, vidrio y hornos en general, sino también en la agricultura, la pesca y la construcción, por citar los sectores productivos más significativos.

El interés por la valoración del microclima laboral no es nuevo y desde principios de siglo los especialistas han procurado encontrar un índice que resuma en un sólo valor una situación microclimática dada.

En España la normativa vigente que regula las condiciones térmicas de los trabajadores se recoge en el anexo III del R.D. 486/1997 sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo incluido en el anexo 2 de este libro.

De todas formas la proliferación de índices es un argumento más que razonable para poner en duda la eficacia absoluta de éstos. Últimamente diferentes normas ISO han sido publicadas y recogidas como cuerpo de doctrina en el campo del estrés y el confort térmico. En esta obra se presentan diferentes índices recogidos por ISO y se analizan los aspectos más relevantes de éstos.

Las tablas 1.1 y 1.2 recogen los índices de confort y estrés más importantes que han aparecido históricamente, así como los autores y los años de publicación.

TABLA 1.1 Índices de confort más importantes

<i>Año</i>	<i>Método</i>	<i>Autor</i>
1923	Temperatura efectiva, TE	Houghton & Yaglogou
1929/36	Temperatura equivalente	Dufton
1931/48	Temperatura resultante	Missenard
1967	Temperatura media de la piel	Gagge
1970	Índice valoración media, IVM	Fanger
1972	Temperatura efectiva estándar, SET	Gagge
1973	Humedad de la piel	González & Gagge

TABLA 1.2 Índices de estrés más importantes

<i>Año</i>	<i>Método</i>	<i>Autor</i>
1945	Índice de viento frío	Siple & Passel
1946	Temperatura efectiva corregida, TEC	Bedford
1947/60	Predicción de la sudoración para 4 horas, P4SR	McArdle & McPhurson
1955	Índice de sobrecarga calórica, ISC (HSI)	Belding & Hatch
1957	Temperatura de globo y de bulbo húmedo, WBGT	Yaglou & Minard
1957	Índice de Oxford, WD	Lind
1960	Predicción de los latidos del corazón	Fuller & Brouha
1963/76	Índice de estrés térmico, ITS	Givoni
1971	Índice de temperatura de globo húmedo, WGT	Bostford
1974/77	Límite de exposición termicofisiológica, PHEL	Dasler
1981	Tasa de sudoración requerida, SW_{req}	Vogt, et al.
1984	Índice del aislamiento del vestido requerido	Holmér

1 Termorregulación del cuerpo humano

El cuerpo humano es un generador constante de calor. Ya, de por sí, una persona sin hacer absolutamente nada y con su gasto energético al mínimo, es decir, sólo para mantener su organismo vivo (metabolismo basal), genera entre 65 y 80 vatios de calor, según su sexo, edad y superficie corporal, mientras que una bombilla eléctrica incandescente de 60 W emite, aproximadamente, 55 W de calor.

El ser humano produce la energía que necesita para mantener su cuerpo vivo y activo, a partir de los alimentos y del oxígeno que, a lo largo de complejas reacciones químicas, se va convirtiendo en calor. Así, alrededor del 50% de la energía de los alimentos ya desde el inicio del proceso se transforma en calor y el otro 50% en trifosfato de adenosina (ATP), del cual la mayoría también se convierte en calor al pasar a formar parte de los sistemas metabólicos celulares que sólo aprovechan una pequeña parte de la energía restante; al final prácticamente toda la energía, de una forma u otra, se transforma en calor dentro del organismo, excepto una fracción, generalmente muy pequeña, que lo hace fuera a partir del trabajo externo que realiza el hombre.

Un hombre de una complexión física normal, descansando genera unos 115 W de calor; caminando por una superficie plana a una velocidad de entre 3,5 y 5,5 km/h genera de 235 W a 360 W; pero si acelera el paso a más de 7 km/h su producción de calor estará alrededor de los 520 W. En un trabajo muy severo la producción de calor puede sobrepasar los 900 W, como es el caso de los deportistas de alto rendimiento que, realizando una actividad muy intensa, pueden alcanzar los 2000 W durante unos minutos.

La eficiencia mecánica del hombre es baja, ya que entre el 75% y el 100% de la energía que produce y consume para realizar sus actividades se convierte en calor dentro de su organismo, según el tipo de actividad, al que hay que sumar el calor producido por el metabolismo basal necesario para mantenerse vivo (figura 1.1).

Sin embargo, la generación continua de calor metabólico no siempre garantiza la temperatura interna mínima necesaria para la vida y para la realización de las actividades cuando las personas se encuentran expuestas a determinadas condiciones de frío, con lo cual las bajas temperaturas pueden llegar a constituir un peligro. No obstante, por lo general los ambientes de altas temperaturas son mucho más peligrosos que los fríos, pues normalmente resulta más fácil protegerse del frío que del calor.

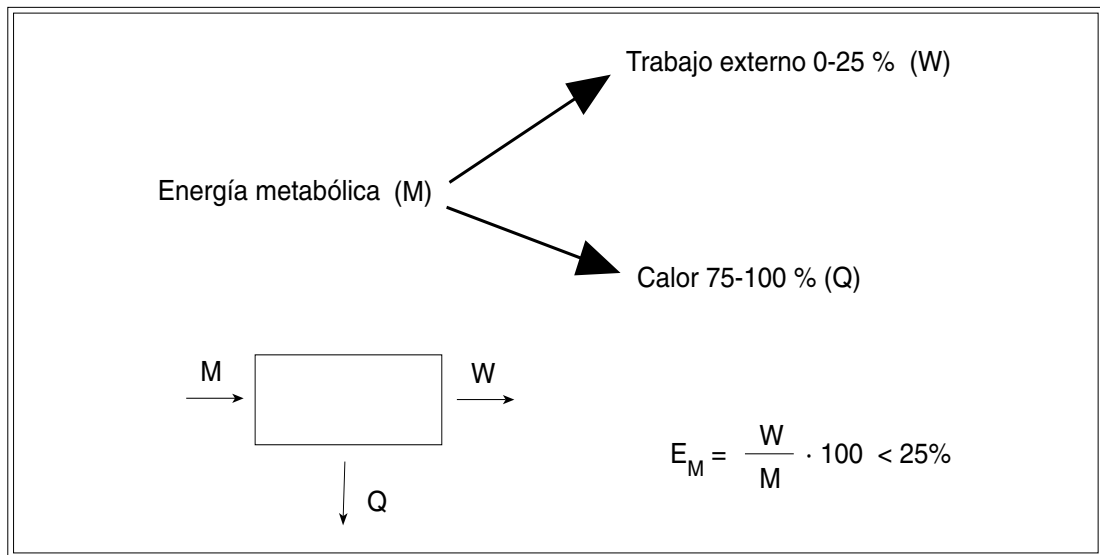


Fig. 1.1 Eficiencia mecánica del hombre

La temperatura interna o central, es decir, la de los tejidos profundos del organismo, es el promedio ponderado de las diferentes temperaturas de las partes y órganos del cuerpo. Estas temperaturas toman diferentes valores según la actividad; la parte del cuerpo y la hora, oscilando con ritmo circadiano, y manteniéndose dentro de $\pm 0,6$ °C aproximadamente, salvo enfermedad febril; incluso si el individuo queda expuesto a temperaturas de bulbo seco tan bajas como 12 °C, o tan altas como 60 °C.

Aunque el intervalo de supervivencia puede extenderse, en algunos casos, desde los 28 °C hasta los 44 °C de temperatura interna (generalmente con daños importantes en el organismo), la temperatura interna considerada normal, en la que no deben producirse afectaciones, oscila alrededor de los 37,6 °C, dentro de un intervalo de 36 °C a 38 °C; no obstante, durante actividades físicas intensas puede llegar a alcanzar los 40 °C, lo cual, en circunstancias específicas, es necesario para lograr el rendimiento adecuado.

También es frecuente hablar de las temperaturas esofágica, axial, bucal o sublingual, rectal y de la piel o cutánea; esta última toma diferentes valores según la parte del cuerpo, por lo que es necesario estimar la temperatura media cutánea. Los valores de la temperatura tomada en el recto (temperatura rectal) son aproximadamente 0,6 °C mayores que los de la temperatura bucal, cuyo valor normal promedio se halla entre 36,7 °C y 37 °C. Mientras que la temperatura media cutánea puede variar en un intervalo más amplio, ya que aumenta y disminuye siguiendo las condiciones ambientales y la actividad metabólica; esta temperatura tiene importancia cuando nos referimos a la capacidad de la piel para ceder calor al ambiente.

Se llega fácilmente a la conclusión de que constituye una condición indispensable, para la salud y para la vida, mantener la temperatura interna dentro de los estrechos límites vitales de la sutil diferencia de 4 ó 5 °C.

El calor generado por el cuerpo (K), puede ser estimado partiendo de las temperaturas rectal y cutánea mediante la siguiente expresión:

$$K = 3,48 P_c (0,65t_r + 0,35t_p) \quad (\text{kilojulios}) \quad (1)$$

donde:

3,48: calor específico del cuerpo, kJ/(kg °C)

P_c: peso corporal, (kg)

t_r: temperatura rectal, (°C)

t_p: temperatura de la piel, (°C)

En la figura 1.2 se muestran esquemáticamente los valores aproximados de las temperaturas en el cuerpo humano bajo las dos situaciones de frío y calor.

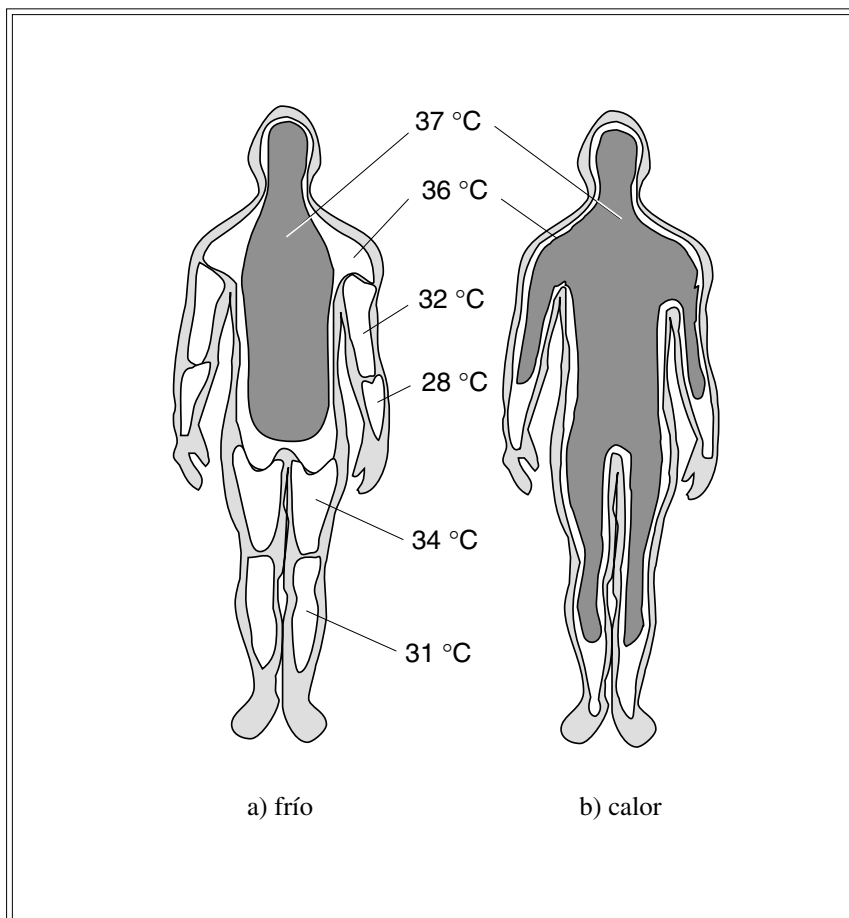


Fig 1.2 Temperaturas aproximadas del cuerpo humano: a) bajo condiciones de frío (20 - 24 °C) y b) bajo condiciones de calor (≥ 35 °C)

En la figura 1.3 puede observarse el ritmo circadiano de la temperatura rectal desde las 8 de la mañana hasta las 8 de la mañana del día siguiente, según Ernst Pöppel.

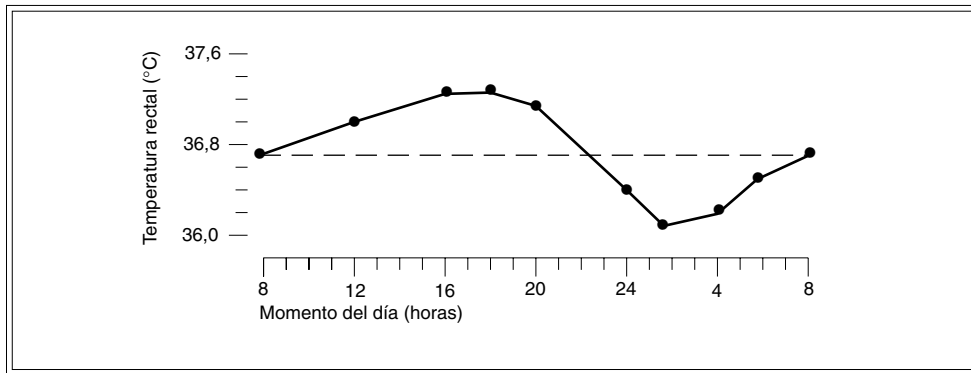


Fig 1.3 Variación circadiana de la temperatura rectal en un período de 24 horas según Ernst Pöppel

Las seis variables que definen la interrelación entre la persona y el ambiente térmico son las siguientes:

- 1) la temperatura del aire,
- 2) la temperatura radiante,
- 3) la humedad del aire,
- 4) la velocidad del aire,
- 5) la actividad desarrollada,
- 6) la vestimenta,

las cuatro primeras las aporta el entorno y las dos segundas la persona.

La sobrecarga térmica y la tensión térmica

Todo ambiente térmico que provoque tensiones en la persona que activen sus mecanismos de defensa naturales para mantener la temperatura interna dentro de su intervalo normal, constituye una sobrecarga. Las sobrecargas térmicas (por calor o por frío) provocan en el hombre las tensiones térmicas (por calor o por frío).

Se define la sobrecarga calórica (*Heat Stress*) como la causa que provoca en el individuo el efecto psicofisiológico que se denomina tensión calórica (*Heat Strain*); mientras que la sobrecarga por frío (*Cold Stress*) es la causa que provoca en el hombre el efecto psicofisiológico que se denomina tensión por frío (*Cold Strain*).

A efectos prácticos, se considera que el ambiente térmico puede ser de cuatro tipos:

- 1) de bienestar o confort;
- 2) permisible;
- 3) crítico por calor;
- 4) crítico por frío.

Las condiciones de bienestar o confort son las óptimas, el sujeto se encuentra satisfecho y su organismo mantiene el equilibrio térmico, es decir: su temperatura interna se mantiene dentro de los límites fisiológicos normales, sin tener que efectuar para ello ajustes de adaptación a un medio más o menos hostil. Incluso las condiciones permisibles obligan a la persona a efectuar determinados ajustes fisiológicos para alcanzar el equilibrio térmico y conservar su temperatura interna dentro de los límites normales, lo que provoca una tensión térmica más o menos severa, según la sobrecarga térmica existente, la ropa, la actividad y sus características individuales. Estos ajustes, incluso existiendo equilibrio térmico, al menos provocarán molestias psicológicas, aunque teóricamente, defenderán a las personas de la agresión ambiental y no provocarán daños fisiológicos.

En las condiciones críticas, ya sea por frío o por calor, no hay equilibrio térmico entre el ambiente y el cuerpo humano. En ambiente crítico por frío la temperatura interna bajará continuamente hasta provocar la muerte si el sujeto permanece expuesto al mismo, mientras que en el ambiente crítico por calor la temperatura interna se elevará continuamente con el mismo resultado fatal, si el individuo permanece expuesto el tiempo suficiente.

En el gráfico que se muestra en la figura 1.4 aparece la curva aproximada que relaciona la sobrecarga térmica con la tensión térmica en un sujeto.

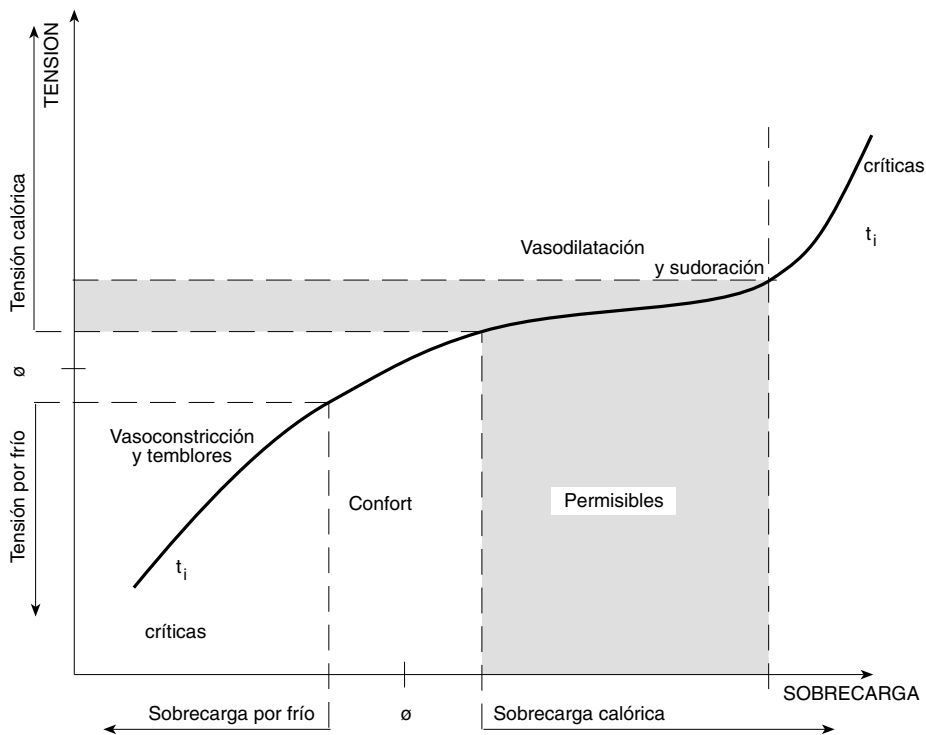


Fig. 1.4 Curva de sobrecarga confort-tensión, aproximada, de un sujeto

Sin embargo, no todos los individuos reaccionan igual frente a la misma sobrecarga térmica y lo que para unos puede constituir un ambiente severo, para otros pudiera no serlo tanto, tal como se observa en la figura 1.5.

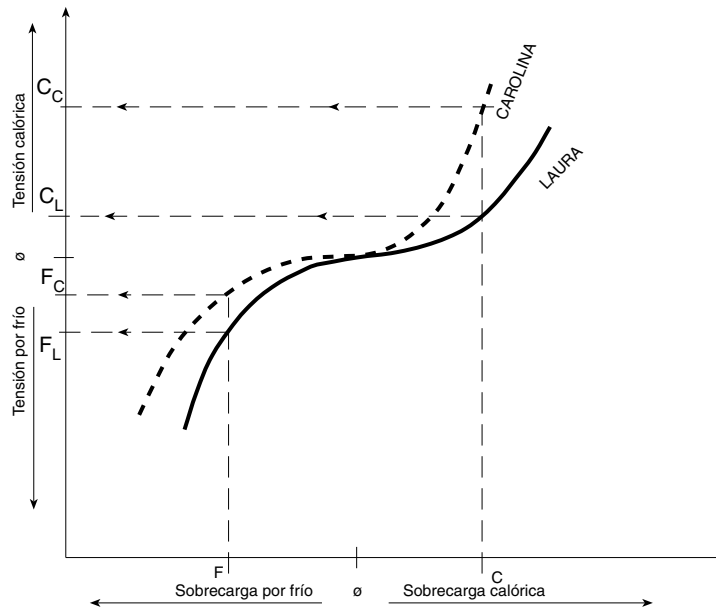


Fig. 1.5 Gráfico con las curvas de sobrecargas y tensiones calóricas y por frío de Laura y Carolina

Obsérvese que, ante una sobrecarga calórica (C), Laura reacciona con una tensión calórica (C_L) y Carolina con una tensión calórica (C_C) mucho mayor que la de Laura ($C_C \gg C_L$); mientras que ante la sobrecarga por frío (F), Carolina enfrenta mejor la situación pues responde con una tensión por frío (F_C) y Laura peor, con una tensión por frío (F_L) ($F_C \ll F_L$).

La exposición a ambientes calurosos, desde el punto de vista conductual, puede provocar la pérdida de la motivación por la actividad, la disminución de la concentración y de la atención, con el consecuente incremento de los accidentes, y una disminución de la calidad del trabajo y del rendimiento, que puede, según algunos autores, decaer hasta en un 40%.

Desde el punto de vista fisiológico la tensión calórica puede provocar: deshidratación, quizás calambres debido a un trabajo pesado con sudoración abundante e ingestión de grandes cantidades de agua, síncope de calor con la pérdida del conocimiento debido a un largo período de inmovilidad en ambientes calurosos, agotamiento por deshidratación y pérdida de sal por exposición de varios días en sujetos no aclimatados; o, de súbito, tras esfuerzos físicos intensos y prolongados, manifestaciones de naturaleza digestiva (náuseas y vómitos), cardiovascular (hipotensión, malestar general, lividez, dolores de cabeza, taquicardia, etcétera), neurológica (vértigos y desorientación), golpe de calor (pérdida súbita del conocimiento, piel seca y caliente, incremento de la temperatura interna hasta más de 40 °C, convulsiones y estado de coma).

Por su parte, la exposición excesiva a ambientes fríos (lo mismo en actividades a la intemperie como en locales industriales especialmente preparados por razones tecnológicas a temperaturas muy bajas) puede provocar, en primer lugar, malestar general, con torpeza manual por el anquilosamiento de las articulaciones y elevación del umbral táctil; en una segunda etapa, eritemas perniciosos (sabañones), piel de trincheira y congelaciones; y, finalmente, cuando la temperatura interna desciende hasta 36,3-34 °C, aparece la hipotermia con intensa sensación dolorosa de frío, tiriteo, palidez, taquipnea, taquicardia y tensión arterial excesivamente alta; si la temperatura desciende entre 34 °C y 27 °C, se presenta rigidez muscular, bradipnea, bradicardia, hipotensión, somnolencia, embotamiento sensorial y apatía; y por último al descender la temperatura rectal por debajo de los 27 °C, se pierde totalmente la conciencia, los músculos se relajan, se desarrolla la fibrilación ventricular y sobreviene el paro cardíaco o desaparecen totalmente los reflejos y cesa la función respiratoria.

Afortunadamente, los mecanismos fisiológicos de la termorregulación son muy eficientes, y en los casos en que las condiciones microclimáticas y la actividad metabólica no permitan un confortable balance térmico entre el cuerpo y el entorno, se puede desarrollar una tensión más o menos importante según la situación, con el fin de tratar de alcanzar un equilibrio térmico aceptable, aunque creando incomodidades, fatiga, disminución de la capacidad física y de la capacidad mental. De no lograrse tampoco este equilibrio térmico aceptable o permisible porque los mecanismos fisiológicos resultaran insuficientes para resolver el conflicto, la salud de la persona se afectaría al incrementarse o disminuir la temperatura corporal fuera de los límites del intervalo considerado normal.

El mantenimiento de la temperatura corporal dentro de los citados límites es el resultado del equilibrio entre ganancias y pérdidas de calor del cuerpo situado dentro de un microclima determinado: si las ganancias superan a las pérdidas, el calor se acumulará en el organismo y la temperatura de éste tenderá a elevarse constantemente hasta alcanzar valores críticos que, de no variar la situación, pueden poner en peligro la vida.

Por cada grado centígrado de incremento de la temperatura interna, la frecuencia cardíaca se incrementa unas 10 pulsaciones por minuto, y a partir de 41°C disminuye al decaer la eficiencia cardíaca. Si, a la inversa, las pérdidas superan a las ganancias, el organismo irá perdiendo calor y su temperatura disminuirá hasta valores críticos que pueden dar al traste con la supervivencia.

No obstante, sería absurdo pensar que la permanencia de la persona en condiciones de bienestar térmico de forma permanente o estable, sería lo mejor para su salud. El organismo necesita estar entrenado y utilizar sus mecanismos de adaptación dentro de límites razonables; de lo contrario, al perderlos por falta de uso, quedaría indefenso ante posibles situaciones inesperadas, además de perder la posibilidad de continuar desarrollándose como ser vivo.

La sudoración, por ejemplo, no sólo es necesaria para lograr el equilibrio térmico, sino como un mecanismo eliminador de residuos metabólicos y un acondicionador de la piel. El deportista desarrolla su cuerpo entrenándose hasta el estrés, como el intelectual desarrolla sus capacidades mentales ejercitando su profesión también hasta el estrés, porque las tensiones son imprescindibles para el desarrollo. Es más que conocido que el deportista antes de entrar en competición o iniciar una sesión de entrenamiento necesita un calentamiento previo (*warm up*) que incremente su actividad metabólica, de lo contrario

puede sufrir lesiones importantes y, en el mejor de los casos, alcanzará un bajo rendimiento. Para deportes de alta intensidad energética la temperatura interna del sujeto durante las actividades puede, y necesita, alcanzar los 40 °C, como premisa indispensable para poder elevar la capacidad de trabajo físico.

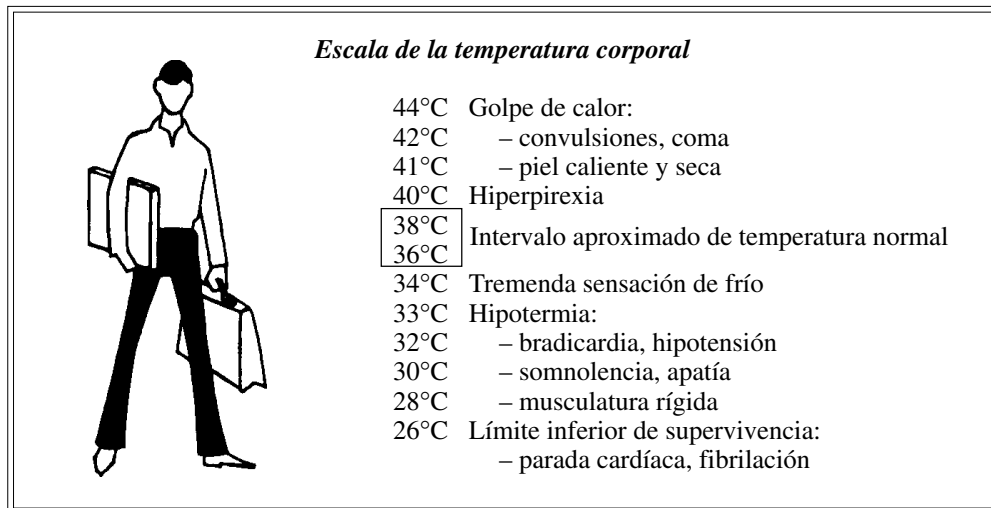


Fig. 1.6 Intervalo de temperaturas del cuerpo humano con límites superior e inferior de supervivencia

Por otra parte, la sensación de bienestar no es patrimonio exclusivo de las condiciones de confort térmico; cuando un deportista se está entrenando o está en competición, a pesar de que su temperatura interna se eleva y su organismo está sometido a tensión calórica, siente determinada satisfacción y hasta euforia, de las que no son ajenas las endorfinas que segrega su organismo: es el caso de la “enigmática sonrisa” de los corredores de largas distancias.

Balance térmico entre la persona y el medio

El concepto de intercambio térmico se puede analizar como un estado de cuentas en el que el saldo final debe ser cero para que todo marche bien. Entonces se dice que el balance térmico entre el individuo y su entorno está en equilibrio. La persona, como todo cuerpo (sólido, líquido o gaseoso), constantemente emite calor hacia el medio y, a su vez, constantemente es receptor del calor que emiten los demás cuerpos.

El hombre gana calor por las siguientes vías:

1. Por su metabolismo (M), determinado por su metabolismo basal y la actividad que realice.
2. Por radiación de calor (R), que recibe de los cuerpos de su entorno.
3. Por convección (C), al recibir calor del aire (o agua) que está en contacto con él.
4. Por la respiración (Res), al inspirar aire caliente cuya temperatura esté por encima de su temperatura corporal.
5. Por conducción (K), al recibir calor de los cuerpos sólidos que están en contacto directo con él.

A su vez, el hombre pierde calor por las siguientes vías:

1. Por radiación de calor (R), que emite hacia los cuerpos de su entorno.
2. Por convección (C), al entregar calor al aire que está en contacto con él.
3. Por la respiración (Res), al espirar el aire durante la respiración y el jadeo.
4. Por trabajo externo (W), al realizar una actividad con un trabajo externo positivo.
5. Por evaporación del sudor (E), al entregarle calor al sudor para que éste pueda evaporarse.
6. Por conducción (Cd), al entregar calor a los cuerpos sólidos que están en contacto directo con él.

En la práctica se pueden despreciar los intercambios por respiración y por conducción y, salvo determinadas situaciones, el trabajo externo, teniendo en cuenta que en la mayor parte de las actividades su valor es bajo o nulo. De manera que la ecuación práctica de balance térmico quedaría:

$$M \pm R \pm C - E = A \quad (2)$$

Donde A sería el saldo final, es decir, el calor acumulado (si $A > 0$), o perdido (si $A < 0$), en el organismo como consecuencia de un desequilibrio; y si $A = 0$, significa que existe equilibrio térmico. Por lo tanto, la ecuación de balance térmico puede adoptar una de estas cuatro formas que, según la situación, significan:

- 1) $M \pm R \pm C = 0$, ($E = 0$) equilibrio en condiciones necesarias pero no suficientes para el confort térmico,
- 2) $M \pm R \pm C - E = 0$, equilibrio en condiciones de calor permisibles,
- 3) $M \pm R \pm C - E > 0$, desequilibrio por condiciones críticas por calor,
- 4) $M \pm R \pm C < 0$, desequilibrio por condiciones críticas por frío.

En la figura 1.7 se esquematiza la entrega de calor de la piel según la humedad sea del 30 o del 90 %, mediante R, C y E, bajo determinadas condiciones de sobrecarga calórica (temperatura del aire: 25 °C; velocidad del aire: 0,3 m/s), temperatura de la piel: 35 °C y un trabajo físico pesado de 254 W/m².

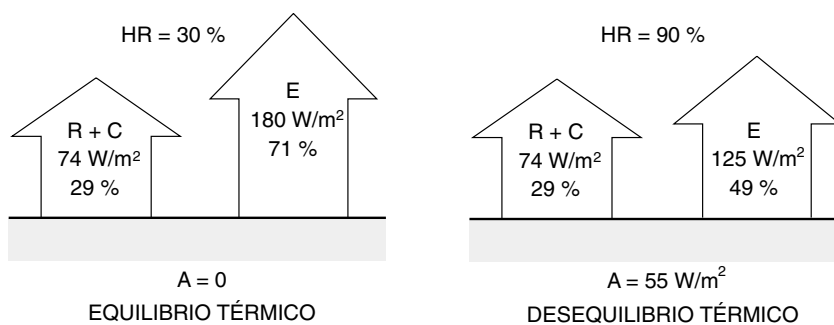


Fig. 1.7 Entrega de calor de la piel según la humedad

La ecuación de balance térmico se explicará con más detalles en el capítulo 2, dedicado a ello.

Metabolismo

Los factores internos más importantes que inciden en la producción de calor en el cuerpo son: el metabolismo basal de todas las células del organismo, la actividad muscular (incluyendo las contracciones musculares durante el acto de tiritar en ambiente frío), la acción de la tiroxina sobre las células; la acción de la adrenalina y la noradrenalina, la estimulación simpática de las células y el incremento de la temperatura en las propias células del organismo.

Podemos definir el metabolismo como la suma de las reacciones químicas que se producen en todas las células del organismo. El límite mínimo del metabolismo está determinado por la actividad fisiológica básica para mantenerse vivo, por lo que recibe el nombre de metabolismo basal (M_B). El metabolismo basal varía con la edad, el sexo, el peso y por otras causas de origen psicofisiológico.

Mientras el metabolismo de un niño de dos años puede alcanzar los 60 W por metro cuadrado de superficie corporal, al cumplir los 25 años estará en 44 W por metro cuadrado, y a los 80 años su metabolismo basal habrá descendido a 38 W por metro cuadrado de superficie corporal.

La diferenciación entre sexos, a los efectos del microclima, comienza a edad bien temprana, se acentúa partir de los 10 años y las diferencias se mantienen más o menos constantes hasta la vejez. Se puede estimar de una manera muy práctica y suficientemente precisa para trabajos ergonómicos si se considera que el metabolismo basal de las mujeres es aproximadamente de 40,6 W/m² y el de los hombres 42,9 W/m². Es posible determinar, con más exactitud, el metabolismo basal de una persona a través de su consumo de oxígeno bajo determinadas condiciones ambientales, psicológicas y fisiológicas.

A partir del metabolismo basal, las actividades físicas y los estados emocionales, según su intensidad, incrementarán el metabolismo. Para determinar el calor que genera el cuerpo en la realización de una actividad es necesario considerar tanto el calor producido para ejecutarla como el generado por el metabolismo basal.

Por ejemplo: supóngase una actividad física para la cual la eficiencia mecánica del sujeto alcanza el 25%, como pudiera ser el ciclismo, que a 20 km/h requiere un consumo energético aproximado de 590 W; y téngase en cuenta que el ciclista es un hombre con un metabolismo basal de 77 W. El calor generado (Q) por el ciclista se puede determinar como el 75% del gasto energético empleado en pedalear (GE_w) más el metabolismo basal (M_B):

$$Q = 0,75 \times GE_w + M_B ; \quad Q = 519,5 \text{ W}$$

Mecanismos fisiológicos de la termorregulación

Los estudios efectuados por los especialistas indican que el centro encargado de regular las temperaturas en todas las partes del cuerpo radica en el hipotálamo, y que se informa de la situación mediante los sensores que están distribuidos por todo el organismo enviando sus "informes" al centro termorregulador a través del sistema nervioso periférico aferente. A su vez, el centro emite sus órdenes reguladoras a través del sistema eferente.

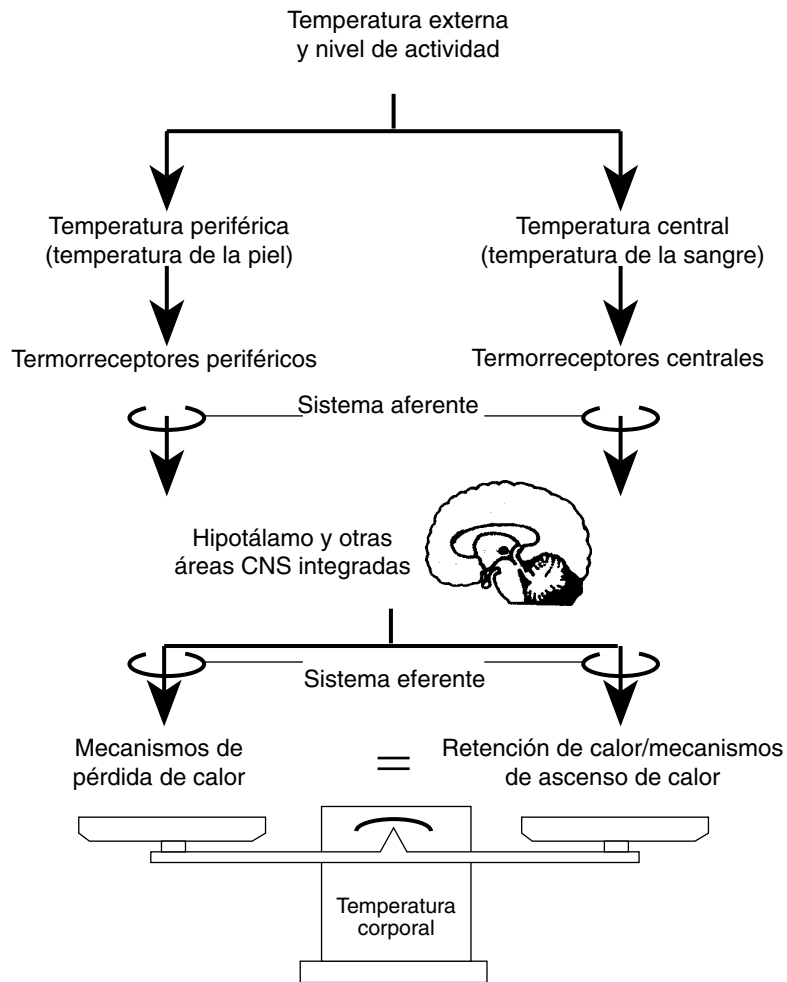


Fig. 1.8 Esquema del sistema termorregulador según Grandjean

Además de otras funciones, el sistema cardiovascular desempeña un papel fundamental en la termorregulación, evacuando hacia la piel, en caso de tensión calórica, los excesos de calor que se acumulan en los órganos y en los músculos para que éste pueda ser disipado hacia el ambiente, o en caso de frío termoaislando al organismo para evitar en lo posible pérdidas importantes de calor.

Sobrecarga calórica

Bajo condiciones calurosas el centro termorregulador incrementa el flujo sanguíneo cargado del exceso de calor interno hacia los vasos capilares de la piel, que puede llegar a ser el 30% del flujo total. De esta forma la piel aumenta su temperatura y facilita la disipación de calor hacia el entorno por convección y por radiación.

Si las pérdidas de calor por convección y radiación no resultasen suficientes para evitar el incremento de la temperatura corporal, el centro regulador ordenaría a las glándulas sudoríparas que inicien la segregación de sudor, con el objetivo de que su evaporación provoque la evacuación del calor excesivo de la piel entregado por la sangre que fluye por los capilares cargada del calor interno excedente.

Hay que tener en cuenta que la sudoración de por sí no garantiza la evacuación del calor de la piel, sino que es la evaporación del sudor, la cual no depende del individuo, sino de la humedad contenida en el aire circundante, de la calidad y cantidad de la ropa, y de la velocidad relativa del aire respecto a la persona.

La excesiva sudoración en ambientes calurosos durante largos períodos de tiempo puede resultar perjudicial, ya que implica una pérdida de agua y de sales, como el cloruro de sodio, que si no son repuestas provocarán importantes daños en el organismo. Si por otra parte el ambiente es muy húmedo y el sudor no se evapora o se evapora poco, la piel mojada frena la sudoración, que puede llegar a ser inútil y un elemento adicional de malestar por su goteo, por el desgaste, etcétera. Pero, aun en un ambiente que facilite la evaporación del sudor, si la piel está mojada el rendimiento evaporativo sólo será del 50%, mientras que si está seca será del 100%.

Se puede considerar que 390 W/m^2 es un límite fisiológico máximo aceptable de ritmo de sudoración (S_{max}) sostenido durante 8 horas de exposición para sujetos normales (Olesen, 1985), lo que representa, aproximadamente, 1 litro de agua por hora para una persona con una superficie corporal de $1,8 \text{ m}^2$. En caso de evaporarse este litro de sudor sobre la piel haría perder al cuerpo unos 2.527 kJ .

Según Guyton, una persona no aclimatada puede sudar $1,5$ litros/h y con 10 días de aclimatación puede elevar su sudoración a 3 litros/h. Sin embargo, la pérdida de 1 litro de agua por hora es una sudoración intensa si se prolonga durante 8 horas, que en caso de no reponerse representa la pérdida de 8 litros, con lo que se quebranta el balance hídrico del cuerpo, pues la pérdida de $1,5$ litros de agua es suficiente para que el volumen sanguíneo disminuya en una cantidad importante, lo que provocaría el incremento del trabajo cardíaco al aumentar la densidad de la sangre .

Una persona no aclimatada, además de sudar menos, sólo puede mojar el 85% de su superficie cutánea y su secreción será menos uniforme, por lo que su eficacia evaporativa será menor.

Por otra parte, la temperatura corporal y la frecuencia cardíaca se incrementan, por lo que acarrear malestares, desinterés por la actividad y sed. Cuando las pérdidas de agua alcanzan entre los 2 y los 4 litros, la capacidad de trabajo físico disminuye notablemente y se producen serias afectaciones fisiológicas. Strydom (1976) señala que la vitamina C estimula la sudoración y recomienda su utilización para acelerar el proceso de aclimatación, considerando que su carencia retarda ese proceso y su presencia lo cataliza. Según este autor el consumo de 250 mg de vitamina C al día permite reducir el tiempo de aclimatación promedio de $8,7$ días a $5,2$ días. Tampoco puede olvidarse que las cremas y lociones pueden actuar negativamente impidiendo o disminuyendo la evaporación del sudor.

De los diferentes componentes del sudor, el sodio es el más importante, y su carencia puede ocasionar mayores perturbaciones. Una insuficiencia de cloruro de sodio, o una ingestión excesiva de agua, conduce a estados de excitación. En los ambientes de calor intenso, tomar grandes cantidades de agua de una sola vez puede provocar estados de excitación con accesos de cólera. Se origina, además, un ensancha-

miento de los vasos de la piel y una intensa hipersensibilidad subjetiva al calor incluso si permanece normal la temperatura del cuerpo, y la frecuencia cardíaca se eleva excesivamente sin que existan condiciones exteriores que lo justifiquen.

De todo lo anterior se desprende la necesidad de acceder, sin restricciones, al agua potable y fresca, cuando se está expuesto a ambientes calurosos y teniendo presente que la sed no es siempre un estímulo suficiente para la reposición de las cantidades hídricas perdidas, sobre todo cuando se alcanzan edades por encima de los cuarenta años, por lo que se requiere disciplinar al individuo en la ingestión frecuente de cantidades racionales de agua, que no superen los 100-200 cc de una sola vez.

Sobrecarga por frío

En ambientes fríos el centro termorregulador ordena disminuir el flujo sanguíneo hacia la piel, que puede llegar hasta casi cero, lo que provoca el enfriamiento de la piel, y evita así pérdidas de calor por ésta y propicia la conservación necesaria del calor interno.

Así, de hecho la naturaleza nos convierte en un recipiente térmico. Si a pesar de ello el cuerpo continúa perdiendo calor, se inician los temblores (tiriteo), que no son otra cosa que un ejercicio físico involuntario para generar calor mediante el incremento de la actividad metabólica (por tal motivo, los temblores pueden ser sustituidos por un ejercicio físico volitivo), se incrementa la producción de calor interno por la excitación simpática dirigida a la secreción de adrenalina y noradrenalina que permite la oxidación de los alimentos sobrantes sin sintetizar ATP y produciendo así sólo calor; y la secreción de tiroxina.

Sin embargo, si a pesar de esto el cuerpo continúa perdiendo calor y su temperatura llega a ser inferior a los 34,5 °C, el hipotálamo pierde parte de su capacidad de control de la temperatura corporal; si alcanza valores inferiores a los 29,5 °C, lo pierde totalmente, con lo que cesan los mecanismos de adaptación: las células van disminuyendo su producción de calor y cesan los útiles temblores (tiriteo). No obstante, el organismo aún intenta salvar la situación cuando su temperatura desciende hasta casi la congelación enviando sangre caliente hacia la piel. La piloerección, mecanismo muy útil en muchos animales, carece de efectividad en el ser humano.

Factores que influyen en el estrés térmico

No resulta sencillo determinar los efectos de la exposición al calor o al frío, pues algunos factores son difíciles de identificar y evaluar. Al efectuar experimentos con grupos de personas expuestas a condiciones de sobrecarga térmica, sucede que las reacciones resultan muy variadas y se producen algunas respuestas completamente diferentes. Esto puede ser, simplemente, consecuencia de las diferencias fisiológicas entre sujetos (aclimatación, edad, aptitud física, sexo, constitución corporal, etcétera). Pero también pueden intervenir otros factores personales más sutiles, como es el estado físico de las personas, que puede variar en unas horas por múltiples causas. En pruebas efectuadas con grupos de personas sometidas a diferentes condiciones térmicas, se ha encontrado que la misma persona y bajo idénticas condiciones de vestimenta y actividad, ante un ambiente térmico que en días anteriores le pareció confortable, en otro momento lo ha hallado ligeramente frío o ligeramente caluroso.

Experimentos efectuados (Fanger, P.O., Hojbjerre, J. & Thomsen, J.O.B., 1973) con 16 sujetos durante un ambiente simulado de 8 horas de trabajo de una actividad sedentaria, con una vestimenta de 0,6 clo, velocidad relativa del aire menor de 0,1 m/s, humedad relativa del 50% y temperatura radiante media igual a la temperatura del aire, muestran que la temperatura ambiental preferida oscila ligeramente siguiendo el ritmo circadiano de la temperatura interna del cuerpo, con tendencia a preferir temperaturas algo superiores (de casi 1,5 °C) entre las 12 y las 13 horas, en relación con las 9 y 10 horas.

Por otro lado, según investigaciones realizadas por la Universidad de Kansas (1990) no existen diferencias entre las temperaturas preferidas para condiciones de confort, entre el invierno y el verano.

Sexo

Por lo general las mujeres muestran mayores dificultades para soportar la sobrecarga calórica que los hombres, sobre todo cuando están embarazadas. La menor capacidad cardiovascular de la mujer hace que se aclimate peor. Su temperatura de la piel, la capacidad evaporativa y su metabolismo son ligeramente inferiores de las de los hombres.

Respecto a la temperatura de confort preferida, experimentos realizados con 520 mujeres y la misma cantidad de hombres muestran diferencias mínimas: Nevins da como valores de referencia 25,8 °C para las mujeres y 25,4 °C para los hombres, mientras que Fanger & Langkilde dan 25,1 °C para las mujeres y 25,0 °C para los hombres. Según B.W. Olesen, estas pequeñas diferencias pueden deberse a que las mujeres utilizan ropas más ligeras.

Constitución corporal

El elefante padece por el calor, mientras que el ratoncillo muere por el frío. El elefante y el ratoncillo son dos mamíferos terrestres de constituciones corporales límites, son los dos extremos frente al calor y frente al frío. Los elefantes, por su tamaño, sufren con el calor, y necesitan ducharse a menudo con su trompa, no por limpios, sino para disipar su exceso de calor por evaporación del agua; frente a ellos los ratoncillos, también por su tamaño, sufren por el frío, por lo que deben comer continuamente, no para gastarse los dientes que crecen continuamente (como se creía antes), aunque es cierto este crecimiento, sino para mantener alta su producción de calor metabólico y no morir de frío.

Por lo mismo, las personas corpulentas están en desventaja en ambientes cálidos pero en ventaja en los ambientes fríos, frente a las personas menos corpulentas. Esto se debe a que la producción de calor de un cuerpo es proporcional a su volumen (W/m^3), mientras que la disipación es proporcional a su superficie (W/m^2), por lo que, a medida que aumenta el tamaño corporal la relación superficie-volumen se hace cada vez menor, dado que la superficie crece con el cuadrado de sus medidas y el volumen crece al cubo.

Sin embargo, un trabajador corpulento está en ventaja cuando, sin que se le exijan grandes esfuerzos temporales, se ve expuesto a grandes cambios de temperatura para temperaturas extremas actuando sólo

durante un tiempo relativamente corto, por el efecto amortiguador del cuerpo, que es mayor cuanto menor sea la relación superficie/volumen.

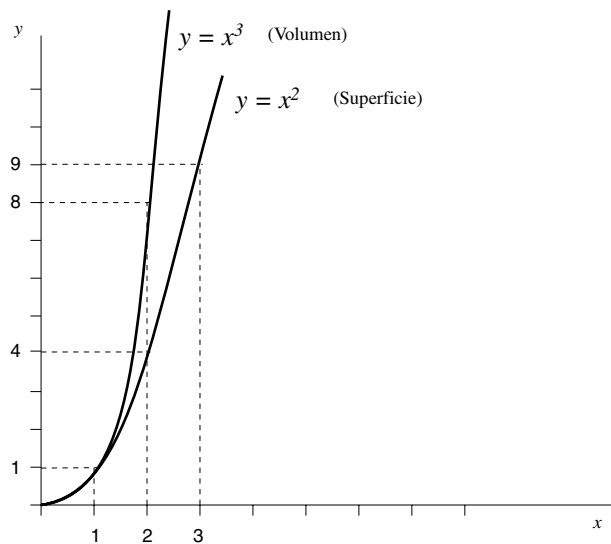


Fig. 1.9 Curva cuadrática y cúbica representativas de la relación superficie/volumen

Edad

Con la edad los mecanismos termorreguladores del organismo se hacen menos eficientes. La frecuencia cardíaca máxima y la capacidad de trabajo físico disminuyen, y la producción de calor metabólico correspondiente a una determinada cantidad de trabajo aumenta poco o nada con la edad.

En ambientes muy calurosos, las personas de más edad tropiezan con más dificultades que las jóvenes para disipar la carga calorífica, al parecer debido a un retraso en la respuesta de sudoración, que se muestra lenta, y a una disminución de la capacidad de disipar calor, lo que da como resultado un almacenamiento superior de calor durante la actividad, y un aumento del tiempo necesario para la recuperación.

Respecto a preferencias de la temperatura ambiental, según Collins & Hoinville (1972), no existen diferencias notables entre jóvenes y viejos. Seguramente el metabolismo menor en las personas de más edad compensa la menor pérdida de calor por evaporación.

Etnia

Las diferencias étnicas frente al calor son sumamente sutiles y no se ha podido comprobar que el color de la piel tenga efectos importantes en la absorción de las radiaciones infrarrojas. Por otra parte, cuando sujetos nórdicos, por ejemplo, se exponen por primera vez a los climas calurosos del trópico, sus orga-

nismos sufren notablemente, hasta que se aclimatan, por lo que seguramente las diferencias se deban más a problemas de aclimatación.

En el caso de las etnias de pieles oscuras, que teóricamente deben absorber más las radiaciones infrarrojas, al parecer esto lo contrarrestan por una mayor preparación frente a los climas calurosos exteriores lograda por la evolución y, por otro lado, sus pieles también están más preparadas para enfrentar mejor las radiaciones ultravioletas del sol que, como sus radiaciones visibles, sobre todo las azules y violetas, son portadoras de tanto o más calor que las infrarrojas, por estar la temperatura superficial del sol alrededor de los 6200-6500 K. Esto se explica por el desplazamiento que sufren los valores máximos de las curvas de energía radiante, según la Ley Wien. En la figura 1.10 aparecen dichas curvas con el desplazamiento de los máximos.

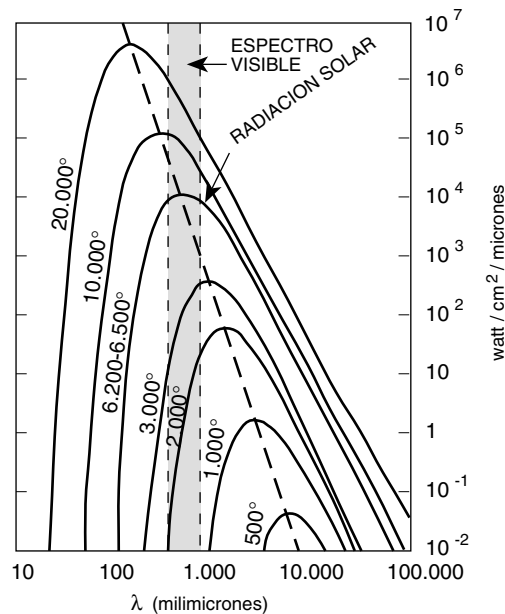


Fig. 1.10 Curvas de la Ley de Wien. Curvas de radiación para cuerpos emisores con temperaturas entre los 500 K y los 20.000 K, incluyendo la radiación del sol, que muestra el desplazamiento de los picos de mayor energía hacia las ondas cortas.

En las etnias de piel más clara, la piel expuesta durante largos períodos de tiempo al sol modifica su color oscureciéndose progresivamente mediante la producción de melanina, aún sin necesidad de cremas para “broncearse”, con el fin de protegerse de los rayos ultravioletas; éste ha sido, probablemente, el mecanismo que ha determinado el color de piel que habría de tener el hombre según donde se desarrollase y viviese, como el tipo de cabellos africanos, que todo indica que está preparado para frenar la incidencia de los rayos solares sobre la cabeza mediante un colchón de aire amortiguador.

El vestido

Otro factor muy importante es el vestido que modifica la interrelación entre el organismo y el medio al formar una frontera de transición entre ambos que amortigua o incrementa (según el caso) los efectos del ambiente térmico sobre la persona.

La importancia de la vestimenta es conocida por el hombre ancestralmente y antes de convertirse en un accesorio de elegancia y distinción, en anzuelo sexual, atributo de jerarquía y poder, moda y negocio de pasarela, fue un mecanismo de protección frente al ambiente térmico. La ropa ejerce un apantallamiento protector ante el calor radiante del sol o de un horno y en caso de frío limita el contacto de la piel con el aire frío, formando un colchón de aire caliente (calentado por el cuerpo) entre el aire frío y la piel, y limita la velocidad del aire frío sobre la piel.

Pero, por otro lado, en ambientes calurosos el vestido dificulta la evaporación del sudor y su necesidad depende del tipo de calor: en caso del calor seco de los desiertos, la ropa constituye, además de una pantalla protectora contra la radiación calórica, una necesidad imprescindible para evitar la deshidratación del cuerpo por una excesiva evaporación del sudor, ya que el aire seco, ávido de agua, absorbe el sudor del hombre en grandes cantidades y muy rápidamente. Esto explica la voluminosa vestimenta que utilizan los hombres del desierto.

Sin embargo, en el caso del calor húmedo, como es el calor tropical, donde el aire tiene una importante carga de humedad que dificulta la evaporación, la ropa la frena aún más, al contrario del calor del desierto, donde es importante cubrirse lo más posible. En el trópico el vestido debe ser ligero o inexistente, tal como se estila.

Aclimatación al calor

La aclimatación al calor es la adaptación a condiciones microclimáticas calurosas y se adquiere en un tiempo entre 7 y 14 días, y quizás más, de exposición a las mismas. No obstante, ni una aclimatación “perfecta” puede garantizar que una persona esté totalmente protegida en situaciones extremas.

Cuando una persona se expone inicialmente a un ambiente caluroso, se manifiesta bruscamente en ella una tensión calórica superior a la que experimenta una persona aclimatada: su temperatura rectal y su frecuencia cardíaca sufren aumentos rápidos y muy pronunciados, se presentan malestares que pueden llegar a ser muy severos hasta alcanzar sensaciones de angustia.

Sin embargo, según el organismo esté sometido a actividades físicas consecutivas bajo exposición al calor, se efectúan paulatinamente determinados ajustes, fundamentalmente durante los primeros 4-7 días, en los mecanismos psicológicos y fisiológicos de la termorregulación: el sistema cardiovascular comienza a adaptarse a las nuevas condiciones y, al parecer, mejora la capacidad de abastecer de sangre a los capilares de la piel, y la eficiencia sudorativa del sujeto se incrementa, con menos pérdidas de sal, con lo cual la temperatura rectal y la frecuencia cardíaca comienzan a disminuir pues el volumen de eyección sistólica aumenta.

De esta forma, al cabo de unos días puede alcanzar el equilibrio térmico con el medio caluroso, o al menos logra soportar mejor las condiciones de sobrecarga calórica. Debe señalarse que la aclimatación es un proceso que requiere de la actividad física en presencia del ambiente caluroso y no sólo de este último. Recuérdense, además, los efectos estimulantes de la vitamina C sobre la capacidad de sudoración. El individuo perfectamente aclimatado, por lo general no muestra una disminución importante en su capacidad para realizar esfuerzos físicos en un ambiente ligeramente caluroso con respecto a la que posee en condiciones confortables.

La aclimatación no es permanente y los ajustes logrados durante el proceso de aclimatación se van perdiendo con relativa rapidez con el abandono de la exposición al ambiente caluroso, pero aún pueden mantenerse atenuados por espacio de tres o cuatro semanas. Givoni y Goldman (1973) señalan que por cada día de descanso se pierde medio día de aclimatación.

En la figura 1.11 se representan las curvas de las variaciones de la capacidad de sudoración, de la frecuencia cardíaca y de la temperatura rectal de un grupo de personas en el curso de una experiencia de aclimatación al calor.

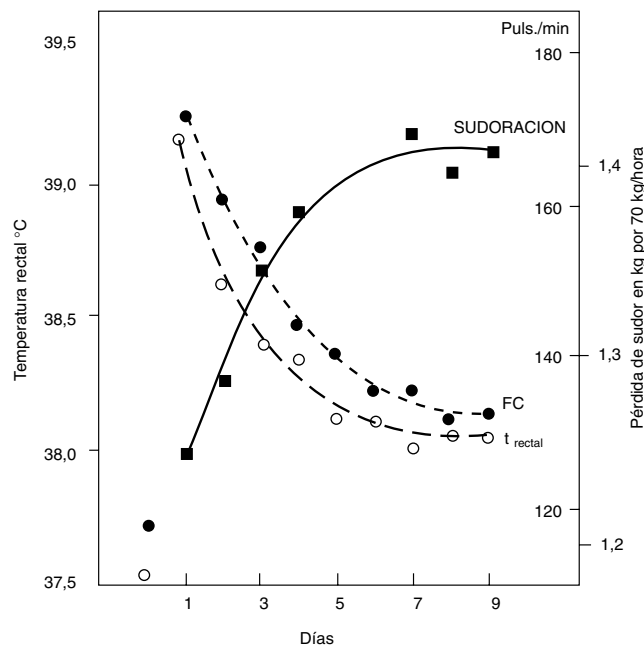


Fig. 1.11 Curvas de aclimatación al calor

En el día 0, los hombres trabajaron en un ambiente frío durante 100 minutos, con un gasto de energía de 350 W (300 kcal/h); entre los días 1 a 9 realizaron el mismo trabajo, pero en un medio caluroso (temperatura de bulbo seco de 48,9 °C y temperatura de bulbo húmedo de 26,7 °C). (Parsons, 1993, adaptado a su vez de Lind & Bass, 1963).

Si bien la aclimatación al calor está determinada por un proceso de adaptaciones fisiológicas de una aplicabilidad relativamente fácil, la aclimatación al frío, por las características prácticas de la protección frente a él, reviste otras especificaciones. Se puede estar expuesto al frío excesivo sólo en casos muy determinados, tanto al aire libre como en industrias cuyos procesos requieren de temperaturas muy bajas. En ambos casos, salvo excepciones, el hombre se protege fundamentalmente con ropas especiales y otras medidas que se verán más adelante. No obstante, existen situaciones límite como los hombres “focas” que practican el deporte de la inmersión en bañador bajo la capa helada de los ríos, o los buzos, tanto con escafandras como con trajes ligeros, que requieren de un entrenamiento más o menos largo para la aclimatación, con el cual el organismo efectúa determinados cambios para su adaptación. En los casos menos extremos la aclimatación al frío puede producirse en una semana, pero en los casos límite una aclimatación absoluta puede durar meses y hasta años.

Indicadores fisiológicos de la tensión calórica

Los indicadores fisiológicos de la tensión calórica generalmente más utilizados son:

- 1 la frecuencia cardíaca (FC);
- 2 la temperatura interna (t_i);
- 3 la pérdida de peso por sudoración (S).

En la figura 1.12 se muestra un gráfico que permite observar el comportamiento de estos tres parámetros en el caso específico de un sujeto .

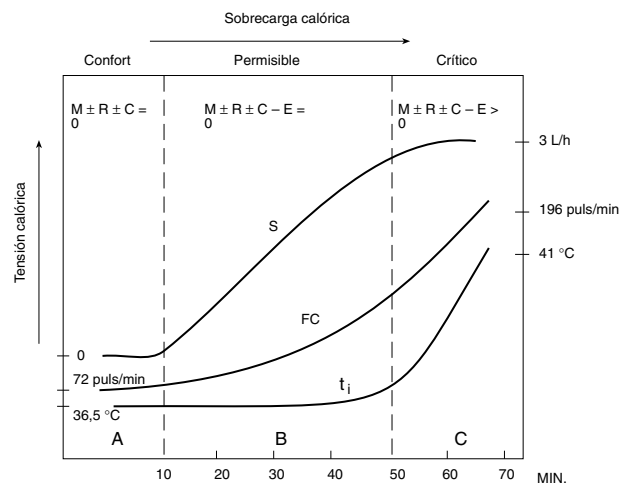


Fig. 1.12 Comportamiento de los indicadores fisiológicos de la tensión calórica mediante un ejemplo (adaptado de WHO 1969)

A) Manolo es un hombre joven y aclimatado que está realizando una actividad física ligera-moderada en un ambiente de confort térmico. No necesita sudar para mantener su equilibrio térmico ($S = 0$), su frecuencia cardíaca (FC) se mantiene estable con 72 puls/min y su temperatura interna (t_i) es de 36,5 °C.

B) A los 10 minutos, se manifiesta una sobrecarga calórica intensa al incrementarse su actividad física, o al pasar a un ambiente caluroso, o ambas cosas a la vez, y su organismo reacciona con una tensión calórica proporcional a la nueva situación: se inicia una sudoración intensa y la frecuencia cardíaca comienza a elevarse rápidamente, aunque la temperatura interna de Manolo sólo aumenta muy ligeramente, porque ahora fluye más sangre cargada de calor hacia la piel para disiparlo por radiación y por convección, y su sudoración creciente se evapora, lo que alivia la situación de tensión. No obstante, a los 45 minutos el ritmo de sudoración comienza a estabilizarse, debido a que se acerca a su límite fisiológico máximo, lo que provoca un incremento más acentuado de la frecuencia cardíaca y otro incremento más acentuado aún de la temperatura interna.

C) A los 50 minutos, su ritmo de sudoración casi se ha estabilizado, por lo que su frecuencia cardíaca se incrementa aún más y su temperatura interna da un salto muy acentuado. A los 55 minutos la sudoración ya se ha estabilizado en 3 litros/hora, la frecuencia cardíaca ha superado las 196 puls/min y la temperatura interna ya alcanza los 41°C: la situación es crítica, si no se detiene la actividad y la exposición al calor, los daños en Manolo serán irreversibles.

Es posible, en general, analizar los factores que alteran esas funciones de respuesta a diferentes niveles de sobrecarga metabólica y ambiental, y determinar qué mediciones son probablemente las más adecuadas según las circunstancias.

Es importante utilizar varios, y no sólo uno, de estos indicadores, e integrar los resultados para llegar a conclusiones certeras, teniendo en cuenta que la termorregulación es un mecanismo sumamente complejo, que los indicadores reaccionan muchas veces por otras causas ajenas a la tensión térmica y no siempre es posible practicar mediciones fidedignas de todos los factores pertinentes en el lugar de trabajo.

La frecuencia cardíaca disminuye progresivamente a partir del nacimiento hasta la adolescencia, pero vuelve a ascender ligeramente en la vejez. La American Heart Association considera que la frecuencia normal en estado de reposo oscila entre 50 y 100 latidos por minuto. El promedio durante el reposo es de 78 latidos por minuto para los hombres y de 84 latidos por minuto para las mujeres, pues en éstas, seguramente debido a la menor cantidad de glóbulos rojos en su sangre, suele ser de 5 a 10 latidos más por minuto. Sin embargo, en personas físicamente muy entrenadas, como son los atletas de alto rendimiento, la frecuencia cardíaca es bastante más baja que en personas de estilo de vida sedentaria, tanto en reposo como realizando actividades físicas, por lo que los atletas pueden, en estado de reposo, estar por debajo de las 50 pul/min.

La frecuencia cardíaca puede considerarse como un indicador sencillo de la carga que impone al sistema circulatorio la acumulación de calor, incluso para tensiones térmicas ligeras y moderadas. Este indicador permite evaluar la tensión calórica que provoca la sobrecarga calórica en las personas, en su entorno habitual de actividades, midiendo la frecuencia cardíaca con las mismas actividades pero bajo condiciones de confort térmico y comparando los resultados con la frecuencia cardíaca bajo las condiciones habituales de sobrecarga calórica.

Sin embargo, hay que tener en cuenta, a la hora de decidir su utilización como indicador, que la frecuencia cardíaca también se incrementa con el trabajo, la postura, los estados emocionales, incluso los provo-

cados por el propio acto de medición, estados patológicos, y sutiles acontecimientos inesperados durante las mediciones; los autores han podido comprobar experimentalmente durante mediciones de la frecuencia cardíaca a varios sujetos, que si una puerta se abre inesperadamente y una persona desconocida se asoma en busca de alguien, se provoca un incremento de la frecuencia cardíaca de los sujetos ajeno al ambiente térmico. Por todo lo anterior, es recomendable tener en cuenta los posibles factores perturbadores y realizar las mediciones sobre el sujeto varias veces durante varios días, hasta que éste se acostumbre.

Hay varias medidas posibles de la frecuencia cardíaca que pueden utilizarse como indicadores de la tensión calórica:

- 1 la frecuencia efectiva de pulsaciones durante el trabajo;
- 2 la frecuencia efectiva de pulsaciones al final del mismo;
- 3 la aceleración del pulso durante un período o un día de trabajo; y
- 4 el tiempo que tarda la frecuencia del pulso en volver a su nivel de reposo después del trabajo.

En las actividades diarias y prolongadas de exposición a sobrecarga calórica, la información que puede ofrecer la frecuencia cardíaca al final de la jornada resulta menos interesante que las máximas registradas durante la jornada de manera intermitente, o que el aumento de la frecuencia normal de pulsaciones a lo largo del día. Las frecuencias cardíacas máximas corresponden a esfuerzos máximos, a exposiciones máximas al calor, o a ambas cosas a la vez, y pueden estudiarse por separado. La aceleración del pulso puede estudiarse también en relación a todo el tiempo de trabajo o a períodos intermitentes de trabajo y descanso a lo largo de la jornada.

Un método muy útil para evaluar la sobrecarga total resultante del trabajo y del calor consiste en determinar el tiempo de recuperación de la frecuencia cardíaca normal, es decir, el tiempo de descanso necesario para que la frecuencia cardíaca vuelva al nivel de reposo, una vez terminada la actividad.

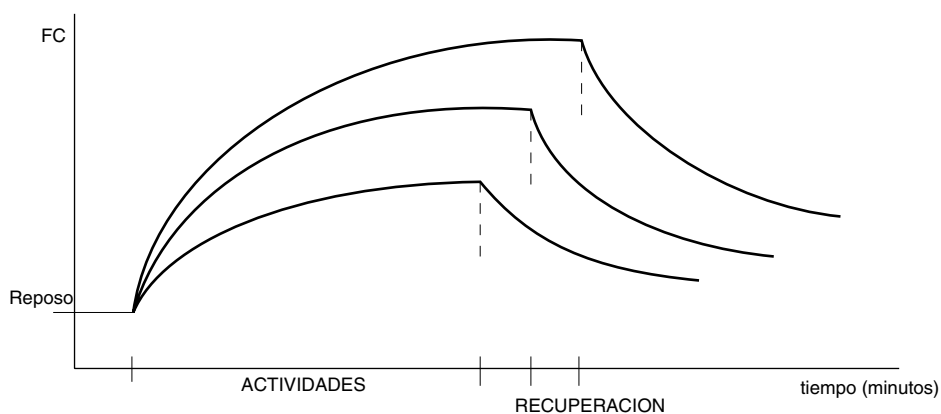


Fig. 1.13 Curvas de recuperación de la frecuencia cardíaca para tres actividades de diferentes intensidades y duraciones

La medición de la frecuencia cardíaca es relativamente simple y se puede efectuar durante la actividad del individuo sin alterar significativamente su trabajo. Para ello se puede disponer de electrocardiogramas, cardiotacómetros o simples pulsómetros, e incluso, a falta de estos instrumentos, si se detiene por breve tiempo la actividad del individuo, puede medirse el pulso por simple palpación y un cronómetro, lo mismo si se presiona ligeramente con los dedos índice y corazón la arteria carótida situada debajo de la mandíbula, que si se presiona en la muñeca del sujeto, siempre que la medición se efectúe inmediatamente después de detenida la actividad. Se recomienda medir con el cronómetro el tiempo para treinta pulsaciones y a partir de este valor calcular las pulsaciones por minuto, ya que, de tomar más tiempo, las pulsaciones habrán descendido significativamente y el resultado no será lo suficientemente exacto.

La opinión generalizada de los especialistas fija un límite de 30-40 pulsaciones por minuto por encima de la frecuencia cardíaca de reposo del sujeto, para ocho horas de actividad.

Finalmente, creemos que es necesario aclarar que, a pesar de que el consumo de oxígeno y la frecuencia cardíaca son directa y linealmente proporcionales hasta aproximadamente las 170 pulsaciones por minuto en actividades físicas, y que el comportamiento de las curvas de ambos en el tiempo de duración de las actividades son muy parecidas, la sobrecarga calórica no influye perceptiblemente sobre el consumo de oxígeno, de manera que no es posible utilizar el consumo de oxígeno como indicador de la tensión calórica.

El uso de la temperatura interna como indicador está limitado a tensiones calóricas severas, ya que las tensiones moderadas no provocan normalmente incrementos. Por tal motivo, este indicador se utiliza para establecer límites máximos que, según varios autores, están entre los 38 °C y los 39 °C.

Al contrario de la frecuencia cardíaca, la medición de la temperatura interna no es sencilla ni cómoda, ya que tendría que medirse en el esófago o en el recto para que fuese lo suficientemente exacta. En la práctica, por lo tanto, se acude a la medición de la temperatura en el tímpano, o de la temperatura sublingual, esta última, con las debidas precauciones durante las mediciones: no respirar por la boca, ni hablar, ni consumir bebidas frías ni calientes minutos antes de las mediciones.

Respecto a la sudoración, se acepta que, en sujetos aclimatados, la cantidad de sudor generado es proporcional a la tensión calórica que lo ha provocado, por lo que sólo es posible la utilización de este indicador con individuos aclimatados; de lo contrario será necesario aclimatarlos antes.

La medición de la pérdida de peso por sudoración se efectúa pesando al sujeto antes y después de la actividad con una báscula cuya precisión debe ser al menos de 50 gramos, deduciendo del peso final el saldo resultante de los líquidos y los alimentos ingeridos y excretados durante la jornada, lo que obliga a pesar meticulosamente todo lo que entre y salga del cuerpo durante la actividad. Otro aspecto que hay que tener en cuenta es el sudor que se acumula en la ropa, por lo que se recomienda efectuar las pesadas, inicial y final, del sujeto desnudo y seco.

A pesar de que la capacidad de sudoración, como se ha visto antes, es bastante mayor, no es recomendable excederse de un límite máximo de 500 gramos de sudor por hora, incluso en sujetos aclimatados.

La Organización Mundial de la Salud estableció en 1969 los valores límite siguientes:

Temperatura interna: L. Superior = 40,6 °C y L. Práctico = 38 °C

Frecuencia cardíaca: L. Puntual = 160 puls/min y L. jornada = 110 puls/min.

Volumen de sudoración: L. Puntual = 1,5-2 litros/hora y L. jornada = 5 litros/día

Por su parte Stoll y Creene consideran apropiados para la temperatura cutánea promedio un límite superior de 43,2 °C y un límite práctico de 42 °C.

Medidas de protección frente al ambiente caluroso

En caso de que haya resultado imposible, por causas técnicas, económicas o prácticas, la adecuación del microclima a las condiciones de confort, o al menos a condiciones permisibles moderadas dentro de unos límites aceptables mediante soluciones ingenieriles de control del calor, se hace indispensable tomar determinadas medidas que protejan al hombre de un ambiente caluroso crítico o, aunque permisible, demasiado caluroso. Algunas medidas que se pueden adoptar son:

1. Selección del personal mediante examen médico, entre sujetos jóvenes, no obesos, sin afecciones cardiovasculares, renales o dérmicas, excluyendo mujeres en estado de gestación.
2. Establecimiento de un programa de aclimatación para ser aplicado antes de su ingreso como trabajadores mediante un entrenamiento en sesiones de exposición con tiempos limitados que habrán de incrementarse progresivamente; y también al regreso de las vacaciones, teniendo en cuenta que la aclimatación no es una cualidad permanente y que se pierde con relativa rapidez. Si se considera necesario se puede suministrar vitamina C.
3. Control médico periódico de los sujetos que dictamine el estado de salud de los individuos. Evitar la exposición de las mujeres embarazadas.
4. Establecimiento de un sistema de suministro de agua fresca, de fácil acceso y lo más cerca posible del operario, que le permitan la ingestión frecuente (cada 15-20 minutos) de agua en cantidades no excesivas (entre 100 y 200 cc). En caso necesario se deben incrementar, preferiblemente mediante los alimentos, los suministros de sal, de potasio y, si se entendiese necesario, suministrar vitamina C.
5. Aplicación de un programa educativo, impartido por especialistas, que mantenga informado al trabajador sobre las afectaciones que puede provocar la tensión calórica excesiva, las medidas necesarias para evitarlas, el tipo de vestido adecuado, la cadencia de ingestión de agua fresca y sal, etcétera.
6. En caso necesario, implementar regímenes de trabajo y descanso, que limiten las exposiciones excesivas al calor y permitan la recuperación térmica, bien mediante el diseño ergonómico de sistemas de rotación de trabajadores, o bien disponiendo locales aislados del ambiente laboral y perfectamente acondicionados, tanto estética como ergonómicamente: ambiente térmico de confort, dimensiones, asientos,

bajo nivel de ruido; si se decide incluir música ésta debe ser seleccionada y controlable por los trabajadores, iluminación y colores apropiados, y cualquier otro aspecto que pueda favorecer la recuperación rápida del sujeto.

7. Mantener bajo control permanente las condiciones del microclima mediante algún indicador fiable que las personas afectadas deben conocer perfectamente y cuyos resultados deben quedar registrados.

Medidas de protección frente al ambiente frío

1. Empleo de ropas adecuadas contra el frío, la humedad y el viento, según el caso, y considerando los espacios y las actividades que debe desarrollar el sujeto, teniendo en cuenta que las ropas pueden dificultar los movimientos, la visión, la audición y el tacto (la percepción en general).

2. Ingestión de alimentos y bebidas calientes.

3. Regímenes de trabajo y descanso adecuados, con lugares de abrigo acondicionados para la recuperación.

4. Diseño adecuado de los puestos de trabajo: espacios, muebles, máquinas (superficies metálicas, bordes cortantes, etc.), mandos y dispositivos informativos, herramientas, etc., teniendo en cuenta la posible disminución de la percepción y de la somnolencia provocada por las bajas temperaturas.

5. Organizar las actividades evitando las tareas sedentarias con poca actividad, incrementando el esfuerzo físico y teniendo en cuenta la posible pérdida de la coordinación de ideas y movimientos, la confusión mental y el aletargamiento.

6. Evitar la actividad aislada (favorecer los grupos de trabajo con relaciones visuales directas y continuas).

7. Mantener bajo control permanente las condiciones del microclima mediante algún indicador fiable que las personas afectadas deben conocer perfectamente y cuyos resultados deben quedar registrados.

2 Ambiente térmico: magnitudes, unidades e instrumentos de medición

Como se ha visto, el intercambio de calor entre el hombre y el medio determina el grado de compatibilidad térmica entre el organismo y el entorno donde se encuentra. Este intercambio, que es extremadamente complejo, se efectúa por varias vías, de las cuales las fundamentales desde el punto de vista práctico son: la radiación, la convección y la evaporación del sudor.

Así pues, el fenómeno térmico se estudia utilizando los cuatro factores que componen y caracterizan el ambiente térmico: temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire y humedad, interrelacionados con el calor metabólico y la vestimenta.

Magnitudes y unidades

En el estudio de la interacción entre las personas y el ambiente térmico dentro del sistema hombre-máquina (H-M), es necesario analizar los parámetros térmicos propios del cuerpo humano (temperaturas del cuerpo, metabolismo, etc.), los factores que integran el ambiente térmico (temperatura del aire, temperatura radiante, humedad y velocidad del aire), y otros factores, como la ropa que, de una forma u otra, intervienen en dicho intercambio.

Por ello se hace necesario establecer inicialmente las denominaciones que habrán de emplearse, las magnitudes, las unidades de medida y los instrumentos y métodos de medición. En el anexo 5 se pueden encontrar las equivalencias entre las unidades del Sistema Internacional -que se utilizan en este libro- y otras de uso frecuente.

De los factores humanos:

Temperaturas, todas en grados celsius ($^{\circ}\text{C}$)

- interna (t_i) o corporal (t_c)
- esofágica (t_{esof})
- rectal (t_r)
- sublingual, oral o bucal (t_{buc})

- timpánica (t_{timp})
- de la piel o cutánea (t_p)
- calor metabólico (M), en joules (J), o en met (58,15 W/m²)
- fuerza (F), en newton (N)
- trabajo (W), joules (J)
- nivel de actividad, potencia (P), watt (W) = J/s, o en met.
- aislamiento térmico de la ropa, I_{clo} (1 clo = 0,155 °C m²/W)

De los factores del ambiente térmico:

Temperaturas, todas en grados celsius, (°C)

- del aire (t_a) o seca (t_s) o de bulbo seco (t_{bs})
- húmeda (t_h) o de bulbo húmedo (t_{bh})
- de globo (t_g)
- radiante media (TRM)
- del aire natural (t_{an}) o ambiental (t_{amb})
- de bulbo húmedo natural (t_{bhn})
- temperatura operativa (t_o)

Humedad del aire

- humedad relativa (HR) %
- humedad absoluta (HA) kg/kg de aire seco, o en kg/m³
- presión parcial del vapor de agua (p_a) kPa y hPa, según el caso.
- presión del vapor de agua saturado, a 1 at (1013 hPa), a la temperatura del aire (p_{sa}) hPa.
- presión del vapor de agua saturado, a 1 at (1013 hPa), a la temperatura de bulbo húmedo (p_{sabh}) hPa.
- presión parcial del vapor de agua en la piel, a la temperatura de la piel, (p_{sap}) hPa.

Velocidad del aire, en m/s

- velocidad del aire (v_a).
- velocidad relativa del aire (v_{ar}).

Instrumentos de medida de las temperaturas

Las temperaturas se miden con termómetros que pueden ser de diferentes tipos: líquidos, de resistencia, termoeléctricos y termistores.

En los termómetros líquidos la sustancia termoscópica utilizada es un líquido cuya dilatación debe ser lo más regular posible y las temperaturas que reflejen sus cambios de estado deben encontrarse muy alejadas entre sí. Su utilización es muy sencilla, pero tienen el inconveniente de su fragilidad y su elevada constante de tiempo (entre 3 y 15 minutos). El líquido más satisfactorio es el mercurio, que además no moja al vidrio y permanece líquido y limpio desde los - 40 °C hasta los 350 °C.

Los termómetros de resistencia se basan en un metal puro cuya resistencia eléctrica aumenta aproximadamente 0,4% por grado centígrado de incremento de temperatura.

Como la medida de resistencia eléctrica se basa en general en una comparación con otras resistencias, es preciso mantener la de referencia a una temperatura fija y constante durante la medida. Las resistencias utilizadas suelen ser de hierro-níquel, o de platino, dependiendo de la zona de temperaturas en que se va a trabajar. Estos instrumentos permiten realizar medidas a distancia y su respuesta es lineal, aunque presentan altas constantes de tiempo (del orden de 7 minutos).

Los termómetros termoeléctricos se basan en la fuerza electromotriz que se produce cuando se sueldan dos hilos de metales distintos formando un circuito cerrado, siempre que las dos soldaduras estén a distintas temperaturas. La fuerza electromotriz para un par de metales dados depende de la diferencia de temperatura entre sus soldaduras. Aunque son instrumentos caros y su sensibilidad es baja, se utilizan en estudios fisiológicos, pues su constante de tiempo es baja (entre 30 y 50 segundos) y permiten hacer medidas remotas en varios puntos simultáneamente.

Los termistores son semiconductores en los que se produce un cambio sustancial en su resistencia como respuesta a un pequeño cambio de temperatura. Son instrumentos de uso sencillo que presentan una sensibilidad elevada y una constante de tiempo despreciable. Sus posibilidades para aplicaciones especiales son enormes. Entre los inconvenientes que implican hay que destacar su elevado precio y que su respuesta no es lineal, lo que obliga a constantes calibraciones.

Mediciones de temperaturas fisiológicas

Para las mediciones de las temperaturas fisiológicas se utilizan distintos tipos de instrumentos: termómetros de mercurio, sensores (termistores, termopares, etc.), termografía y radiometría infrarrojas (Clark & Edholm, 1985), medidores de flujo de calor y termómetros infrarrojos, etcétera, que se sitúan en los puntos específicos en los que se quiere conocer la temperatura (recto, esófago, piel...).

Durante trabajos de rutina e incluso investigaciones se utiliza ampliamente la temperatura oral, que se mide con termómetros de mercurio, termistores o termopares, que se sitúan debajo de la lengua, muy cerca de la arteria lingual. Varios minutos antes de las mediciones el sujeto no podrá ingerir alimentos ni bebidas y durante las mismas no podrá respirar por la boca ni hablar. Además, se recomienda la utilización de algún dispositivo en la boca que impida la rotura del termómetro. Para las lecturas se tendrán en cuenta las condiciones ambientales como la temperatura del aire y las radiaciones de calor, que pueden actuar sobre el termómetro después de haberlo extraído de la boca durante la lectura si no se toman medidas protectoras.

Mediciones de temperaturas psicrométricas

Los instrumentos que se utilizan para las mediciones de temperaturas del ambiente poseen características propias, según los parámetros relacionados, los métodos y los índices que se utilicen. Las temperaturas básicas necesarias (que ya han sido mencionadas anteriormente) son: temperatura del aire (t_a), temperatura de bulbo húmedo (t_{bh}), temperatura del aire natural (t_{an}), temperatura de bulbo húmedo natural (t_{bhn}), temperatura radiante media (TRM) y temperatura de globo (t_g).

Mediciones de la temperatura del aire (t_a), temperatura de bulbo húmedo (t_{bh}) y de la humedad relativa (HR)

Para la medición de las temperaturas del aire (t_a) y de bulbo húmedo (t_{bh}) se utiliza el psicrómetro de aspas o de aspiración, que está constituido por dos termómetros psicrométricos iguales (salvo en un pequeño pero importante aditamento en uno de los bulbos), generalmente de mercurio, situados en paralelo dentro de un dispositivo que produce convección forzada por aspiración de aire alrededor de los bulbos, con una velocidad de 2,5 -3 m/s, mediante un ventilador aspirador, que puede ser de cuerda o eléctrico, situado en la parte superior del aparato. Los bulbos de ambos termómetros están protegidos de las radiaciones de calor mediante dos cilindros altamente reflectantes, generalmente de acero níquel. En la figura 2.1 se observa un psicrómetro.

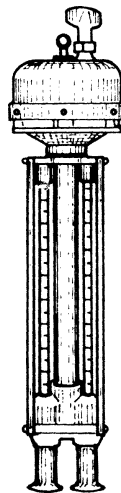


Fig. 2.1 Psicrómetro de aspiración

Uno de los termómetros indica la temperatura del aire (t_a), que también puede denominarse temperatura seca (t_s) o de bulbo seco (t_{bs}), en oposición a la temperatura húmeda (t_h) o de bulbo húmedo (t_{bh}) indicada por el segundo termómetro, llamado termómetro de bulbo húmedo, porque su bulbo está recubierto por una tela o muselina de algodón, a modo de funda, recubriendo con buen contacto el bulbo y al menos hasta una altura del tubo del termómetro igual a la longitud del bulbo que, durante las mediciones debe permanecer empapada en agua destilada.

Para garantizar esto último sin tener que estar mojando continuamente la tela, el extremo sobrante de ésta (la cola de tela, ¡nunca el bulbo!) puede estar introducido en un recipiente con agua destilada, la cual irá ascendiendo por capilaridad a medida que la tela se vaya secando según la humedad del aire. El resultado es un enfriamiento del bulbo del termómetro que será mayor cuanto más seco esté el aire. El bulbo húmedo deberá estar empapado de agua al menos entre 10 y 15 minutos antes de ser expuesto para la medición, y la lectura de ambos termómetros debe ser simultánea y sólo cuando las columnas de mercurio estén completamente estabilizadas. Es recomendable utilizar agua destilada para humedecer la

tela, ya que la presión del vapor de agua de soluciones salinas es más baja que la del agua pura. Cuando la temperatura húmeda sea muy inferior a la temperatura seca (lo cual ocurre cuando la humedad es muy baja), debe utilizarse el agua a una temperatura aproximada igual a la temperatura húmeda.

Humedad absoluta (HA) y humedad relativa (HR)

La humedad absoluta (HA) es la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire. Se acostumbra a medir en kg/m^3 , mientras que la humedad relativa (HR) es la relación porcentual entre la presión de vapor de agua existente con respecto a la máxima posible para la temperatura del aire existente.

Se puede determinar la humedad absoluta a partir de la expresión de Kerslake (1972):

$$HA = 0,217 p_a / (t_a + 273) \quad (1)$$

siendo:

HA: humedad absoluta (kg/m^3)

p_a : presión parcial del vapor de agua en el aire (hPa)

t_a : temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

Es posible determinar la humedad relativa y la presión parcial del vapor de agua partiendo de las temperaturas del aire y de bulbo húmedo, mediante las siguientes expresiones basadas en la ecuación de Antoine:

Presión del vapor de agua saturado, a 1 at (1013 hPa), a la temperatura del aire, p_{sa} :

$$p_{sa} = \exp [18,956 - 4030,18/(t_a + 235)] \quad (\text{hPa}) \quad (2)$$

Presión del vapor de agua saturado, a 1 at (1013 hPa), a la temperatura de bulbo húmedo, p_{sabh}

$$p_{sabh} = \exp [18,956 - 4030,18/(t_{bh} + 235)] \quad (\text{hPa}) \quad (3)$$

Presión parcial del vapor de agua, p_a

$$p_a = p_{sabh} - 0,667(t_a - t_{bh}) \quad (\text{hPa}) \quad (4)$$

Y unificando ambas expresiones (3) y (4), finalmente tendremos:

$$p_a = \exp [18,956 - 4030,18/(t_{bh} + 235)] - 0,667(t_a - t_{bh}) \quad (\text{hPa}) \quad (5)$$

Por otro lado, la humedad relativa se determina:

$$HR = (p_a/p_{sa})100 \quad (\%) \quad (6)$$

Ejemplo:

Para $t_a = 29 \text{ }^\circ\text{C}$ y $t_{bh} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, determinar p_a y HR:

$$p_{sa} = \exp [18,956 - 4030,18/(t_a + 235)] = 40,05 \text{ hPa}$$

$$p_{sabh} = \exp [18,956 - 4030,18/(t_{bh} + 235)] = 28,08 \text{ hPa}$$

$$p_a = p_{sabh} - 0,667(t_a - t_{bh}) = 24,08 \text{ hPa}$$

$$\text{HR} = (p_a/p_{sa})100 = 60 \%$$

También se puede determinar la presión parcial del vapor de agua en la piel, a la temperatura de la piel, mediante la ecuación de Antoine:

$$p_{sap} = \exp [18,956 - 4030,18/(t_p + 235)] \quad (7)$$

Se acepta, para una situación de sobrecarga calórica, una temperatura de la piel (t_p) de $35 \text{ }^\circ\text{C}$; por lo que, aplicando la ecuación de Antoine, la presión parcial del vapor de agua en la piel, a la temperatura de la piel es de 56 hPa.

El conocimiento de t_a y t_h permite averiguar, mediante un gráfico psicrométrico, la humedad del aire, bien expresada como humedad relativa (HR) en tanto por ciento, o como presión parcial de vapor de agua (p_a) en hectopascales (hPa) o en milímetros de mercurio (mm Hg), tal como se muestra en la figura 2.2.

También se puede determinar la humedad relativa con una tabla como la que se muestra en la figura 2.3.

Medición de la humedad del aire mediante un higrómetro

Si en lugar de estimar la humedad del aire con tablas o diagramas psicrométricos se desea medir, se puede hacer mediante un higrómetro, que puede ser: de condensación, de variación de la conductividad eléctrica o de absorción.

Los higrómetros de condensación son de alta precisión y elevado precio; además, su manejo es complejo. Se basan en la condensación del vapor de agua sobre un elemento refrigerado a la temperatura de rocío del aire.

Los higrómetros de variación de conductividad eléctrica pueden ser de dos tipos: para determinar la humedad absoluta o la humedad relativa.

La determinación de la humedad absoluta se basa en la medida de la variación de la temperatura causada por la variación de conductividad eléctrica de un cuerpo higroscópico. Estos aparatos no son utilizables en ambientes con humedad relativa inferior al 15% y su manejo es delicado.

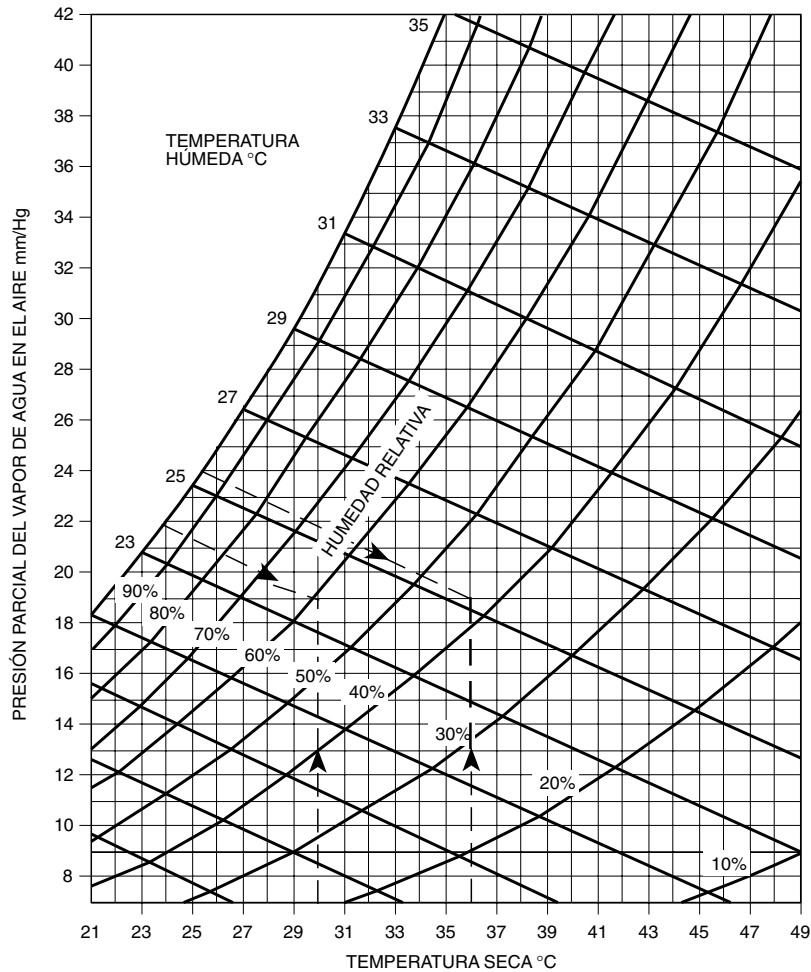


Fig. 2.2 Diagrama psicrométrico con ejemplos de aplicación

Los higrómetros de absorción se basan en la deformación (alargamiento o acortamiento) de ciertas sustancias orgánicas por acción de la tensión superficial del agua líquida retenida en los poros de estas sustancias. Este movimiento es transmitido a un registro que indica la humedad relativa. Los higrómetros de absorción son instrumentos de bajo precio, poca precisión y tiempo de respuesta alto.

		Diferencia entre temperatura seca y temperatura húmeda																	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Temperatura seca	10	100	88	76	65	54	43	33	24	15									
	11	100	88	76	66	55	45	35	27	18									
	12	100	89	77	66	56	47	38	29	20	11								
	13	100	89	78	67	58	49	40	32	23	15								
	14	100	90	79	68	59	50	42	34	26	18	10							
	15	100	90	79	69	60	51	43	36	28	20	14							
	16	100	90	80	70	61	53	44	37	30	22	16	10						
	17	100	91	80	71	63	54	46	38	32	24	18	12						
	18	100	91	81	71	63	55	48	39	33	26	20	14						
	19	100	91	81	72	64	56	49	41	34	28	22	16	10					
	20	100	92	82	73	64	57	50	43	36	30	24	18	12					
	21	100	92	82	74	65	58	52	45	38	32	26	20	14					
	22	100	92	83	74	66	60	53	46	39	34	28	22	16	11				
	23	100	92	83	75	67	61	55	48	41	35	30	23	18	13				
	24	100	92	83	75	68	62	56	50	42	36	31	25	20	15	10			
	25	100	92	84	76	69	63	57	51	44	38	32	27	22	17	12			
	26	100	93	84	76	70	63	57	52	45	39	34	28	24	19	14			
	27	100	93	85	77	71	64	58	52	47	41	36	30	25	21	16	11		
	28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37	32	27	23	18	13		
	29	100	93	85	79	72	66	60	54	49	43	38	33	29	24	20	15	11	
	30	100	93	86	79	73	66	60	55	50	45	40	35	31	26	21	16	12	
	31	100	93	86	79	73	67	61	56	51	46	41	36	32	27	22	18	14	10
	32	100	93	86	80	74	68	62	56	52	47	42	37	33	28	23	19	15	12
	33	100	93	86	80	74	68	63	57	52	47	43	38	34	29	25	21	17	14
	34	100	94	87	80	75	69	64	58	53	48	43	38	35	30	26	22	18	16
	35	100	94	87	81	75	70	64	58	53	48	44	39	36	31	27	23	20	18
	36	100	94	87	81	75	70	65	59	54	49	45	40	37	32	29	25	22	19
	37	100	94	87	82	76	71	65	60	55	50	46	41	38	33	30	26	23	20
	38	100	94	87	82	76	71	66	61	56	51	47	42	38	34	31	27	24	21
	39	100	94	88	82	76	72	66	62	57	52	48	43	39	35	32	28	25	22
	40	100	94	88	82	77	72	67	63	58	53	49	44	39	35	32	29	26	23

Fig. 2.3 Tabla para estimar la humedad a partir de t_a y t_{bh} .

Punto de rocío (t_{pr})

Otro término utilizado es el punto de rocío (t_{pr}), que indica la temperatura a la cual el rocío empezaría a formarse si el aire se enfriase lentamente. Y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$t_{pr} = 4030,18 / (18,956 - \ln p_a) - 235 \quad (8)$$

siendo:

t_{pr} : temperatura del punto de rocío, (°C)

p_a : presión parcial del vapor de agua en el aire, (hPa)

Medición de la temperatura del aire natural (t_{an}) y de la temperatura de bulbo húmedo natural (t_{bhn})

Si extraemos del psicrómetro los termómetros que miden las temperaturas del aire (t_a) y húmeda (t_{bh}), y los utilizamos exponiéndolos libremente al ambiente, pero evitando que las radiaciones de calor incidan sobre el bulbo del termómetro de bulbo seco sin obstruir su contacto con el aire, estaremos midiendo temperaturas diferentes a las obtenidas con el psicrómetro. Estas temperaturas reciben el nombre de temperatura del aire natural (t_{an}) y temperatura de bulbo húmedo natural (t_{bhn}) que se utilizan, como se verá en el capítulo correspondiente, en la determinación del índice WBGT. En el caso del termómetro de bulbo húmedo también debe cuidarse que la muselina siempre esté mojada con agua destilada y con esos fines deben tomarse las mismas precauciones indicadas para ello anteriormente para la medición de la t_{bh} .

Relación entre temperatura húmeda y temperatura húmeda natural

Es posible establecer una relación entre estas dos temperaturas, a partir de la temperatura de globo (que se explicará a continuación) y la temperatura del aire, la velocidad del aire y la humedad, tal como se muestra en el diagrama de la figura 2.4 de B.W. Olesen, basado en la ecuación de Malchaire.

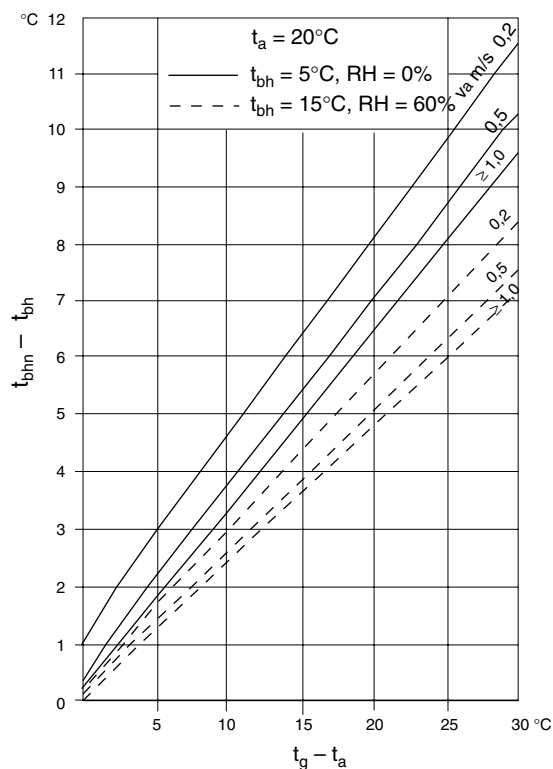


Fig. 2.4 Diagrama para estimar la diferencia entre la t_{bh} y t_{bhn}

Medición de la temperatura de globo (t_g) y cálculo de la temperatura radiante media (TRM)

La radiación calórica puede ser directamente determinada si se conocen las dimensiones, características térmicas (temperatura, coeficiente de emisión) y la posición relativa del hombre respecto a las fuentes de calor radiante. Pero en la práctica esto no es necesario, salvo en casos muy particulares, y en su lugar se utiliza el concepto de temperatura radiante media, que es la temperatura uniforme de una esfera negra mate, de gran diámetro, en la cual los intercambios por radiación con el cuerpo humano son iguales a los intercambios por radiación en el ambiente real.

Así pues, la temperatura radiante media permite la determinación indirecta de los intercambios por radiación entre el hombre y el medio.

Por otra parte, la temperatura radiante media sólo podrá ser determinada por medio de dispositivos que permitan integrar en un valor medio la radiación, generalmente heterogénea, procedente de las paredes del recinto. Uno de estos dispositivos es el termómetro de globo que mide la temperatura de globo (t_g), a partir de la cual puede calcularse la TRM.

El termómetro de globo consiste en una esfera, habitualmente de 15 cm de diámetro, de un material buen conductor del calor, preferiblemente cobre, de espesor fino (0,05 a 0,2 mm), que debe estar pintada de negro mate, en cuyo centro se coloca un captador de temperatura tal como el bulbo de un termómetro de mercurio, un termopar o una sonda de resistencia. En la figura 2.5 se muestra un termómetro de globo.

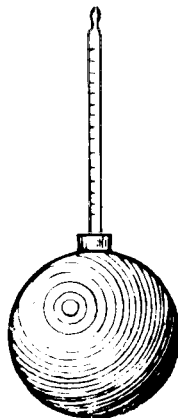


Fig. 2.5 Termómetro de globo

El globo se calienta por la radiación procedente de las diferentes fuentes de calor del local, incluyendo las personas; pero, por otra parte, intercambia calor por convección con el aire, por lo que se enfría por las pérdidas de calor por convección cuando el aire posee una temperatura inferior a la del globo, y se calienta por convección cuando el aire está a una temperatura mayor.

En muchos casos la radiación, cuando existen equipos y/o muchas personas dentro de un recinto, representa uno de los principales factores de carga térmica de un ambiente, y una determinación incorrecta de la temperatura media de radiación puede conducir a errores importantes del balance térmico.

En caso de radiación homogénea, el globo debe situarse en el lugar que normalmente ocupa el trabajador durante su tarea y a la altura del pecho.

Pero cuando la radiación es heterogénea, la radiación a considerar en el balance térmico es la media ponderada de las radiaciones recibidas en las diferentes partes del cuerpo. En consecuencia, es conveniente medir la temperatura de globo a diferentes niveles y ponderar las cuartas potencias de las temperaturas equivalentes de radiación correspondientes por los porcentajes de superficies de cuerpo situadas al mismo nivel que el globo, tal como se muestra en la ecuación 9.

Los porcentajes para las superficies de las diferentes partes del cuerpo respecto a la superficie corporal total pueden considerarse como sigue: cabeza (7%); brazos y manos (19%); tronco (35%); y muslos, piernas y pies (39%).

Así pues, en la práctica puede medirse la temperatura de globo a tres niveles y calcular con las temperaturas de globo obtenidas las tres temperaturas medias de radiación correspondientes: TRM_c , TRM_t , TRM_p , donde la temperatura media de radiación a considerar es:

$$TRM = (k_c TRM_c^4 + k_t TRM_t^4 + k_p TRM_p^4)^{0,25} \quad (9)$$

siendo k el porcentaje de superficie corporal correspondiente a la medida del termómetro de globo al nivel correspondiente.

$k_c = 0,1$ (para el globo situado al nivel de la cabeza)

$k_t = 0,5$ (para el globo situado al nivel del tronco)

$k_p = 0,4$ (para el globo situado al nivel de los pies)

La respuesta del termómetro de globo es bastante lenta, particularmente cuando se utiliza como elemento sensible un termómetro de vidrio de mercurio; por eso, en el mejor de los casos, debe esperarse no menos de 15 minutos de exposición en el lugar antes de efectuar la lectura y, más aún, es recomendable asegurarse bien de que el termómetro ya se ha estabilizado, lo que se puede hacer efectuando dos lecturas consecutivas. Por todo lo anterior, el termómetro de globo no puede ser utilizado para determinar las temperaturas de radiación en ambientes con cambios rápidos.

Para el cálculo de la TRM se puede partir de las siguientes ecuaciones donde ϵ es el coeficiente de emisividad del globo negro, y D el diámetro del globo, en metros:

Para la convección natural ($v_a < 0,15$ m/s):

$$TRM = [(t_g + 273)^4 + (0,25 \cdot 10^8)/\epsilon (t_g - t_a/D)^{0,25} \cdot (t_g - t_a)]^{0,25} - 273 \text{ °C} \quad (10)$$

Para convección forzada ($v_a > 0,15$ m/s):

$$\text{TRM} = [(t_g + 273)^4 + 1,1 \cdot 10^8 \cdot v_a^{0,6} (t_g - t_a)/(D^{0,4} \epsilon)]^{0,25} - 273 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

Generalmente se utilizan globos de 15 cm de diámetro, con un coeficiente de emisividad $\epsilon = 0,95$, por lo que, para globos de tales características, las fórmulas anteriores quedarían:

convección natural:

$$\text{TRM} = [(t_g + 273)^4 + 0,42 \cdot 10^8 (t_g - t_a)^{0,25} (t_g - t_a)]^{0,25} - 273 \quad (12)$$

convección forzada:

$$\text{TRM} = [(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 v_a^{0,6} (t_g - t_a)]^{0,25} - 273 \quad (13)$$

La temperatura operativa (t_o)

Se utiliza ocasionalmente por diferentes autores, y se define como la temperatura uniforme en un recinto negro radiante en el que un ocupante tendría que intercambiar la misma cantidad de calor por radiación y por convección, que en un ambiente real no uniforme (ISO 7730-1984-E).

En la mayoría de los casos prácticos, cuando la velocidad relativa del aire es menor de 0,2 m/s, o cuando la diferencia entre TRM y t_a es menor de 4 °C, la temperatura operativa puede determinarse como el promedio de la temperatura del aire y la temperatura radiante media; pero si se quiere mayor precisión, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$t_o = A t_a + (1 - A) \text{TRM} \quad (14)$$

donde A depende de la velocidad relativa del aire:

$A = 0,5$ para $v_a < 0,2$ m/s

$A = 0,6$ para $0,2 < v_a < 0,6$ m/s

$A = 0,7$ para $0,6 < v_a < 1,0$ m/s

Temperatura efectiva TE y temperatura efectiva corregida TEC

Son los precursores históricos de los índices de sobrecarga térmica que resultaron muy útiles en su momento y que actualmente se encuentran en desuso debido a que no toman en cuenta la intensidad de trabajo ni el vestuario. El TE, desarrollado en 1923 por Houghton y Yaglogou, en los laboratorios de la American Society of Heating and Air Conditioning Engineers, considera la temperatura de bulbo seco, la temperatura de bulbo húmedo y la velocidad del aire, pero no el calor radiante; mientras que el TEC, creado posteriormente, corrige esta omisión.

Para ropa normal de trabajo, los valores máximos de estos índices, son:

Intensidad del trabajo (M)	TE o TEC ($^{\circ}\text{C}$)
Ligero ($M \leq 172$)	30
Moderado ($172 < M \leq 293$)	28
Pesado ($M > 293$)	26,5

El nomograma de la figura 2.6 se utiliza para determinar tanto el TE (cuando $\text{TRM} = t_a$), como el TEC (cuando $\text{TRM} > t_a$) para personas desnudas hasta la cintura. Con el de la figura 2.7 se pueden determinar ambos índices para personas vestidas con ropa ligera. El método consiste en unir mediante una recta los valores de la escala de la t_g o t_a con la escala de la t_{bh} .

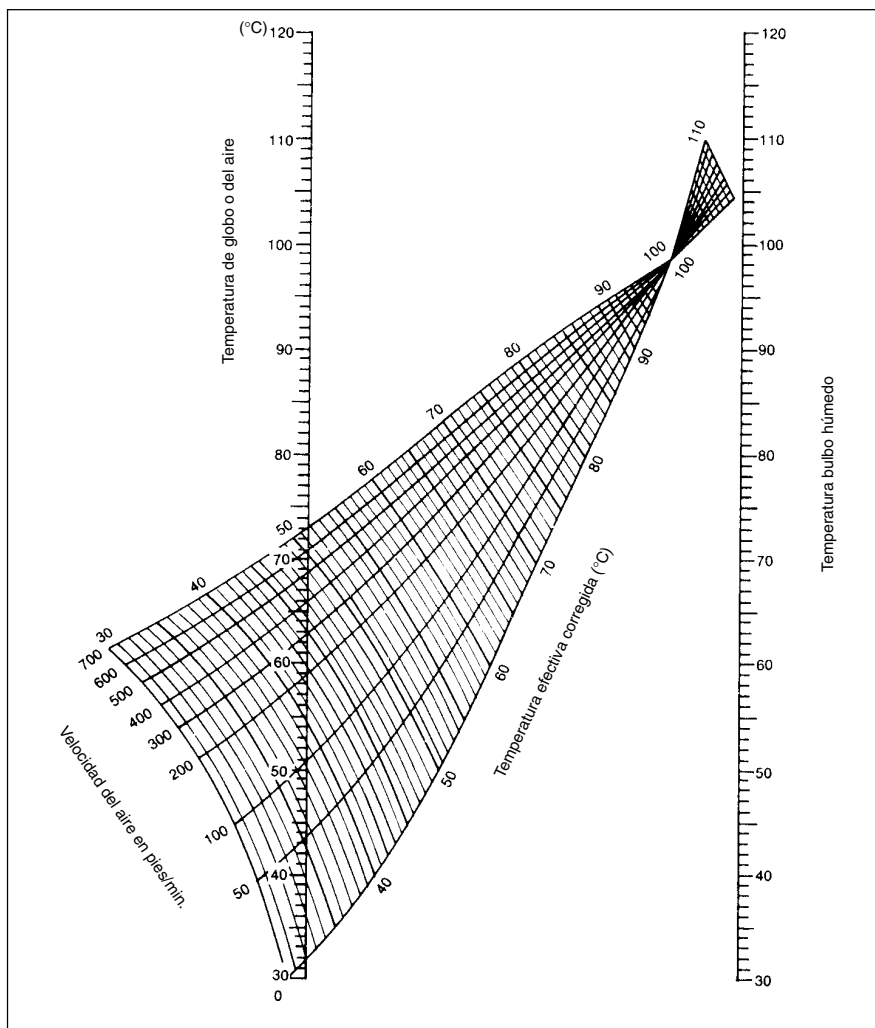


Fig. 2.6 Temperatura efectiva básica

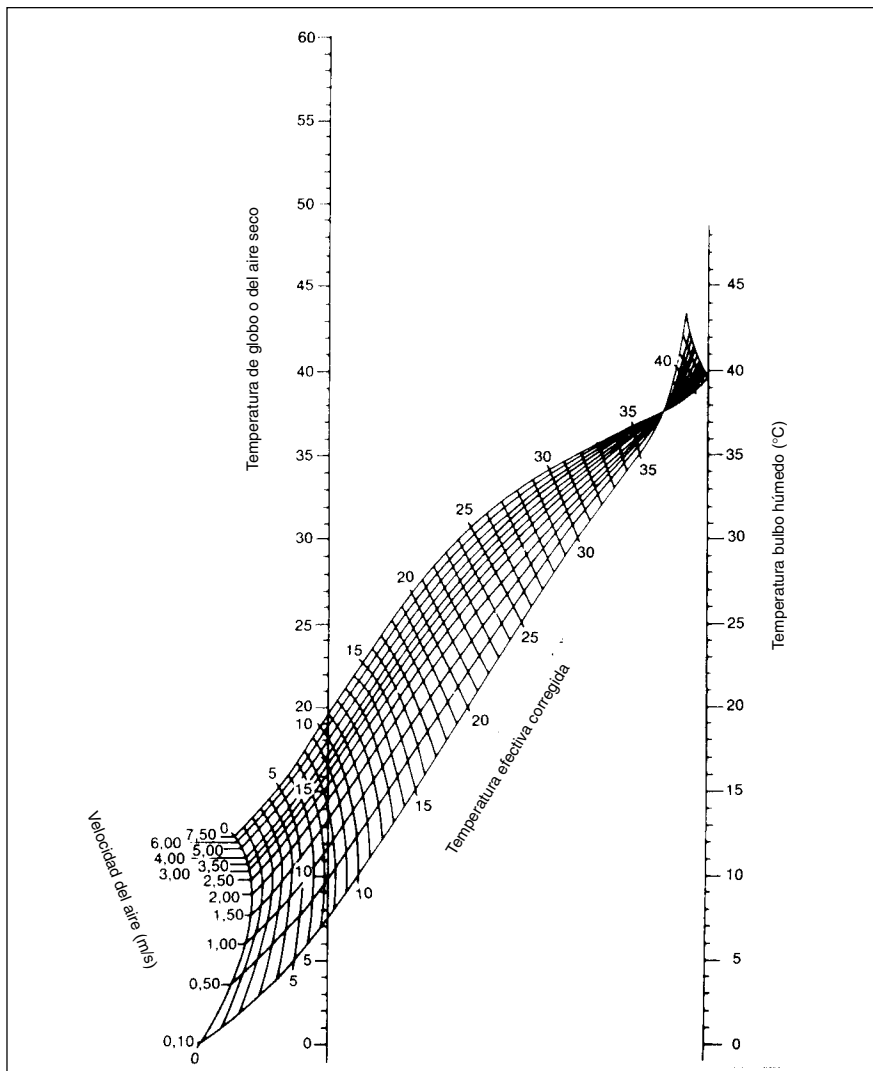


Fig. 2.7 Temperatura efectiva "normal"

Velocidades del aire: absoluta (v_a) y relativa (v_{ar})

La velocidad del aire sobre el cuerpo humano influye en el intercambio térmico entre el cuerpo y el ambiente, y por tanto en la temperatura del cuerpo. Los intercambios por convección y por evaporación están influenciados por la velocidad del aire relativa al cuerpo humano (v_{ar}).

La velocidad relativa depende de la velocidad del aire y de la velocidad del cuerpo, o de una parte del cuerpo, respecto al aire teóricamente inmóvil.

Si la temperatura del aire está por debajo de la temperatura de la piel, la velocidad del aire provocará la pérdida de calor; en cambio, si la temperatura del aire está por encima de la temperatura de la piel, el cuerpo tomará calor del aire.

Velocidad del aire absoluta (v_a)

Por convenio, la velocidad del aire se considera como la intensidad media de velocidad integrada sobre todas las direcciones. Este parámetro se define por su intensidad y dirección; por lo tanto, la forma de medirlo es mediante sondas, que pueden ser omnidireccionales o direccionales.

Si se utiliza un captador direccional en los tres ejes X, Y, Z se obtiene su valor mediante la expresión:

$$v_a = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{0,5} \quad (15)$$

Velocidad del aire relativa (v_{ar})

Si fuese necesario estimar la velocidad relativa del aire (v_{ar}), se puede utilizar la expresión:

$$v_{ar} = v_a + 0,0052 (M - 58) \quad (16)$$

donde

M: metabolismo (W/m^2)

<i>Actividad</i>	<i>m/s</i>
Serrado a máquina	0,15
Trabajo con una mano: Limar hierro, cepillar madera, serrar a mano	0,25
Trabajo con las dos manos: Martillo, ...	0,5

Fig. 2.8 Componente de la velocidad del aire debido a la actividad

Medición de la velocidad del aire (v_a)

El movimiento del aire es perceptible directamente por el hombre a partir de los 0,25 m/s. En la figura 2.9 se ofrece una clasificación estimada según la velocidad del aire.

<i>Tipo de movimiento</i>	<i>Velocidad del aire (m/s)</i>
Movimiento imperceptible	$v_a < 0,25$
Ligera brisa	$0,25 < v_a < 0,50$
Brisa (sacude cabello o vestido)	$0,50 < v_a < 1,50$

Fig. 2.9 Clasificación estimada de la velocidad del aire

En determinadas circunstancias resulta difícil y compleja la medición de la velocidad del aire, sobre todo cuando existen rápidas fluctuaciones de su intensidad, dirección, y turbulencia.

Para la medición de la velocidad del aire se utilizan instrumentos tales como el anemómetro de aspas, el termoanemómetro y el catatermómetro.

El anemómetro de aspas

Los anemómetros de paletas o de copas son instrumentos mecánicos direccionales dotados de aspas de diferentes tipos (paletas y copas), que resultan muy útiles cuando la velocidad del viento alcanza valores perceptibles, pero dentro de locales su utilización generalmente es deficiente o imposible, debido a la baja velocidad del viento.

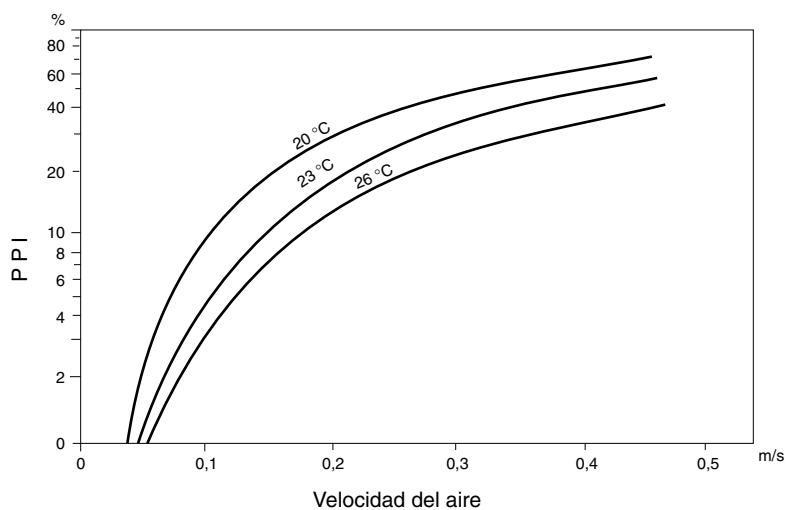


Fig. 2.10 Porcentaje de personas insatisfechas en función de la velocidad y temperatura del aire

El catatermómetro

En esencia es un termómetro de dilatación de líquido (alcohol) con un bulbo de gran volumen que contiene dos marcas correspondientes a las temperaturas t_1 y t_2 que están indicadas en el capilar del termómetro. El bulbo se calienta en agua templada a una temperatura superior t_1 , se seca y se expone al aire cuya velocidad se desea medir y mediante un cronómetro se mide el tiempo empleado por el instrumento para enfriarse de t_1 a t_2 . La velocidad del viento viene dada por una tabla que la ofrece en función del tiempo para ese instrumento.

Las características de diferentes tipos de catatermómetros son descritas en la norma británica BS 3276 (1960).

El termoanemómetro

El termoanemómetro se basa en el mismo principio que el catatermómetro, pero no es necesario medir el tiempo transcurrido para la pérdida de una cantidad dada de calor; el termoanemómetro mide la pérdida de calor por unidad de tiempo. Para calentarse utiliza un elemento eléctrico que después pierde calor fundamentalmente por convección. Conocidos los datos de calefacción del aparato, las temperaturas del elemento y del aire, se calcula el coeficiente de convección de calor y con éste la velocidad del aire. El instrumento dispone, por lo tanto, de dos elementos de medida: uno para la temperatura del elemento y otro para la temperatura del aire. En la figura 2.11 se muestra un termoanemómetro.

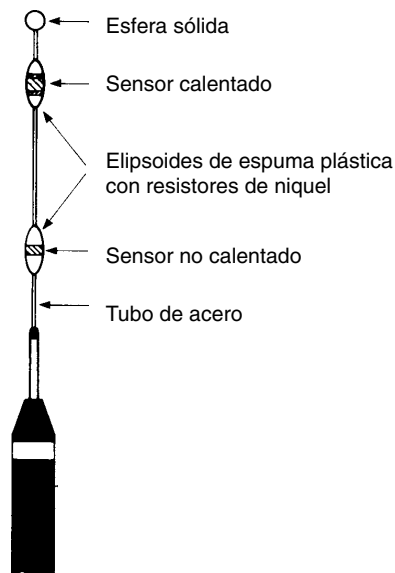


Fig. 2.11 Termoanemómetro B & K tipo MM0038

El calor metabólico

Recordemos que el metabolismo es la suma de todas las reacciones químicas que se producen en el organismo gracias a la combustión de los alimentos con el oxígeno y que prácticamente toda esta energía metabólica se convierte en calor dentro del cuerpo.

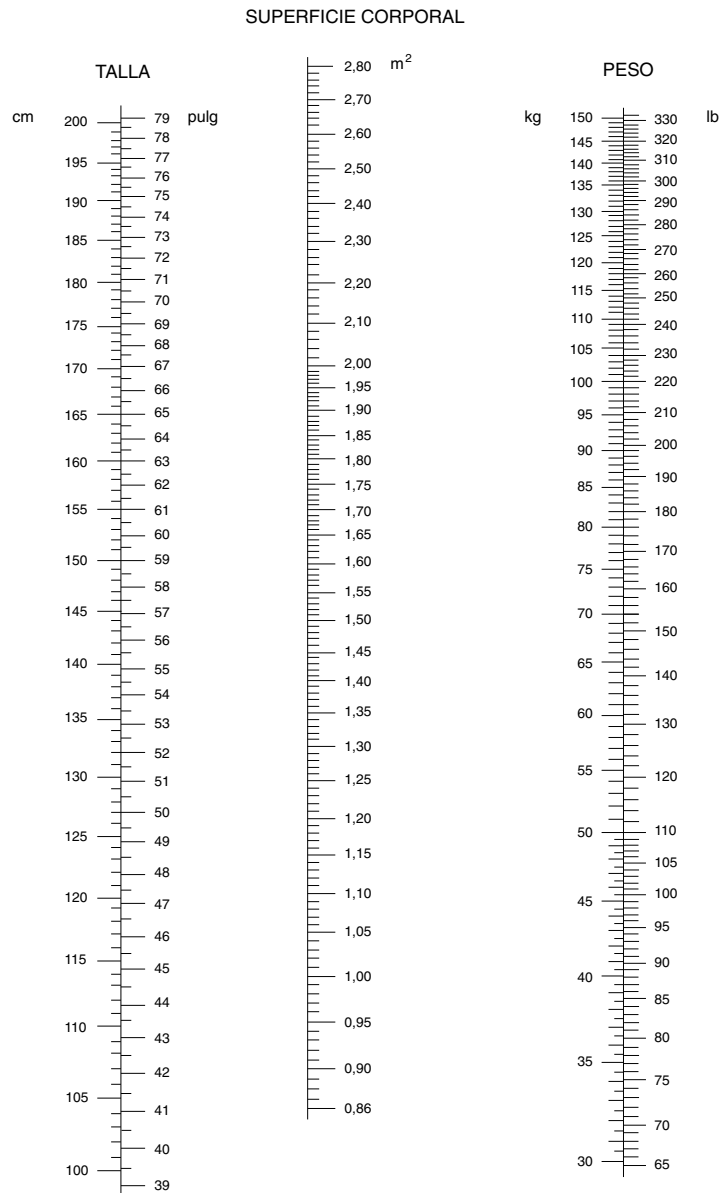


Fig. 2.12 Nomograma para determinar la superficie corporal conociendo el peso y la estatura

Los valores del metabolismo basal en la mujer son aproximadamente de 40,6 W/m² y en el hombre de 42,9 W/m², y a partir de estos valores el metabolismo se puede incrementar, mediante la actividad física, hasta unas 20 veces. Ya hemos visto cómo esto revierte en una notable generación de calor que puede alcanzar valores de hasta 1500 W, que es generar 1500 joules por cada segundo de actividad. Para que se comprenda mejor esta cifra podemos pensar en el calor que genera una plancha eléctrica doméstica (1500 W - 2000 W). El exceso de calor del organismo debe irse disipando a un ritmo determinado por su generación, fundamentalmente mediante la radiación, la convección y la evaporación del sudor.

Pero también, bajo determinadas condiciones, se puede enfermar y morir por falta del calor mínimo necesario.

El calor metabólico correlaciona habitualmente con la superficie corporal (S.C.) en metros cuadrados, y con el peso (Pc) en kilogramos.

La superficie corporal se puede determinar a partir del peso y la estatura, mediante tablas, nomogramas o ecuaciones como la de DuBois & DuBois (1915) o también con el nomograma de la figura 2.12:

$$SC = 0,202 Pc^{0,425} H^{0,725} \quad (17)$$

donde:

- SC: superficie corporal (m²)
- Pc: peso corporal (kg)
- H: altura (m)

Sin embargo, sin afectar la precisión necesaria y suficiente, en la mayoría de los trabajos habitualmente se utiliza el valor de superficie corporal de 1,8 m², que es el de un “hombre estándar” de 70 kg de peso y 1,73 m de estatura.

Otra unidad utilizada es el met, que equivale a 58,15 W/m² (50 kcal/m²h), valor que corresponde a la producción metabólica de una persona sentada en reposo. En la figura 2.13 se muestra una relación de actividades en W/m² y en met.

W/m ²	Norma ISO 7243		
	met.	Kcal/(m ² h)	Kcal/h
58,15	1	50	90
69,6	1,2	60	110
81,2	1,4	70	125
92,8	1,6	80	145

Fig. 2.13 Relación de actividades en W/m² y en met.

Medición del gasto energético

Los métodos para medir el consumo energético de una actividad física cualquiera pueden ser de dos tipos: por calorimetría directa y por calorimetría indirecta

Calorimetría directa

La calorimetría directa mide el calor que genera el organismo realizando la actividad que se quiere medir dentro de un calorímetro, que es una cámara preparada para controlar las condiciones microclimáticas y medir, mediante sensores, el calor que genera el individuo mientras realiza el trabajo en cuestión. Sin embargo, no todas las actividades pueden ser realizadas dentro de un calorímetro (por ejemplo, un corredor de 100 metros lisos, cartero, minero, panadero, etc.) y, por otra parte, los calorímetros son muy costosos.

Calorimetría indirecta

La calorimetría indirecta se basa en la utilización de otros parámetros que reflejan la generación energética, bien por ser causa directa de ésta, o bien por ser su consecuencia.

Así pues, la medición del gasto energético durante una actividad puede efectuarse mediante:

1. Control de los alimentos
2. Medición del consumo de oxígeno
3. Medición de la frecuencia cardíaca

Medición del gasto energético mediante el control de los alimentos

El control de los alimentos que consume el hombre durante un período de tiempo relativamente largo, conociendo el valor calorífico de éstos, permite conocer cuántas calorías se han almacenado en su cuerpo y cuántas se han invertido en sus actividades; pero esto obliga a la cuantificación muy estricta de todas las actividades (laborales y extralaborales) que realiza el trabajador durante esos días, de los alimentos que consume y de su peso.

Este método es realmente tedioso pues, además de ser lento y laborioso, es muy complejo, ya que es necesario descontar las actividades ajenas a la actividad que se quiere medir.

Medición del gasto energético mediante el consumo de oxígeno

Como método para conocer el gasto energético es más práctico, pues partiendo del conocimiento del valor calórico del oxígeno con una alimentación de carbohidratos, grasas y proteínas, debidamente balanceada, se puede calcular la energía consumida por el sujeto en la realización de la actividad.

El consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono durante una actividad se puede medir mediante diferentes tipos de instrumentos, incluso en tareas que requieren de mucha movilidad. Así, conociendo el consumo de O_2 , el gasto energético total se calcula:

$$GE_{\text{total}} = VO_2 \cdot vc O_2 \quad (18)$$

donde:

GE_{total} : gasto energético que incluye el metabolismo basal en kilojoules/min.
 VO_2 : volumen de oxígeno que se ha consumido en litros/minuto.
 vcO_2 : valor calórico del O_2 en kilojoules/litro.

Por lo tanto, para conocer el gasto energético neto o del trabajo (GE_w), es decir, el provocado únicamente por la actividad, es necesario deducir del total el metabolismo basal de la persona.

Así pues, si un hombre ha consumido 4 litros de oxígeno por minuto durante determinada actividad física, y si se acepta un vcO_2 de 20,1 kJ/litro, su gasto energético total ha sido de 80,4 kJ/min y el gasto energético que provoca la actividad es de 1263 W, que no es poco.

La cantidad de energía obtenida por cada litro de oxígeno en condiciones normalizadas (STPD) varía según la proporción de carbohidratos y grasas oxidados, lo que depende del tipo de alimentación y de la duración e intensidad del trabajo en relación con la capacidad de trabajo físico del sujeto. El valor calórico del oxígeno al combustionar con carbohidratos es de 21,14 kJ/litro, mientras que con las grasas es 19,85 kJ/litro y con las proteínas 18,67 kJ/litro.

El valor calórico o equivalente energético del oxígeno puede ser determinado por la siguiente expresión:

$$GE_{\text{total}} = (0,23 CR + 0,77) 5,88 \quad (\text{Wh/litro}) \quad (19)$$

Donde el cociente respiratorio (CR) es la relación entre el dióxido de carbono producido por la combustión de los alimentos durante el trabajo y el oxígeno consumido en ello :

$$CR = CO_2 \text{ producido} / O_2 \text{ consumido} \quad (20)$$

donde:

CO_2 y O_2 se miden en litros en condiciones STPD

El CR para los carbohidratos es 1,00; para las grasas es 0,71 y para las proteínas es 0,80. Considerando para una alimentación balanceada un valor medio entre 0,80 y 0,85, resulta un equivalente energético entre 5,60 y 5,68 Wh/litro, que equivale entre 20,1 y 20,45 kJ/litro. Con este valor de GE, el error máximo posible es del $\pm 3,5\%$.

En caso de que no se disponga de un equipo que ofrezca directamente el consumo de oxígeno, éste puede conocerse colectando el aire espirado por el sujeto durante la actividad en una bolsa de Douglas, que es una bolsa impermeable dentro de la cual el sujeto espira aire mediante una máscara con una válvula que ofrece una resistencia mínima, en varias muestras de aire de un minuto, para ser analizado por métodos químicos o físicos y conocer su contenido de oxígeno y dióxido de carbono. La expresión 23 permite conocer el volumen de oxígeno consumido:

$$VO_2 = (20,9 - [O_2]) VP_{STPD}/100 \quad (21)$$

donde:

VO_2 : volumen de oxígeno consumido en litros por minuto

20,9: porcentaje de oxígeno contenido en el aire fresco en %

$[O_2]$: concentración de oxígeno en el aire espirado en %

VP_{STPD} : ventilación pulmonar, o volumen de aire espirado, en condiciones STPD, en litros de aire por minuto, que se mide haciendo pasar el total del aire espirado contenido en la bolsa por un gasómetro.

Condiciones BTPS, ATPS y STPD

Las condiciones de temperatura, presión y humedad, del aire espirado, se van modificando a partir de su salida del cuerpo. De ahí que sea necesario definir y establecer unas condiciones normalizadas que permitan la comparación de los resultados, cualesquiera que sean las condiciones y el momento. Las definiciones de las tres condiciones son las siguientes:

BTPS (*Body Temperature and Pressure, Saturated*): inmediatamente después de ser espirado, el aire está a la temperatura del cuerpo, saturado de humedad y a la presión barométrica ambiental, condiciones denominadas BTPS.

ATPS (*Ambiental Temperature and Pressure, Saturated*): después de transcurrido un tiempo, ese aire espirado y colectado en un depósito no aislado está en condiciones ATPS a temperatura y presión barométrica ambientales y saturado de humedad.

STPD (*Standard Temperature and Pressure Dry*): volumen de aire seco a 0°C y 10,13 Pa (760 mmHg) de presión, son las condiciones normalizadas que posibilitan la comparación entre resultados independientemente de las condiciones y de las personas.

Con el nomograma de la figura 2.14 se puede determinar el factor STPD (f_{STPD}) que permite calcular el volumen del aire espirado en condiciones STPD (VP_{STPD}) partiendo de las condiciones ATPS y la pre-

sión y temperatura del aire al ser medido el volumen en estas condiciones, mediante la siguiente expresión:

$$VP_{STPD} = VP_{ATPS} f_{STPD} \quad (22)$$

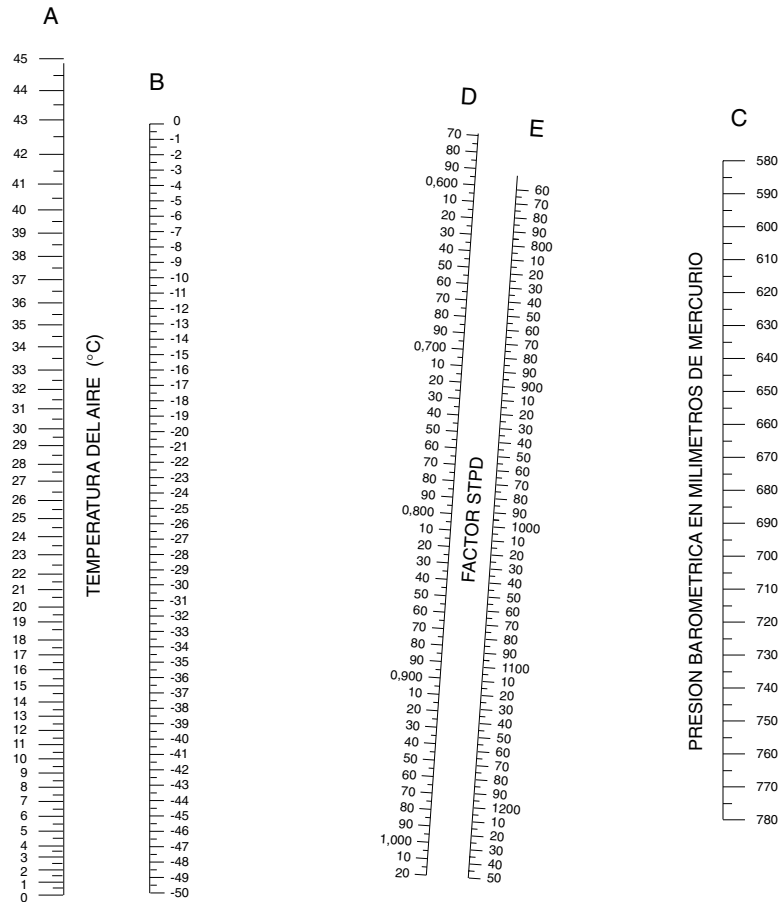


Fig. 2.14 Nomograma para determinar el factor f_{STPD}

También es posible calcular dicho factor mediante la expresión:

$$f_{STPD} = 273 (p_{at} - p_{aesp}) / [(273 + t) 101, 3] \quad (23)$$

donde:

p_{at} : presión atmosférica, (kPa)

t : temperatura del aire espirado, (°C)

p_{aesp} : presión del vapor de agua en el aire espirado, (kPa)

$$p_{aesp} = 0,1 \exp [18,956 - 4030,18/(t + 235)] \quad \text{kPa} \quad (24)$$

Otra ecuación que permite el cálculo directo del volumen del aire espirado en condiciones STPD es la siguiente:

$$V_{STPD} = 2,694 p_{at} V_{ATPS} / (t + 273) \quad (25)$$

donde:

p_{at} : presión atmosférica, (kPa)

V_{ATPS} : volumen del aire espirado en condiciones ATPS, (litros/min.)

t : temperatura del aire espirado, (°C)

Medición del gasto energético por la frecuencia cardíaca

La relación lineal existente entre la frecuencia cardíaca y el metabolismo, al menos hasta las 170 pulsaciones por minuto, puede ser aprovechada para utilizar la frecuencia cardíaca como indicador del gasto energético en actividades físicas.

Para ello se obtiene la recta VO_2 -FC específica del sujeto sometiéndolo en el laboratorio a diferentes cargas crecientes de esfuerzos físicos y midiendo en cada carga la FC y el VO_2 . Para esto se puede utilizar un escalón, el veloergómetro, una pista deslizante, e incluso, como alternativa interesante, ejercicios físicos de calentamiento, o trote sobre el propio terreno. Una vez calculada la recta FC- VO_2 del sujeto es posible, utilizándolo a él, determinar el gasto energético de cualquier actividad física mediante su frecuencia cardíaca (FC).

En todos los casos, hay que tener presente que para conocer la energía calórica que provoca la actividad física es necesario deducir la del metabolismo basal y, si se desease una mayor precisión, tener en cuenta la eficiencia mecánica de la actividad. Es decir: si la actividad es muy dinámica (como ir en bicicleta o elevar cargas a niveles superiores), debe descontarse entre el 20-25% del gasto energético que no se transformará en calor dentro del organismo, sino en trabajo externo positivo (W) y en caso de un trabajo negativo (como bajar escaleras y bajar cargas a niveles inferiores), sumarle este trabajo externo negativo que se convertirá en calor dentro del organismo, de acuerdo con la expresión de balance térmico:

$$M \pm W \pm R \pm C - E = A \quad (26)$$

No obstante, en la práctica, para la mayoría de los estudios y de las actividades físicas, no es necesaria tal precisión.

Estimación del gasto energético mediante tablas

Una forma de estimar el gasto energético es la utilización de tablas confeccionadas por especialistas a partir de investigaciones realizadas utilizando las metodologías anteriores (Astrand, 1960; Astrand y Rodahl, 1986; Rodahl, 1989 y otros), si bien deberían ser replicadas para la población en que van a ser empleadas, pueden resultar de mucha utilidad cuando son interpretadas por ergónomos con experiencia.

Estas tablas pueden presentarse según la intensidad del trabajo, tal como se muestra en la figura 2.15 de la norma ISO 7243; según las posturas y los movimientos, como es el caso de las tablas de la figura 2.16 de G. Lehmann; o por componentes del metabolismo, del proyecto de norma ISO 8996, que se reproduce en las tablas de las figuras 2.17, 2.18 y 2.19; o según actividades específicas de la misma ISO 8996, como se muestra en la tabla de la figura 2.20.

<i>Intensidad</i>	<i>Metabolismo (W/m²)</i>
Descanso	M < 65
Ligero	65 < M < 130
Moderado	130 < M < 200
Pesado	200 < M < 260
Muy pesado	260 < M

Fig. 2.15 Estimación del metabolismo según la intensidad del trabajo (norma ISO 7243)

La carga térmica metabólica se calcula como la suma de tres términos, A, B y C cuyos valores se indican a continuación:		
A.- Posición y movimiento del cuerpo		
		Kcal/min
Sentado		0,3
De pie		0,6
Andando en terreno llano		2,0 - 3,0
Andando en pendiente		añadir 0,8 por m de desnivel
B.- Tipos de trabajo		
	Valores medios Kcal/min	Valores límites Kcal/min
Manual ligero	0,4	0,2 - 1,2
Manual pesado	0,9	
Con un brazo: ligero	1,0	0,7 - 2,5
Con un brazo: pesado	1,8	
Con ambos brazos: ligero	1,5	1,0 - 3,5
Con ambos brazos: pesado	2,5	
Con el cuerpo: ligero	3,5	
Con el cuerpo: moderado	5,0	
Con el cuerpo: pesado	7,0	2,5 - 15
Con el cuerpo: muy pesado	9,0	
C.- Metabolismo basal		
Corresponde al calor liberado por el organismo en estado de reposo físico y mental: a efectos prácticos se adopta siempre el valor de 1 Kcal/min.		

Fig. 2.16 Estimación del metabolismo según las posturas y los movimientos (G. Lehmann). El metabolismo del trabajo se obtiene sumando las tablas A y B.

<i>Posición del cuerpo</i>	<i>Metabolismo (W/m²)</i>
Sentado	10
Arrodillado	20
Agachado	20
De pie	25
De pie inclinado	30

Fig 2.17 Estimación del metabolismo por componentes en función de la postura (norma ISO 8996, 1990).

<i>Tipo de trabajo</i>	<i>Metabolismo (W/m²)</i>	
	<i>Valor medio</i>	<i>Intervalo</i>
Trabajo con las manos		
ligero	15	< 20
medio	30	20 - 30
intenso	40	> 35
Trabajo con un brazo		
ligero	35	< 45
medio	55	45 - 65
intenso	75	> 65
Trabajo con dos brazos		
ligero	65	< 75
medio	85	75 - 95
intenso	105	> 95
Trabajo con el tronco		
ligero	125	< 155
medio	190	155 - 230
intenso	280	230 - 330
muy intenso	390	> 330

Fig 2.18 Estimación del metabolismo por componentes debido al tipo de trabajo (norma ISO 8996, 1990).

<i>Tipo de trabajo</i>	<i>Metabolismo en función de la velocidad (W/m²) / (ms⁻¹)</i>
<p>Velocidad de desplazamiento en función de la distancia</p> <p>Caminar 2 a 5 km/h</p> <p>Caminar en subida 2 a 5 km/h Pendiente 5° Pendiente 10°</p> <p>Caminar en bajada 5 km/h Pendiente 5° Pendiente 10°</p> <p>Caminar a 4 km/h con una carga en la espalda Carga de 10 kg Carga de 30 kg Carga de 50 kg</p>	<p>110</p> <p>210 360</p> <p>60 50</p> <p>125 185 285</p>
<p>Velocidad de desplazamiento en función de la altura</p> <p>Subir una escalera Bajar una escalera</p> <p>Subir una escalera de mano inclinada Sin carga Con una carga de 10 kg Con una carga de 50 kg</p> <p>Subir una escalera de mano vertical Sin carga Con una carga de 10 kg Con una carga de 50 kg</p>	<p>1725 480</p> <p>1660 1870 3320</p> <p>2030 2335 4750</p>

Fig 2.19 Estimación del metabolismo por componentes debido al movimiento (norma ISO 8996, 1990).

ACTIVIDAD	METABOLISMO (W/m ²)
1 ACTIVIDADES DE BASE	
1.1 Andar en llano, incluso en camino	
2 Km/h	110
3 Km/h	140
4 Km/h	165
5 Km/h	200
1.2 Andar subiendo	
3 Km/h pendiente de 5°	195
3 Km/h pendiente de 10°	275
3 Km/h pendiente de 15°	390
1.3 Andar descendiendo	
5 Km/h pendiente de 5°	130
5 Km/h pendiente de 10°	115
5 Km/h pendiente de 15°	120
1.4 Subir escaleras (peldaño 0,172 m)	
80 peldaños por minuto	440
1.5 Bajar escaleras (peldaño 0,172 m)	
80 peldaños por minuto	155
1.6 Transportar una carga en llano	
4 Km/h con masa de 10 Kg	185
4 Km/h con masa de 30 Kg	250
4 Km/h con masa de 50 Kg	360
2 PROFESIONES	
2.1 Industria de la construcción	
2.1.1 Colocar ladrillos (muro igual sup.)	
Ladrillo lleno (masa 3,8 Kg)	150
Ladrillo hueco (masa 4,2 Kg)	140
Ladrillo hueco (masa 15,3 Kg)	135
Ladrillo hueco (masa 23,4 Kg)	125
2.1.2 Prefabricación elementos hormigón	
Encofrado y desencofrado	
(Recubrimiento de hormigón pretensado)	180
Colocar armaduras de acero	130
Colada de hormigón	
(Recubrimientos de hormigón pretensado)	180
2.1.3 Construcción edificios de viviendas	
Mezcla de cemento	155
Colada de hormigón para fundaciones	275
Compactado de hornigón por vibraciones	220
Encofrado	180
Carga de una carretilla	275
2.2 Industria siderúrgica	
2.2.1 Alto horno	
Preparar el canal de colada	340
Perforación	430
2.2.2 Moldeo (moldeo a mano)	
Moldeo de piezas de dimensiones medias	285
Comprimir con martillo neumático	175
Moldeo de piezas pequeñas	140
2.2.3 Moldeo a máquina	
Desmoldeo	125
Moldeo, colada con 1 hombre	220
Moldeo, colada con 2 hombres	210
Moldeo a partir de colada suspendida	190
	... / ...

2.2.4	Taller de acabado	
	Trabajo con martillo neumático	175
	Amolado, decapado	175
2.3	Industria forestal	
2.3.1	Transporte y trabajo con hacha	
	Andar con carga 7Kg en bosque a 4Km/h	285
	Cargar sierra de cadena 18 Kg a 4 Km/h	385
	Trabajo con hacha (2 Kg, 33 golpes/min)	500
	Corte de raíces con hacha	375
	Poda	415
2.3.2	Tala	
	Corte a contrahilo 2 hombres	
	60 cortes dobles/min, 20cm2/corte doble	415
	40 cortes dobles/min, 20cm2/corte doble	240
	Tala con sierra de cadena	
	Sierra de cadena con un hombre	235
	Sierra de cadena con dos hombres	205
	Corte a contrahilo	
	Sierra de cadena con un hombre	205
	Sierra de cadena con dos hombres	190
	Descortezamiento	
	Valor medio en verano	225
	Valor medio en invierno	390
2.4	Agricultura	
	Cavar (24 golpes/min)	380
	Laboreo con un tiro de caballos	235
	Laboreo con un tractor	170
	Fertilización de un campo	
	Semillas a mano	280
	Semillas con semillero tirado por caballos	250
	Semillas con un tractor	95
	Bina (masa del binador 1,25 Kg)	170
2.5	Deportes	
2.5.1	Carreras	
	9 Km/h	435
	12 Km/h	485
	15 Km/h	550
2.5.2	Ski	
	Sobre terreno llano, nieve buena	
	7 Km/h	350
	9 Km/h	405
	12 Km/h	510
2.5.3	Patinaje	
	12 Km/h	225
	15 Km/h	285
	18 Km/h	360
2.6	Trabajos domésticos	
	Limpieza	100-200
	Cocina	80-135
	Vajilla, de pie	145
	Lavado a mano y repaso	120-220
	Afeitado, lavado y vestirse	100

Figura 2.20 Estimación del metabolismo según actividades específicas (norma ISO 8996, 1990).

Metabolismo de un ciclo de trabajo

Para determinar el metabolismo total de un ciclo de trabajo, es necesario efectuar un estudio de tiempos y de actividades. Ello implica clasificar cada una de ellas y tener en cuenta factores tales como su duración, las distancias recorridas, las cargas manipuladas, etc. El metabolismo para un ciclo de trabajo viene dado por la media ponderada de todas las actividades.

El método de la media ponderada es importante en el establecimiento de índices para el control del estrés térmico en ambientes laborales. Sin embargo, en ciertos casos, como los regímenes de trabajo–descanso, puede no ser un buen indicador de la carga de tensión térmica o fisiológica.

Propiedades térmicas del vestido

La unidad del aislamiento térmico de la ropa (I_{clo}) en el sistema internacional es el $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, pero una unidad más práctica y usual es el clo ($1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$), que se define como el aislamiento necesario para mantener confortable a una persona que desarrolle una actividad sedentaria (menos de 60 W/m^2) a una temperatura de $21 \text{ } ^\circ\text{C}$.

En la figura 2.21 se expresa la valoración del vestido de acuerdo con la norma ISO 7730.

<i>Tipo de vestido</i>	<i>Icl (clo)</i>	<i>Icl (m² °C/W)</i>
Desnudo	0	0
En pantalones cortos	0,1	0,016
Vestimenta tropical en exteriores: camisa abierta con mangas cortas, pantalones cortos, calcetines finos y sandalias	0,3	0,047
Ropa ligera de verano: camisa ligera de mangas cortas, pantalones largos, calcetines finos y zapatos	0,5	0,078
Ropa de trabajo: camiseta, camisa con mangas largas, pantalones de vestir, calcetines y zapatos	0,8	0,124
Ropa de invierno y de trabajo en interiores: camiseta, camisa manga larga, calcetines de lana y zapatos	1,0	0,155
Vestimenta completa y de trabajo en interiores: camiseta y camisa de manga larga, chaleco, corbata, americana, pantalones de lana, calcetines de lana y zapatos	1,5	0,233

Figura 2.21 Aislamiento térmico según el tipo de vestido, ISO 7730

3 Balance térmico

Ecuación general de balance térmico

Hasta ahora hemos visto de una forma global los diferentes factores que intervienen en el balance térmico; analicemos aquí cada uno de ellos con mayor grado de detalle.

Para realizar un estudio ergonómico del ambiente térmico, es imprescindible analizar el intercambio térmico que se efectúa entre la persona y el medio donde esta realiza sus actividades.

La ecuación general de balance térmico viene dada por la siguiente expresión:

$$M \pm W \pm R \pm C - E \pm C_{res} \pm E_{res} - E_d \pm C_{cond} = C_{cond.clo} = A \quad (1)$$

siendo:

M:	energía calórica producida por el organismo
W:	trabajo mecánico desarrollado
R:	intercambio de calor por radiación
C:	intercambio de calor por convección
E:	pérdida de calor por evaporación del sudor
C_{res} :	intercambio de calor por convección respiratoria
E_{res} :	intercambio de calor por evaporación respiratoria
E_d :	pérdida de calor por difusión del vapor
C_{cond} :	intercambio de calor por conducción
$C_{cond.clo}$:	conducción a través del vestido
A:	ganancia o pérdida de calor por el cuerpo

Obviamente, de la expresión anterior se pueden colegir cuatro situaciones que generan diferentes estados de A:

- 1) cuando A y $E = 0$ hay equilibrio térmico y en general condiciones entre confort y permisibles
- 2) cuando $A = 0$ y $E > 0$ hay equilibrio térmico y en general condiciones entre confort y permisibles
- 3) en la que $A > 0$ hay desequilibrio por ganancia de calor; tensión calórica
- 4) en la que $A < 0$ hay desequilibrio por pérdida de calor; tensión por frío

El término de conducción, C_{cond} , normalmente es insignificante comparado con el intercambio térmico total; en cambio, sí es importante en la influencia del intercambio térmico a través del contacto de la ropa $C_{\text{cond.clo}}$.

La situación de equilibrio térmico se alcanza cuando el calor acumulado, A , es nulo. Por eso podemos escribir también la ecuación considerando:

$$A \text{ y } C_{\text{cond}} = 0$$

como:

$$M \pm W - E - E_d \pm C_{\text{res}} \pm E_{\text{res}} = \pm C_{\text{cond.clo}} = \pm R \pm C \quad (2)$$

En trabajos prácticos este intercambio de calor se produce, básicamente, por cuatro vías, tal como aparece en la figura 3.1:

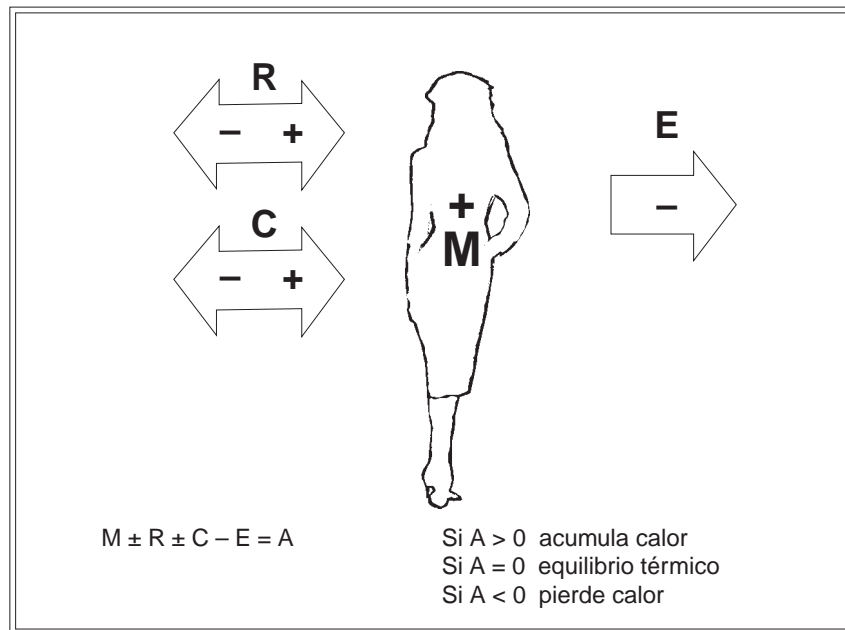


Fig. 3.1 Ecuación práctica del balance térmico

Metabolismo (M)

El proceso metabólico convierte energía química en calor; en la medida que el cuerpo necesita para funcionar, esta energía también se emplea para realizar trabajos mecánicos externos (W), pero en su mayor parte se transforma en calor interno.

Por consiguiente, se puede decir que el balance interno de calor se establecería entre la diferencia de metabolismo (M) y el trabajo externo (W).

El valor de M puede variar desde un valor mínimo de 45 W/m^2 , hasta más de 500 W/m^2 para un ejercicio muy intenso.

La superficie media de la piel de una persona es aproximadamente de $1,8 \text{ m}^2$. Si queremos calcular su valor de forma más precisa se puede utilizar, como ya vimos en el capítulo anterior, la expresión de DuBois & DuBois que, a partir de la altura y el peso, nos da los metros cuadrados de piel, o mediante el nomograma de la figura 2.10.

$$S.C = 0,202 P_c^{0,425} H^{0,725} \quad (3)$$

donde

P_c : peso (kg)

H : altura (m)

El metabolismo también se mide en unidades «met», que se define como el metabolismo de una persona sentada sin una actividad especial ($1 \text{ met} = 58,15 \text{ W/m}^2 = 90 \text{ kcal/h}$). Las diferentes formas de determinar la producción interna de calor son objeto de la norma ISO 8996.

Por último, debemos recordar que los incrementos en el metabolismo dan lugar, en muchos casos, a aumentos de la velocidad relativa del aire debida a los propios movimientos del cuerpo. Este efecto no está suficientemente analizado, y se deberá tener en cuenta en próximas investigaciones para determinar, si cabe, algún factor corrector a considerar en el cálculo de la velocidad del aire.

Trabajo externo (W)

El hombre es una máquina de bajo rendimiento. Su eficiencia mecánica está entre el 20 y el 25%. Por ejemplo, si en una actividad determinada necesitamos desarrollar un trabajo externo equivalente a 10 W/m^2 , nuestro metabolismo ha de ser capaz de dar como mínimo 50 W/m^2 , de los que unos 40 W/m^2 deben ser eliminados, normalmente, por un incremento de la sudoración, de la radiación y de la convección con el fin de mantener la temperatura interna constante.

Intercambio de calor por radiación (R)

El intercambio de calor por radiación tiene lugar entre la superficie de la persona, ya sea su piel o su vestido, y las superficies que la rodean, ya que todo cuerpo emite una radiación electromagnética que es portadora de energía.

El intercambio térmico que se producirá entre la persona y el medio está definido por: la fracción de la superficie del cuerpo que participa en el intercambio; la diferencia entre la temperatura de la piel y la temperatura radiante media; y también por las características térmicas del vestido.

El intercambio de calor por radiación en W/m^2 viene dado por la siguiente expresión:

$$R = f_{\text{eff}} f_{\text{clo}} \epsilon \sigma [(t_{\text{clo}} + 273)^4 - (T_{\text{RM}} + 273)^4] \quad (4)$$

siendo:

- f_{eff} : factor de área de radiación efectiva postural (relación entre la superficie de radiación efectiva de cuerpo vestido y el área total del cuerpo vestido)
- f_{clo} : relación de la superficie de la persona cuando está vestida y de la superficie de la persona desnuda
- ε : emisividad de la superficie exterior del cuerpo vestido
- σ : constante de Stefan–Boltzman, [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$]
- t_{clo} : temperatura de la superficie del vestido, ($^{\circ}\text{C}$)
- TRM: temperatura radiante media, ($^{\circ}\text{C}$)

El factor f_{clo} se introduce para considerar el incremento de la superficie de intercambio que supone llevar ropa, ya que f_{clo} es siempre mayor que 1; f_{clo} es 1 solamente si vamos desnudos. Si el cuerpo estuviera desnudo, habría que sustituir t_{clo} por la temperatura de la piel t_p , desapareciendo de la ecuación el término f_{clo} .

El cuerpo intercambia calor por radiación no sólo con el entorno, sino también con partes del propio cuerpo (como por ejemplo brazos con costados y piernas). La superficie radiante externa efectiva es en este caso menor que la superficie radiante total. Este efecto se incluye en el factor f_{eff} . Experimentalmente se ha encontrado un valor de 0,725 para personas de pie y de 0,696 para personas sentadas. Como la diferencia es relativamente pequeña, se suele tomar un valor medio del factor de área de radiación efectiva postural de 0,71.

Dado que la emisividad de la superficie de la piel es cercana a la unidad, y la mayoría de tejidos tienen un valor en torno a los 0,95, se suele usar una media de 0,97. La emisividad de la piel y del vestido es independiente del color para bajas temperaturas de radiación.

La temperatura radiante media (TRM) se define como aquella que se podría tomar como temperatura uniforme de las superficies que rodean al cuerpo, y que daría un mismo intercambio por radiación. Se estima mediante las temperaturas de las distintas superficies que lo rodean, ponderadas en función del factor de visión de cada una:

$$\text{TRM} = [F_{p-1} \cdot (t_1 + 273)^4 + \dots + F_{p-n} \cdot (t_n + 273)^4]^{0,25} - 273 \quad (5)$$

en donde:

- t_n : temperatura de la superficie n , ($^{\circ}\text{C}$)
- F_{p-n} : factor de visión entre persona y la superficie n , habiéndose tomado el cuerpo y las superficies que lo rodean como superficies difusas.

Por lo tanto la temperatura radiante media es función de la postura de la persona, y de su posición en el entorno.

Introduciendo las constantes anteriores, el intercambio de calor por radiación en W/m^2 viene dada por:

$$R = 3,95 \cdot 10^{-8} f_{\text{clo}} [(t_{\text{clo}} + 273)^4 - (\text{TRM} + 273)^4] \quad (6)$$

Para temperaturas de aire entre 10 y 30 °C, esta ecuación puede escribirse como:

$$R = 3,93 f_{clo} (t_{clo} - TRM) \quad (\text{W/m}^2) \quad (7)$$

En la industria siderometalúrgica, de vidrio o de cerámica, o en cualquier trabajo con hornos donde la temperatura radiante media es superior a la temperatura del vestido de la persona, existirá ganancia de calor por radiación. Mientras que en situaciones tales como trabajos en camaras frigoríficas, o a la intemperie con temperaturas bajas tendremos, generalmente, pérdida de calor por radiación.

Intercambio de calor por convección (C)

El proceso de convección libre viene motivado usualmente debido a las diferencias de temperaturas entre la superficie de una persona, la temperatura del aire que la rodea, y la temperatura del aire espirado. Si la persona tiene una temperatura superior al aire, el aire próximo se calentará y dado que la densidad del aire caliente es menor que la del aire frío, el caliente ascenderá, y se ocupará este espacio con nuevo aire frío.

Por otra parte, si el aire se mueve hacia la persona mediante un ventilador le llamaremos convección forzada.

El intercambio de calor por convección, viene dado por:

$$C = f_{clo} h_c (t_{clo} - t_a) \quad (\text{W/m}^2) \quad (8)$$

siendo:

- f_{clo} : factor de área del vestido
- h_c : coeficiente de convección ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
- t_a : temperatura del aire (°C)
- t_{clo} : temperatura del vestido

Para convección libre, h_c depende de la diferencia de temperaturas entre el vestido y el aire:

$$h_c = 2,38 (t_{clo} - t_a)^{0,25} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}) \quad (9)$$

Para convección forzada, h_c depende de la velocidad relativa del aire:

$$h_c = 12,1 (v_{ar})^{0,5} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}) \quad (10)$$

Para cada caso se deberá evaluar cuál de las dos situaciones, convección natural o forzada, es la más importante. Generalmente utilizaremos y aplicaremos convección libre cuando $v_{ar} < 0,1$ m/s. Es importante remarcar que la velocidad relativa entre aire y persona es la que debe usarse para el cálculo de la convección forzada.

Pérdida de calor por evaporación del sudor (E)

La evaporación del sudor es uno de los mecanismos más efectivos mediante el cual el cuerpo puede mantener su temperatura interna dentro de los valores normales, incluso cuando se realizan tareas que requieren un esfuerzo físico considerable.

La cantidad de sudor que se evapora varía mucho en función del trabajo que se realice, del tipo de vestido, de la velocidad del aire, de la humedad del ambiente, y está limitada por la capacidad de sudar de cada persona. Las personas habituadas a trabajar en ambientes calurosos, o a realizar trabajos duros, pueden incrementar considerablemente su capacidad de sudoración, con lo que obtienen un mayor control sobre la temperatura corporal.

Cada gramo de sudor evaporado requiere un aporte de calor por parte del cuerpo de 0,58 Kcal. Una persona aclimatada puede llegar a sudar 1 litro por hora. Así, por ejemplo, para una sudoración de 3,5 litros, si todo este vapor se evapora, se produce un intercambio de calor de 673 W (374 W/m^2) para una superficie corporal de $1,8 \text{ m}^2$, lo que supone una cantidad de 8485 kJ.

Como ya se ha visto para las actividades intensas en ambientes calurosos, es importante beber agua con aporte de sales y minerales, con el fin de poder sudar suficientemente y reponer las pérdidas minerales.

Con actividades moderadas (trabajo de oficina, profesores, vendedores, industria ligera, etc.) la evaporación es de menor importancia y comporta alrededor del 25% de las pérdidas de calor.

Para tasas de sudoración, temperaturas del aire y presiones de vapor moderadas resulta razonable pensar que todo el sudor se evapora.

La pérdida de calor por evaporación se considerará permisible o no, en función de la comparación con la evaporación máxima permisible. Si bien la sudoración es un mecanismo fisiológico de prevención, la eficacia de la sudoración está condicionada por las variables del ambiente térmico, especialmente por la humedad y la velocidad del aire.

$$E_{\max} = (p_p - p_a) / R_t \quad (11)$$

donde:

p_p : presión parcial de vapor de agua saturado a la temperatura de la piel, (kPa)

p_a : presión parcial del vapor de agua del ambiente, (kPa)

R_t : resistencia total del vestido y de la capa límite del aire a la evaporación, ($\text{m}^2\text{kPaW}^{-1}$)

Pérdida de calor por respiración (C_{res}) y (E_{res})

En la espiración se pierde calor ya que el aire exhalado es más caliente que el inhalado, y porque existen diferencias en el contenido de vapor. Se considera la temperatura del aire exhalado de $34 \text{ }^\circ\text{C}$. La pérdida

de calor debida a la respiración normalmente es insignificante. El calor intercambiado por convección respiratoria viene dado por:

$$C_{\text{res}} = 0,0014 M (34 - t_a) \quad (\text{W/m}^2) \quad (12)$$

siendo:

C_{res} : pérdida de calor por convección respiratoria, (W/m^2)

M : metabolismo, (W/m^2)

t_a : temperatura del aire en el ambiente, ($^{\circ}\text{C}$)

Mientras que la pérdida de calor debida a la diferencia de vapor de agua entre el aire inhalado y exhalado puede estimarse mediante:

$$E_{\text{res}} = 1,72 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) \quad (\text{W/m}^2) \quad (13)$$

siendo:

p_a : presión parcial de vapor de agua en el ambiente, (Pa)

Para actividades ligeras que se desarrollen en interiores de locales, oficinas, tiendas, etc. y temperaturas en torno a los 20°C , las pérdidas por respiración estarían entre 2 y 5 W/m^2 .

Pérdida de calor por difusión del vapor en la piel (E_d)

La pérdida de calor por evaporación tiene lugar en parte por la difusión del vapor de agua a través de la piel (E_d), y en parte por evaporación del sudor (E) de la superficie dérmica (el agua toma calor de la piel para evaporarse).

La cantidad de agua que se pierde por difusión a través de la piel, y su correspondiente pérdida de calor (E_d), es función de la diferencia entre la presión de vapor de agua saturado (tensión máxima de saturación) a la temperatura de la piel (p_p), y la presión de vapor de agua en el ambiente (presión parcial o tensión de vapor) (p_a).

$$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} (p_p - p_a) \quad (\text{W/m}^2) \quad (14)$$

en donde p_p y p_a están en Pa.

La presión de vapor de agua saturado en la superficie de la piel p_p , es función de su temperatura (t_p) y para valores de t_p entre 27°C y 37°C viene dada por la siguiente expresión:

$$p_p = 256 t_p - 3373 \quad (\text{Pa}) \quad (15)$$

De ambas ecuaciones obtenemos:

$$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} (256 t_p - p_a - 3373) \quad (\text{W/m}^2) \quad (16)$$

La difusión del vapor de agua en la piel es, normalmente, de 10 W/m^2 . La pérdida de calor mediante la difusión de agua a través de la superficie de la piel no se controla por el sistema termorregulador.

Conducción de calor a través del vestido ($C_{\text{cond.clo}}$)

El intercambio térmico a través del vestido viene dado por la primera Ley de Fourier de la conducción:

$$C_{\text{cond.clo}} = (t_p - t_{\text{clo}}) (\delta A/L) \quad (17)$$

siendo $(\delta A/L)$ la conductividad térmica del vestido.

La inversa de la conductividad térmica es la resistencia térmica, que viene dada en unidades de $\text{m}^2\text{K/W}$. Las características térmicas del vestido suelen venir dadas en unidades clo ($1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$).

Introduciendo este valor en la ecuación anterior de intercambio calórico a través del vestido, se obtiene:

$$C_{\text{cond.clo}} = (t_p - t_{\text{clo}})/(0,155 I_{\text{clo}}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (18)$$

donde:

- t_p : temperatura media de la piel ($^{\circ}\text{C}$)
- t_{clo} : temperatura de la superficie del vestido ($^{\circ}\text{C}$)
- I_{clo} : resistencia térmica del vestido (clo)

Toda la evaporación que tiene lugar en la superficie de la piel se considera como si se hubiera transportado a través del vestido mediante difusión. Se puede aceptar, en la mayoría de los casos, que la resistencia a la difusión con vestido normal es muy pequeña, y que en la zona de confort la producción de sudor es mínima.

El planteamiento desarrollado en este capítulo es utilizado por Fanger para la valoración del confort térmico. Los otros índices que aparecen en la presente obra, excepto el WBGT, también se basan en la ecuación de balance térmico, aunque utilizan expresiones propias para su cálculo.

4 Índice de valoración medio (IVM) de Fanger

Por razones técnicas o económicas, no siempre es posible un estado microclimático que dé lugar al confort térmico. En muchas ocasiones, las situaciones en las que los trabajadores manifiestan su disconformidad con el ambiente térmico no son suficientemente agresivas como para dar lugar a daños para la salud; sin embargo ello no impide que los parámetros térmicos sean capaces de generar una sensación de disconfort que contribuye de forma notable a la reducción de la eficiencia del operario, y a un empobrecimiento de la productividad y de la calidad del sistema productivo.

El confort térmico puede definirse como la manifestación subjetiva de conformidad o satisfacción con el ambiente térmico existente; debido a la variabilidad psicofisiológica es prácticamente imposible conseguir que en un colectivo de personas, cualesquiera que sean las condiciones ambientales de referencia, la totalidad de las mismas manifiesten sentirse confortables en una situación microclimática dada.

Diferentes estudios han demostrado que en todo grupo de personas existe, al menos, un 5% que muestran estar disconformes con las condiciones de confort preestablecidas; obviamente si las condiciones ambientales son más desfavorables, este porcentaje puede incrementarse hasta que alcance a la totalidad de la población.

Fanger y la ecuación de confort

Fanger define tres condiciones para que una persona se encuentre en confort térmico:

- 1) que se cumpla el equilibrio térmico
- 2) que la tasa de sudoración esté dentro de los límites de confort
- 3) que la temperatura media de la piel esté dentro de los límites de confort.

Como vimos en el capítulo 3, la ecuación general del balance térmico viene dada por la expresión:

$$M \pm W \pm R \pm C - E \pm C_{\text{res}} \pm E_{\text{res}} - E_{\text{d}} \pm C_{\text{cond}} = C_{\text{cond.clo}} = A \quad (1)$$

siendo:

- M: energía metabólica producida por el organismo
- W: trabajo mecánico externo
- R: intercambio de calor por radiación
- C: intercambio de calor por convección
- E: pérdida de calor por evaporación del sudor
- C_{res} : intercambio de calor por convección respiratoria
- E_{res} : intercambio de calor por evaporación respiratoria
- E_d : pérdida de calor por difusión de agua por la piel
- C_{cond} : intercambio de calor por conducción
- $C_{cond.clo}$: intercambio de calor por conducción por la ropa
- A: pérdida o ganancia de calor en el cuerpo

Condiciones para establecer el confort térmico

Hemos definido el confort térmico como aquel estado de satisfacción con las características térmicas del ambiente, cuya condición básica, generalmente, es que exista el equilibrio térmico sin necesidad de sudar. Para una persona determinada que realice un nivel de actividad M , con un vestido y un entorno dado, el equilibrio térmico se alcanzará con una combinación específica de temperatura media de la piel y pérdida de sudor.

Por convenio, los diferentes autores que han tratado el tema aceptan que para cada persona y actividad existe un rango de valores de temperatura de la piel (t_p) y de pérdidas de sudor por evaporación (E), que darán lugar a la sensación de confort.

$$a < t_p < b$$

$$c < E < d$$

Mediante regresión lineal se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$t_p = 35,7 - 0,0275 (M - W) \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

$$E = 0,42 (M - W - 58,15) \quad (\text{W/m}^2) \quad (3)$$

La temperatura media de la piel decrece en las actividades intensas mientras se incrementan las pérdidas por sudor.

Como ejemplo podríamos citar que para una persona sentada en reposo y tranquila ($M = 58 \text{ W/m}^2$, $W = 0$) en un estado normal de confort térmico ($E = 0$), la temperatura media de la piel podría situarse en 34°C . De todas formas, cabe recordar que seguirá existiendo pérdida de calor por difusión de vapor de agua, a través de la piel y por la respiración.

Volviendo a la ecuación (1) del balance que viene dada por la expresión:

$$M \pm W - E - E_d \pm C_{res} \pm E_{res} = \pm C_{cond.clo} = \pm R \pm C$$

Se deduce:

$$M \pm W - E - E_d \pm C_{res} \pm E_{res} = \pm R \pm C \quad (4)$$

con:

$$E = 0,42 (M - W - 58,15) \quad (3)$$

$$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} (256 t_p - 3373 - pa) \quad (5)$$

$$C_{res} = 0,0014 M (34 - t_a) \quad (6)$$

$$E_{res} = 1,72 \cdot 10^{-5} M (5867 - pa) \quad (7)$$

$$R = 3,95 \cdot 10^{-8} f_{clo} [(t_{clo} + 273)^4 - (TRM + 273)^4] \quad (8)$$

$$C = f_{clo} h_c (t_{clo} - t_a) \quad (9)$$

Si se sustituye y se introduce la t_p dada por la ecuación (2), se obtiene la ecuación de confort:

$$\begin{aligned} & (M-W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5766 - 7,04 (M-W) - pa] - 0,42 (M-W-58,15) - \\ & - 1,72 \cdot 10^{-5} M (5867 - pa) - 0,0014 M (34 - t_a) = \\ & = 3,95 \cdot 10^{-8} f_{clo} [(t_{clo}+273)^4 - (TRM+273)^4] + f_{clo} h_c (t_{clo} - t_a) \end{aligned} \quad (10)$$

siendo

$$\begin{aligned} t_{clo} = & 35,7 - 0,0275 (M-W) - 0,155 I_{clo} \{ (M-W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5766 - 7,04 (M-W) - pa] - \\ & - 0,42 [(M-W) - 58,15] - 1,72 \cdot 10^{-5} M (5867 - pa) - 0,0014 M (34 - t_a) \} \end{aligned} \quad (11)$$

si $h_c = 2,38 (t_{clo} - t_a)^{0,25} > 12,1 v_a^{0,5}$, entonces:

$$h_c = 2,38 (t_{clo} - t_a)^{0,25} \quad (12)$$

si $h_c = 2,38 (t_{clo} - t_a)^{0,25} < 12,1 v_a^{0,5}$, entonces:

$$h_c = 12,1 v_a^{0,5} \quad (13)$$

La ecuación del confort establece las anteriores relaciones entre la actividad, las características del vestido y las cuatro variables del ambiente (temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire y humedad) que darán lugar a la sensación de confort térmico.

Diferencias individuales

Como hemos visto, la ecuación de confort no garantiza el bienestar de todas las personas presentes en una situación laboral. Lo que proporciona es una combinación de valores para las variables de confort térmico bajo las cuales obtendremos la sensación de confort para el mayor porcentaje de personas.

Experimentos realizados por Fanger con una población de 1300 sujetos demuestran que el mejor resultado posible comporta la insatisfacción del 5% del grupo. Cualquier desviación sobre los valores dados por la ecuación del confort lleva necesariamente a un aumento del porcentaje de personas insatisfechas (PPI).

Criterios de valoración del confort térmico

La valoración del confort térmico reviste cada día mayor relevancia; cada vez es más importante el porcentaje de operarios que desarrollan su actividad en el sector de oficinas, hospitales, tiendas, etc... en los cuales las agresiones térmicas sólo se dan de forma excepcional. En estas actividades, en cambio, son frecuentes los problemas asociados a la falta de confort térmico, por lo que es necesario disponer de un criterio de valoración para este tipo de situaciones.

El método más elaborado de los hasta ahora desarrollados es el de Fanger, que supuso un avance sustancial en la valoración del confort térmico, pues incluye todas las variables que influyen en los intercambios térmicos persona-ambiente: nivel de actividad, características del vestido, temperatura seca o del aire, humedad relativa, temperatura radiante media y velocidad del aire.

Recomendaciones para el confort térmico en trabajos sedentarios

A continuación aparecen enumeradas las variables básicas y los intervalos de confianza que le atribuyen distintos autores y organizaciones, así como un somero comentario sobre las divergencias encontradas entre las diferentes fuentes consultadas.

Temperatura del aire

La Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo fija los siguientes valores según la intensidad del trabajo:

Suministro de aire o Renovación total del aire	> 50 m ³ /hora/trabajador > 6 veces/hora (trabajos sedentarios) > 10 veces/hora (trabajos con esfuerzo físico)
Velocidad del aire	> 15 m/min (0,25 m/s) (temperatura normal) > 45 m/min (0,75 m/s) (ambiente caluroso)
Temperatura	17 a 22 °C (trabajos sedentarios) 15 a 18 °C (trabajos ordinarios) 12 a 15 °C (trabajos con acusado esfuerzo físico)
Humedad relativa	40 - 60 % > 50 % (si se puede generar electricidad estática)

Fig. 4.1 Resumen de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo

Los valores de estos intervalos están por debajo de las recomendaciones dadas por las curvas de confort de Fanger; además, no se diferencia entre la temperatura óptima de invierno y la de verano.

Es muy importante, en la prevención del bienestar térmico en países cuya latitud genera estaciones marcadas, indicar dos intervalos de temperatura de confort –uno para invierno y otro para verano– y controlar la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del edificio.

El intervalo de temperatura confortable propuesto por la Eastman Kodak Company (1983) es el comprendido entre 19 y 26 °C. Asimismo, la diferencia de temperatura tolerable entre pies y cabeza sin provocar malestar es de unos 3 °C. Mientras que Grandjean (1985) establece unos márgenes entre 20 y 24 °C, y una HR entre 30 y 60 %.

<i>Estación</i>	<i>Temp. mínima</i>	<i>Temp. máxima</i>
Invierno	19 °C	20 °C
Verano	21 °C	26 °C

Fig. 4.2 Intervalo óptimo de temperaturas en actividades sedentarias (EASTMAN KODAK COMPANY)

<i>Estación</i>	<i>Temp. mínima</i>	<i>Temp. máxima</i>	<i>HR</i>	<i>v_{ar}</i>
Invierno	20 °C	21 °C	> 30 %	< 0,2 m/s
Verano	20 °C	24 °C	40-60 %	0,2 m/s

Fig. 4.3 Intervalo óptimo de temperaturas en actividades sedentarias (Grandjean)

Fuentes de calor radiante

En caso de existir fuentes de calor radiante inevitables, o imprescindibles para calentarse en invierno, el flujo radiante debe ser uniforme en todas direcciones, y no ser excesivo sobre la cabeza.

Para amortiguar las fuentes de calor radiante de un foco externo, se recomienda el uso de material aislante en la construcción de paredes y techos, aislar con corcho o madera las áreas de alrededor de las ventanas y el uso de alfombras y cortinas.

En caso de fuentes radiantes interiores se pueden utilizar pantallas y ropas especiales.

Los aportes térmicos debidos a la iluminación artificial, constituyen una de las fuentes de calor más importantes ya que, por ejemplo, en la iluminación por incandescencia el 75% de la energía se disipa por radiación infrarroja, y en la fluorescencia más del 30%.

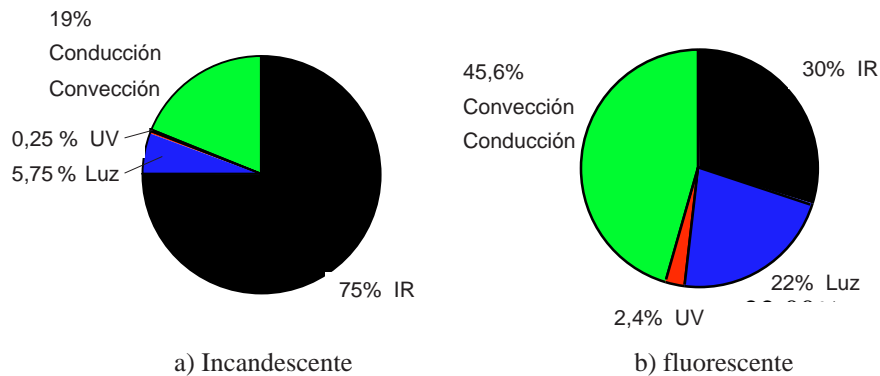


Fig. 4.4 Consumo de lámparas a) incandescentes (100 W), b) fluorescente (80 W daylight) según Henderson & Marsden

Humedad relativa

La humedad nos indica la cantidad de vapor de agua existente en el aire. El aire, al calentarse, es capaz de absorber mayor cantidad de agua en forma de vapor.

La humedad relativa es la relación, expresada en tanto por ciento, entre la presión parcial del vapor de agua en el aire y la presión de saturación del vapor de agua a una temperatura dada.

$$HR = (p_a/p_{s,t_a}) \times 100 \quad (14)$$

siendo:

p_a : presión parcial de vapor de agua en el aire

p_{s,t_a} : presión de vapor de agua saturado a la temperatura t_a

Este valor p_{s,t_a} es la máxima presión parcial de vapor de agua posible a la temperatura t_a .

$$p_{s,t_a} = 0,615 \exp [17,27 \cdot t_a / (t_a + 273)] \quad (15)$$

La humedad relativa debe estar, según la mayoría de los autores, entre el 40 y el 60 %, ya que si sobrepasamos el 70% crearemos ambientes bochornosos (clima invernadero), mientras que humedades inferiores al 30% pueden provocar problemas de alteraciones en vías mucosas y respiratorias.

$g H_2O/m^3 \text{aire}$	Temperatura °C
4,8	0
6,4	4
8,2	8
10,7	12
13,6	16
17,3	20
21,8	24
27,2	28
33,8	32

Fig. 4.5 Cantidad máxima de vapor de agua por m^3 de aire, en función de la temperatura

Velocidad del aire

La velocidad del aire influye en la sensación subjetiva de confort y desconfort, ya que una mayor velocidad de aire fresco permite incrementar la pérdida de calor por convección y evaporación, y si la temperatura del aire está por encima de la temperatura de la piel habrá ganancia de calor por convección.

Para trabajos sedentarios se recomiendan valores entre 0,15 y 0,25 m/s ya que las velocidades menores de 0,1 m/s producen sensación de molestia por estabilidad aérea, y las superiores a 0,5 m/s empiezan a ser perceptibles y desagradables para las personas que realizan estas tareas.

De todas formas la norma ISO 7726, que fija la precisión de la medida de la velocidad del aire en el 5%, establece una gama de confort entre 0,05 y 1 m/s.

Curvas de confort

Las curvas de confort muestran las condiciones de temperatura y humedad más adecuadas para el trabajo.

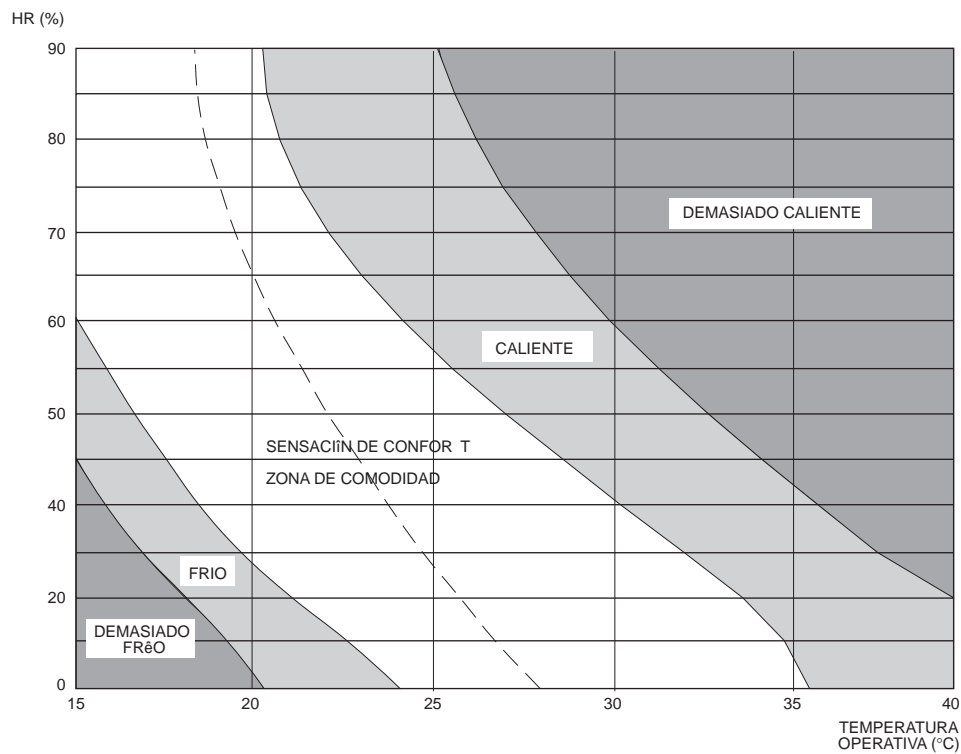


Fig. 4.6 Curvas de confort (P.O. Fanger)

Índice de valoración medio (IVM) y porcentaje de personas insatisfechas (PPI)

De los métodos existentes para la valoración del confort térmico, uno de los más completos, prácticos y operativos es el de Fanger, que aparece en su libro *Thermal Comfort* (1973). Este método ha sido recogido por la norma ISO 7730 y consigue integrar todos los factores que determinan el confort térmico ofreciendo el porcentaje de personas insatisfechas (PPI) con las condiciones del ambiente térmico en que se desarrolla la actividad.

El índice se basa en la valoración subjetiva obtenida por experimentación de un grupo de 1300 personas. Por ello se introduce la valoración del grado de disconfort, mediante un índice (P.O. Fanger *Thermal Comfort*, 1973) que valora el ambiente térmico según la siguiente escala:

+ 3	muy caluroso
+ 2	caluroso
+ 1	ligeramente caluroso
0	confort (neutro)
- 1	ligeramente frío
- 2	frío
- 3	muy frío

Los parámetros que analiza Fanger son: el nivel de actividad, las características de la ropa, la temperatura seca, la temperatura radiante media, la humedad relativa y la velocidad del aire.

El IVM que manifiesta un colectivo, puede hallarse mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{IVM} = & (0,303 e^{-0,036M} + 0,028) \{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99 (M - W) - pa] - \\ & - 0,42 [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - pa) - 0,0014 M (34 - t_a) - \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{\text{clo}} [(t_{\text{clo}} + 273)^4 - (\text{TRM} + 273)^4] - f_{\text{clo}} h_c (t_{\text{clo}} - t_a) \} \end{aligned} \quad (16)$$

donde

$$\begin{aligned} t_{\text{clo}} = & 35,7 - 0,028 (M - W) - \\ & - 0,155 I_{\text{clo}} [3,96 \cdot 10^{-8} f_{\text{clo}} \{ (t_{\text{clo}} + 273)^4 - (\text{TRM} + 273)^4 \} + f_{\text{clo}} h_c (t_{\text{clo}} - t_a)] \end{aligned} \quad (17)$$

$$h_c = 2,38 (t_{\text{clo}} - t_a)^{0,25} \quad \text{para } 2,38 (t_{\text{clo}} - t_a)^{0,25} > 12,1 v_a^{0,5} \quad (18)$$

$$h_c = 12,1 v_a^{0,5} \quad \text{para } 2,38 (t_{\text{clo}} - t_a)^{0,25} < 12,1 v_a^{0,5} \quad (19)$$

$$f_{\text{clo}} = 1,00 + 0,2 I_{\text{clo}} \quad \text{para } I_{\text{clo}} < 0,5 \text{ clo} \quad (20)$$

$$f_{\text{clo}} = 1,05 + 0,1 I_{\text{clo}} \quad \text{para } I_{\text{clo}} > 0,5 \text{ clo} \quad (21)$$

siendo

IVM: índice de valoración medio

M: metabolismo, (W/m^2)

W: trabajo externo, nulo para la mayoría de los casos, (W/m^2)

I_{clo} : resistencia térmica del vestido, (clo)

f_{clo} : relación entre el área del cuerpo vestido y el área del cuerpo desnudo

t_a : temperatura del aire, ($^{\circ}C$)

TRM: temperatura radiante media, ($^{\circ}C$)

- v_a : velocidad relativa del aire, (m/s)
 p_a : presión parcial del vapor de agua, (Pa)
 h_c : coeficiente de convección, [W/(m²K)]
 t_{clo} : temperatura de la superficie del vestido, (°C)

Aparte de la expresión anterior, el valor de IVM puede hallarse de forma mucho más sencilla mediante las tablas de las figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14 conociendo el nivel de actividad, el tipo de vestido, la temperatura del aire, y la velocidad del aire, para las cuales se considera que la humedad relativa es del 50%, y que la temperatura radiante media y la temperatura seca son iguales.

Nivel de actividad: 58 W/m² (1 met)

Vestido		Temperatura seca °C	Velocidad relativa (m/s)									
clo	m ² °C/W		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50	
0	0	26	-1,62	-1,62	-1,96	-2,34						
		27	-1	-1	-1,36	-1,69						
		28	-0,39	-0,42	-0,76	-1,05						
		29	0,21	0,13	-0,15	-0,39						
		30	0,8	0,68	0,45	0,26						
		31	1,39	1,25	1,08	0,94						
		32	1,96	1,83	1,71	1,61						
0,25	0,039	33	2,5	2,41	2,34	2,29						
		24	-1,52	-1,52	-1,8	-2,06	-2,47					
		25	-1,05	-1,05	-1,33	-1,57	-1,94	-2,24	-2,48			
		26	-0,58	-0,61	-0,87	-1,08	-1,41	-1,67	-1,89	-2,66		
		27	-0,12	-0,17	-0,4	-0,58	-0,87	-1,1	-1,29	-1,97	-2,41	
		28	0,34	0,27	0,07	-0,09	-0,34	-0,53	-0,7	-1,28	-1,66	
		29	0,8	0,71	0,54	0,41	0,2	0,04	-0,1	-0,58	-0,9	
0,50	0,078	30	1,25	1,15	1,02	0,91	0,74	0,61	0,5	0,11	-0,14	
		31	1,71	1,61	1,51	1,43	1,3	1,2	1,12	0,83	0,63	
		23	-1,1	-1,1	-1,33	-1,51	-1,78	-1,99	-2,16			
		24	-0,72	-0,74	-0,95	-1,11	-1,36	-1,55	-1,7	-2,22		
		25	-0,34	-0,38	-0,56	-0,71	-0,94	-1,11	-1,25	-1,71	-1,99	
		26	0,04	-0,01	-0,18	-0,31	-0,51	-0,66	-0,79	-1,19	-1,44	
		27	0,42	0,35	0,2	0,09	-0,08	-0,22	-0,33	-0,68	-0,9	
0,75	0,116	28	0,8	0,72	0,59	0,49	0,34	0,23	0,14	-0,17	-0,36	
		29	1,17	1,08	0,98	0,9	0,77	0,68	0,6	0,34	0,19	
		30	1,54	1,45	1,37	1,3	1,2	1,13	1,06	0,86	0,73	
		21	-1,11	-1,11	-1,3	-1,44	-1,66	-1,82	-1,95	-2,36	-2,6	
		22	-0,79	-0,81	-0,98	-1,11	-1,31	-1,46	-1,58	-1,95	-2,17	
		23	-0,47	-0,5	-0,66	-0,78	-0,96	-1,09	-1,2	-1,55	-1,75	
		24	-0,15	-0,19	-0,33	-0,44	-0,61	-0,73	-0,83	-1,14	-1,33	
1,00	0,155	25	0,17	0,12	-0,01	-0,11	-0,26	-0,37	-0,46	-0,74	-0,9	
		26	0,49	0,43	0,31	0,23	0,09	0	-0,08	-0,33	-0,48	
		27	0,81	0,74	0,64	0,56	0,45	0,36	0,29	0,08	-0,05	
		28	1,12	1,05	0,96	0,9	0,8	0,73	0,67	0,48	0,37	
		20	-0,85	-0,87	-1,02	-1,13	-1,29	-1,41	-1,51	-1,81	-1,98	
		21	-0,57	-0,6	-0,74	-0,84	-0,99	-1,11	-1,19	-1,47	-1,63	
		22	-0,3	-0,33	-0,46	-0,55	-0,69	-0,8	-0,88	-1,13	-1,28	
1,25	0,194	23	0,02	-0,07	-0,18	-0,27	-0,39	-0,49	-0,56	-0,79	-0,93	
		24	0,26	0,2	0,1	0,02	-0,09	-0,18	-0,25	-0,46	-0,58	
		25	0,53	0,48	0,38	0,31	0,21	0,13	0,07	-0,12	-0,23	
		26	0,81	0,75	0,66	0,6	0,51	0,44	0,39	0,22	0,13	
		27	1,08	1,02	0,95	0,89	0,81	0,75	0,71	0,56	0,48	
		16	-1,37	-1,37	-1,51	-1,62	-1,78	-1,89	-1,98	-2,26	-2,41	
		18	-0,89	-0,91	-1,04	-1,14	-1,28	-1,38	-1,46	-1,7	-1,84	
1,50	0,233	20	-0,42	-0,46	-0,57	-0,65	-0,77	-0,86	-0,93	-1,14	-1,26	
		22	0,07	0,02	-0,07	-0,14	-0,25	-0,32	-0,38	-0,56	-0,66	
		24	0,56	0,5	0,43	0,37	0,28	0,22	0,17	0,02	-0,06	
		26	1,04	0,99	0,93	0,88	0,81	0,76	0,72	0,61	0,54	
		28	1,53	1,48	1,43	1,4	1,34	1,31	1,28	1,19	1,14	
		30	2,01	1,97	1,93	1,91	1,88	1,85	1,83	1,77	1,74	
		14	-1,36	-1,36	-1,49	-1,58	-1,72	-1,82	-1,89	-2,12	-2,25	
16	-0,94	-0,95	-1,07	-1,15	-1,27	-1,36	-1,43	-1,63	-1,75			
18	-0,52	-0,54	-0,64	-0,72	-0,82	-0,9	-0,96	-1,14	-1,24			
20	-0,09	-0,13	-0,22	-0,28	-0,37	-0,44	-0,49	-0,65	-0,74			
22	0,35	0,3	0,23	0,18	0,1	0,04	0	-0,14	-0,21			
24	0,79	0,74	0,68	0,63	0,57	0,52	0,49	0,37	0,31			
26	1,23	1,18	1,13	1,09	1,04	1,01	0,98	0,89	0,84			
28	1,67	1,62	1,58	1,56	1,52	1,49	1,47	1,4	1,37			

Fig. 4.7 Índice de valoración medio (IVM)

Nivel de actividad: 69,6 W/m² (1,2 met)

Vestido		Temperatura seca °C	Velocidad relativa (m/s)								
clo	m ² °C/W		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50
0	0	25	-1,33	-1,33	-1,59	-1,92					
		26	-0,83	-0,83	-1,11	-1,4					
		27	-0,33	-0,33	-0,63	-0,88					
		28	0,15	0,12	-0,14	-0,36					
		29	0,63	0,56	0,35	0,17					
		30	1,1	1,01	0,84	0,69					
		31	1,57	1,47	1,34	1,24					
		32	2,03	1,93	1,85	1,78					
0,25	0,039	23	-1,18	-1,18	-1,39	-1,61	-1,97	-2,25			
		24	-0,79	-0,79	-1,02	-1,22	-1,54	-1,8	-2,01		
		25	-0,42	-0,42	-0,64	-0,83	-1,11	-1,34	-1,54	-2,21	
		26	-0,04	-0,07	-0,27	-0,43	-0,68	-0,89	-1,06	-1,65	-2,04
		27	0,33	0,29	0,11	-0,03	-0,25	-0,43	-0,58	-1,09	-1,43
		28	0,71	0,64	0,49	0,37	0,18	0,03	-0,1	-0,54	-0,82
		29	1,07	0,99	0,87	0,77	0,61	0,49	0,39	0,02	-0,22
		30	1,43	1,35	1,25	1,17	1,05	0,95	0,87	0,58	0,39
0,50	0,078	18	-2,01	-2,01	-2,17	-2,38	-2,7				
		20	-1,41	-1,41	-1,58	-1,76	-2,04	-2,25	-2,42		
		22	-0,79	-0,79	-0,97	-1,13	-1,36	-1,54	-1,69	-2,17	-2,46
		24	-0,17	-0,2	-0,36	-0,48	-0,68	-0,83	-0,95	-1,35	-1,59
		26	0,44	0,39	0,26	0,16	0,01	-0,11	-0,21	-0,52	-0,71
		28	1,05	0,98	0,88	0,81	0,7	0,61	0,54	0,31	0,16
		30	1,64	1,57	1,51	1,46	1,39	1,33	1,29	1,14	1,04
		32	2,25	2,2	2,17	2,15	2,11	2,09	2,07	1,99	1,95
0,75	0,116	16	-1,77	-1,77	-1,91	-2,07	-2,31	-2,49			
		18	-1,27	-1,27	-1,42	-1,56	-1,77	-1,93	-2,05	-2,45	
		20	-0,77	-0,77	-0,92	-1,04	-1,23	-1,36	-1,47	-1,82	-2,02
		22	-0,25	-0,27	-0,4	-0,51	-0,66	-0,78	-0,87	-1,17	-1,34
		24	0,27	0,23	0,12	0,03	-0,1	-0,19	-0,27	-0,51	-0,65
		26	0,78	0,73	0,64	0,57	0,47	0,4	0,34	0,14	0,03
		28	1,29	1,23	1,17	1,12	1,04	0,99	0,94	0,8	0,72
		30	1,8	1,74	1,7	1,67	1,62	1,58	1,55	1,46	1,41
1,00	0,155	16	-1,18	-1,18	-1,31	-1,43	-1,59	-1,72	-1,82	-2,12	-2,29
		18	-0,75	-0,75	-0,88	-0,98	-1,13	-1,24	-1,33	-1,59	-1,75
		20	-0,32	-0,33	-0,45	-0,54	-0,67	-0,76	-0,83	-1,07	-1,2
		22	0,13	0,1	0	-0,07	-0,18	-0,26	-0,32	-0,52	-0,64
		24	0,58	0,54	0,46	0,4	0,31	0,24	0,19	0,02	-0,07
		26	1,03	0,98	0,91	0,86	0,79	0,74	0,7	0,57	0,5
		28	1,47	1,42	1,37	1,34	1,28	1,24	1,21	1,12	1,06
		30	1,91	1,86	1,83	1,81	1,78	1,75	1,73	1,67	1,63
1,25	0,194	14	-1,12	-1,12	-1,24	-1,34	-1,48	-1,58	-1,66	-1,9	-2,04
		16	-0,74	-0,75	-0,86	-0,95	-1,07	-1,16	-1,23	-1,45	-1,57
		18	-0,36	-0,38	-0,48	-0,55	-0,66	-0,74	-0,81	-1	-1,11
		20	0,02	-0,01	-0,1	-0,16	-0,26	-0,33	-0,38	-0,55	-0,64
		22	0,42	0,38	0,31	0,25	0,17	0,11	0,07	-0,08	-0,16
		24	0,81	0,77	0,71	0,66	0,6	0,55	0,51	0,39	0,33
		26	1,21	1,16	1,11	1,08	1,03	0,99	0,96	0,87	0,82
		28	1,6	1,56	1,52	1,5	1,46	1,43	1,41	1,34	1,3
1,50	0,233	12	-1,09	-1,09	-1,19	-1,27	-1,39	-1,48	-1,55	-1,75	-1,86
		14	-0,75	-0,75	-0,85	-0,93	-1,03	-1,11	-1,17	-1,35	-1,45
		16	-0,41	-0,42	-0,51	-0,58	-0,67	-0,74	-0,79	-0,96	-1,05
		18	-0,06	-0,09	-0,17	-0,22	-0,31	-0,37	-0,42	-0,56	-0,64
		20	0,28	0,25	0,18	0,13	0,05	0	-0,04	-0,16	-0,24
		22	0,63	0,6	0,54	0,5	0,44	0,39	0,36	0,25	0,19
		24	0,99	0,95	0,91	0,87	0,82	0,78	0,76	0,67	0,62
		26	1,35	1,31	1,27	1,24	1,2	1,18	1,15	1,08	1,05

Fig. 4.8 Índice de valoración medio (IVM)

Nivel de actividad: 81,2 W/m² (1,4 met)

Vestido		Temperatura seca °C	Velocidad relativa (m/s)									
clo	m ² °C/W		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50	
0	0	24	-1,14	-1,14	-1,35	-1,65						
		25	-0,72	-0,72	-0,95	-1,21						
		26	-0,3	-0,3	0,54	-0,78						
		27	0,11	0,11	-0,14	-0,34						
		28	0,52	0,48	0,27	0,1						
		29	0,92	0,85	0,69	0,54						
		30	1,31	1,23	1,1	0,99						
0,25	0,039	31	1,71	1,62	1,52	1,45						
		22	-0,95	-0,95	-1,12	-1,33	-1,64	-1,9	-2,11			
		23	-0,63	-0,63	-0,81	-0,99	-1,28	-1,51	-1,71	-2,38		
		24	-0,31	-0,31	-0,5	-0,66	-0,92	-1,13	-1,31	-1,91	-2,31	
		25	0,01	0	-0,18	-0,33	-0,56	-0,75	-0,9	-1,45	-1,8	
		26	0,33	0,3	0,14	0,01	-0,2	-0,36	-0,5	-0,98	-1,29	
		27	0,64	0,59	0,45	0,34	0,16	0,02	-0,1	-0,51	-0,78	
0,50	0,078	28	0,95	0,89	0,77	0,68	0,53	0,41	0,31	-0,04	-0,27	
		29	1,26	1,19	1,09	1,02	0,89	0,8	0,72	0,43	0,24	
		18	-1,36	-1,36	-1,49	-1,66	-1,93	-2,12	-2,29			
		20	-0,85	-0,85	-1	-1,14	-1,37	-1,54	-1,68	-2,15	-2,43	
		22	-0,33	-0,33	-0,48	-0,61	-0,8	-0,95	-1,06	-1,46	-1,7	
		24	0,19	0,17	0,04	-0,07	-0,22	-0,34	-0,44	-0,76	-0,96	
		26	0,71	0,66	0,56	0,48	0,35	0,26	0,18	-0,07	-0,23	
0,75	0,116	28	1,22	1,16	1,09	1,03	0,94	0,87	0,81	0,63	0,51	
		30	1,72	1,66	1,62	1,58	1,52	1,48	1,44	1,33	1,25	
		32	2,23	2,19	2,17	2,16	2,13	2,11	2,1	2,05	2,02	
		16	-1,17	-1,17	-1,29	-1,42	-1,62	-1,77	-1,88	-2,26	-2,48	
		18	-0,75	-0,75	-0,87	-0,99	-1,16	-1,29	-1,39	-1,72	-1,92	
		20	-0,33	-0,33	-0,45	-0,55	-0,7	-0,82	-0,91	-1,19	-1,36	
		22	0,11	0,09	-0,02	-0,1	-0,23	-0,32	-0,4	-0,64	-0,78	
1,00	0,155	24	0,55	0,51	0,42	0,35	0,25	0,17	0,11	-0,09	-0,2	
		26	0,98	0,94	0,87	0,81	0,73	0,67	0,62	0,47	0,37	
		28	1,41	1,36	1,31	1,27	1,21	1,17	1,13	1,02	0,95	
		30	1,84	1,79	1,76	1,73	1,7	1,67	1,65	1,58	1,53	
		14	-1,05	-1,05	-1,16	-1,26	-1,42	-1,53	-1,62	-1,91	-2,07	
		16	-0,69	-0,69	-0,8	-0,89	-1,03	-1,13	-1,21	-1,46	-1,61	
		18	-0,32	-0,32	-0,43	-0,52	-0,64	-0,73	-0,8	-1,02	-1,15	
1,25	0,194	20	0,04	0,03	-0,07	-0,14	-0,25	-0,32	-0,38	-0,58	-0,69	
		22	0,42	0,39	0,31	0,25	0,16	0,1	0,05	-0,12	-0,21	
		24	0,8	0,76	0,7	0,65	0,57	0,52	0,48	0,35	0,27	
		26	1,18	1,13	1,08	1,04	0,99	0,95	0,91	0,81	0,75	
		28	1,55	1,51	1,47	1,44	1,4	1,37	1,35	1,27	1,23	
		12	-0,97	-0,97	-1,06	-1,15	-1,28	-1,37	-1,45	-1,67	-1,8	
		14	-0,65	-0,65	-0,75	-0,82	-0,94	-1,02	-1,09	-1,29	-1,4	
1,50	0,233	16	-0,33	-0,33	-0,43	-0,5	-0,6	-0,67	-0,73	-0,91	-1,01	
		18	-0,01	-0,02	-0,1	-0,17	-0,26	-0,32	-0,37	-0,53	-0,52	
		20	0,32	0,29	0,22	0,17	0,09	0,03	-0,01	-0,15	-0,22	
		22	0,65	0,62	0,56	0,52	0,45	0,4	0,36	0,25	0,18	
		24	0,99	0,95	0,9	0,87	0,81	0,77	0,74	0,65	0,59	
		26	1,32	1,28	1,25	1,22	1,18	1,14	1,12	1,05	1	
		10	-0,91	-0,91	-1	-1,08	-1,18	-1,26	-1,32	-1,51	-1,61	
		12	-0,63	-0,63	-0,71	-0,78	-0,88	-0,95	-1,01	-1,17	-1,27	
		14	-0,34	-0,34	-0,43	-0,49	-0,58	-0,64	-0,69	-0,84	-0,92	
		16	-0,05	-0,06	-0,14	-0,19	-0,27	-0,33	-0,37	-0,5	-0,58	
		18	0,24	0,22	0,15	0,11	0,04	0,01	-0,05	-0,17	-0,23	
		20	0,53	0,5	0,45	0,4	0,34	0,3	0,27	0,17	0,11	
		22	0,83	0,8	0,75	0,72	0,67	0,63	0,6	0,52	0,47	
		24	1,13	1,1	1,06	1,03	0,99	0,96	0,94	0,87	0,83	

Fig. 4.9 Índice de valoración medio (IVM)

Nivel de actividad: 92,8 W/m² (1,6 met)

Vestido		Temperatura seca °C	Velocidad relativa (m/s)								
clo	m ² °C/W		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50
0	0	23	-1,12	-1,12	-1,29	-1,57					
		24	-0,74	-0,74	-0,93	-1,18					
		25	-0,36	-0,36	-0,57	-0,79					
		26	0,01	0,01	-0,2	-0,4					
		27	0,38	0,37	0,17	0					
		28	0,75	0,7	0,53	0,39					
		29	1,11	1,04	0,9	0,79					
		30	1,46	1,38	1,27	1,19					
0,25	0,039	16	-2,29	-2,29	-2,36	-2,62					
		18	-1,72	-1,72	-1,83	-2,06	-2,42				
		20	-1,15	-1,15	-1,29	-1,49	-1,8	-2,05	-2,26		
		22	-0,58	-0,58	-0,73	-0,9	-1,17	-1,38	-1,55	-2,17	-2,58
		24	-0,01	-0,01	-0,17	-0,31	-0,53	-0,7	-0,84	-1,35	-1,68
		26	0,56	0,53	0,39	0,29	0,12	-0,02	-0,13	-0,52	-0,78
		28	1,12	1,06	0,96	0,89	0,77	0,67	0,59	0,31	0,12
		30	1,66	1,6	1,54	1,49	1,42	1,36	1,31	1,14	1,02
0,50	0,078	14	-1,85	-1,85	-1,94	-2,12	-2,4				
		16	-1,4	-1,4	-1,5	-1,67	-1,92	-2,11	-2,26		
		18	-0,95	-0,95	-1,07	-1,21	-1,43	-1,59	-1,73	-2,18	-2,46
		20	-0,49	-0,49	-0,62	-0,75	-0,94	-1,08	-1,2	-1,59	-1,82
		22	-0,03	-0,03	-0,16	-0,27	-0,43	-0,55	-0,65	-0,98	-1,18
		24	0,43	0,41	0,3	0,21	0,08	-0,02	-0,1	-0,37	-0,53
		26	0,89	0,85	0,76	0,7	0,6	0,52	0,46	0,25	0,12
		28	1,34	1,29	1,23	1,18	1,11	1,06	1,01	0,86	0,77
0,75	0,116	14	-1,16	-1,16	-1,26	-1,38	-1,57	-1,71	-1,82	-2,17	-2,38
		16	-0,79	-0,79	-0,89	-1	-1,17	-1,29	-1,39	-1,7	-1,88
		18	-0,41	-0,41	-0,52	-0,62	-0,76	-0,87	-0,96	-1,23	-1,39
		20	-0,04	-0,04	-0,15	-0,23	-0,36	-0,45	-0,52	-0,76	-0,9
		22	0,35	0,33	0,24	0,17	0,07	-0,01	-0,07	-0,27	-0,39
		24	0,74	0,71	0,63	0,58	0,49	0,43	0,38	0,21	0,12
		26	1,12	1,08	1,03	0,98	0,92	0,87	0,83	0,7	0,62
		28	1,51	1,46	1,42	1,39	1,34	1,31	1,28	1,19	1,14
1,00	0,155	12	-1,01	-1,01	-1,1	-1,19	-1,34	-1,45	-1,53	-1,79	-1,94
		14	0,68	-0,68	-0,78	-0,87	-1	-1,09	-1,17	-1,4	-1,54
		16	0,36	-0,36	-0,46	-0,53	-0,65	-0,74	-0,8	-1,01	-1,13
		18	0,04	-0,04	-0,13	-0,2	-0,3	-0,38	-0,44	-0,62	-0,73
		20	0,28	0,27	0,19	0,13	0,04	-0,02	-0,07	-0,23	-0,32
		22	0,62	0,59	0,53	0,48	0,41	0,35	0,31	0,17	0,1
		24	0,96	0,92	0,87	0,83	0,77	0,73	0,69	0,58	0,52
		26	1,29	1,25	1,21	1,18	1,14	1,1	1,07	0,99	0,94
1,25	0,194	10	-0,9	-0,9	-0,98	-1,06	-1,18	-1,27	-1,33	-1,54	-1,66
		12	-0,62	-0,62	-0,7	-0,77	-0,88	-0,96	-1,02	-1,21	-1,31
		14	-0,33	-0,33	-0,42	-0,48	-0,58	-0,65	-0,7	-0,87	-0,97
		16	-0,05	-0,05	-0,13	-0,19	-0,28	-0,34	-0,39	-0,54	-0,62
		18	0,24	0,22	0,15	0,1	0,03	-0,03	-0,07	-0,2	-0,28
		20	0,52	0,5	0,44	0,4	0,33	0,29	0,25	0,14	0,07
		22	0,82	0,79	0,74	0,71	0,65	0,61	0,58	0,49	0,43
		24	1,12	1,09	1,05	1,02	0,97	0,94	0,92	0,84	0,79
1,50	0,233	8	-0,82	-0,82	-0,89	-0,96	-1,06	-1,13	-1,19	-1,36	-1,45
		10	-0,57	-0,57	-0,65	-0,71	-0,8	-0,86	-0,92	-1,07	-1,16
		12	-0,32	-0,32	-0,39	-0,45	-0,53	-0,59	-0,64	-0,78	-0,85
		14	-0,06	-0,07	-0,14	-0,19	-0,26	-0,31	-0,36	-0,48	-0,55
		16	0,19	0,18	0,12	0,07	0,01	-0,04	-0,07	-0,19	-0,25
		18	0,45	0,43	0,38	0,34	0,28	0,24	0,21	0,11	0,05
		20	0,71	0,68	0,64	0,6	0,55	0,52	0,49	0,41	0,36
		22	0,97	0,95	0,91	0,88	0,84	0,81	0,79	0,72	0,68

Fig. 4.10 Índice de valoración medio (IVM)

Nivel de actividad: 104,4 W/m² (1,8 met)

Vestido		Temperatura seca °C	Velocidad relativa (m/s)								
clo	m ² °C/W		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50
0	0	22	-1,05	-1,05	-1,19	-1,46					
		23	-0,7	-0,7	-0,86	-1,11					
		24	-0,36	-0,36	-0,53	-0,75					
		25	-0,01	-0,01	-0,2	-0,4					
		26	0,32	0,32	0,13	-0,04					
		27	0,66	0,63	0,46	0,32					
		28	0,99	0,94	0,8	0,68					
29	1,31	1,25	1,13	1,04							
0,25	0,039	16	-1,79	-1,79	-1,86	-2,09	-2,46				
		18	-1,28	-1,28	-1,38	-1,58	-1,9	-2,16	-2,37		
		20	-0,76	-0,76	-0,89	-1,06	-1,34	-1,56	-1,75	-2,39	-2,89
		22	-0,24	-0,24	-0,38	-0,53	-0,76	-0,95	-1,1	-1,65	-2,01
		24	0,28	0,28	0,13	0,01	-0,18	-0,33	-0,46	-0,9	-1,19
		26	0,79	0,76	0,64	0,55	0,4	0,29	0,19	-0,15	-0,38
		28	1,29	1,24	1,16	1,1	0,99	0,91	0,84	0,6	0,44
30	1,79	1,73	1,68	1,65	1,59	1,54	1,5	1,36	1,27		
0,50	0,078	14	-1,42	-1,42	-1,5	-1,66	-1,91	-2,1	-2,25		
		16	-1,01	-1,01	-1,1	-1,25	-1,47	-1,64	-1,77	-2,23	-2,51
		18	-0,59	-0,59	-0,7	-0,83	-1,02	-1,17	-1,29	-1,69	-1,94
		20	-0,18	-0,18	-0,3	-0,41	-0,58	-0,71	-0,81	-1,15	-1,36
		22	0,24	0,23	0,12	0,02	-0,12	-0,22	-0,31	-0,6	-0,78
		24	0,66	0,63	0,54	0,46	0,35	0,26	0,19	-0,04	-0,19
		26	1,07	1,03	0,96	0,9	0,82	0,75	0,69	0,51	0,4
28	1,48	1,44	1,39	1,35	1,29	1,24	1,2	1,07	1		
0,75	0,116	12	-1,15	-1,15	-1,23	-1,35	-1,53	-1,67	-1,78	-2,13	-2,33
		14	-0,81	-0,81	-0,89	-1	-1,17	-1,29	-1,39	-1,7	-1,89
		16	-0,46	-0,46	-0,56	-0,66	-0,8	-0,91	-1	-1,28	-1,44
		18	-0,12	-0,12	-0,22	-0,31	-0,43	-0,53	-0,61	-0,85	-0,99
		20	0,22	0,21	0,12	0,04	-0,07	-0,15	-0,21	-0,42	-0,55
		22	0,57	0,55	0,47	0,41	0,32	0,25	0,2	0,02	-0,09
		24	0,92	0,89	0,83	0,78	0,71	0,65	0,6	0,46	0,38
26	1,28	1,24	1,19	1,15	1,09	1,05	1,02	0,91	0,84		
1,00	0,155	10	-0,97	-0,97	-1,04	-1,14	-1,28	-1,39	-1,47	-1,73	-1,88
		12	-0,68	-0,68	-0,76	-0,84	-0,97	-1,07	-1,14	-1,38	-1,51
		14	-0,38	-0,38	-0,46	-0,54	-0,66	-0,74	-0,81	-1,02	-1,14
		16	-0,09	-0,09	-0,17	-0,24	-0,35	-0,42	-0,48	-0,67	-0,78
		18	0,21	0,2	0,12	0,06	-0,03	-0,1	-0,15	-0,31	-0,41
		20	0,5	0,48	0,42	0,36	0,29	0,23	0,18	0,04	-0,04
		22	0,81	0,78	0,73	0,68	0,62	0,57	0,53	0,41	0,35
24	1,11	1,08	1,04	1	0,95	0,91	0,88	0,78	0,73		
1,25	0,194	8	-0,84	-0,84	-0,91	-0,99	-1,1	-1,19	-1,25	-1,46	-1,57
		10	-0,59	-0,59	-0,66	-0,73	-0,84	-0,91	-0,97	-1,16	-1,26
		12	-0,33	-0,33	-0,4	-0,47	-0,56	-0,63	-0,69	-0,86	-0,95
		14	-0,07	-0,07	-0,14	-0,2	-0,29	-0,35	-0,4	-0,55	-0,63
		16	0,19	0,18	0,12	0,06	-0,01	-0,07	-0,11	-0,24	0,32
		18	0,45	0,44	0,38	0,33	0,26	0,22	0,18	0,06	0
		20	0,71	0,69	0,64	0,6	0,54	0,5	0,47	0,37	0,31
22	0,98	0,96	0,91	0,88	0,83	0,8	0,77	0,69	0,64		
1,50	0,233	2	-1,63	-1,63	-1,68	-1,77	-1,9	-2	-2,07	-2,29	-2,41
		2	-1,19	-1,19	-1,25	-1,33	-1,44	-1,52	-1,58	-1,78	-1,88
		6	-0,74	-0,74	-0,8	-0,87	-0,97	-1,04	-1,09	-1,26	-1,35
		10	-0,29	-0,29	-0,36	-0,42	-0,5	-0,56	-0,6	-0,74	-0,82
		14	0,17	0,17	0,11	0,06	-0,01	-0,05	-0,09	-0,2	-0,26
		18	0,64	0,62	0,57	0,54	0,49	0,45	0,42	0,34	0,29
		22	1,12	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,95	0,89	0,85
26	1,61	1,58	1,56	1,55	1,52	1,51	1,5	1,46	1,44		

Fig. 4.11 Índice de valoración medio (IVM)

Nivel de actividad: 116 W/m² (2 met)

Vestido		Temperatura seca °C	Velocidad relativa (m/s)								
clo	m ² °C/W		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50
0	0	18	-2	-2,02	-2,35						
		20	-1,35	-1,43	-1,72						
		22	-0,69	-0,82	-1,06						
		24	-0,04	-0,21	-0,41						
		26	0,59	0,41	0,26						
		28	1,16	1,03	0,93						
		30	1,73	1,66	1,6						
		32	2,33	2,32	2,31						
0,25	0,039	16	-1,41	-1,48	-1,69	-2,02	-2,29	-2,51			
		18	-0,93	-1,03	-1,21	-1,5	-1,74	-1,93	-2,61		
		20	-0,45	-0,57	-0,73	-0,98	-1,18	-1,35	-1,93	-2,32	
		22	0,04	-0,09	-0,23	-0,44	-0,61	-0,75	-1,24	-1,56	
		24	0,52	0,38	0,28	0,1	-0,03	-0,14	-0,54	-0,8	
		26	0,97	0,86	0,78	0,65	0,55	0,46	0,16	-0,04	
		28	1,42	1,35	1,29	1,2	1,13	1,07	0,86	0,72	
		30	1,88	1,84	1,81	1,76	1,72	1,68	1,57	1,49	
0,50	0,078	14	-1,08	-1,16	-1,31	-1,53	-1,71	-1,85	-2,32		
		16	-0,69	-0,79	-0,92	-1,12	-1,27	-1,4	-1,82	-2,07	
		18	-0,31	-0,41	-0,53	-0,7	-0,84	-0,95	-1,31	-1,54	
		20	0,07	-0,04	-0,14	-0,29	-0,4	-0,5	-0,81	-1	
		22	0,46	0,35	0,27	0,15	0,05	-0,03	-0,29	-0,45	
		24	0,83	0,75	0,68	0,58	0,5	0,44	0,23	0,1	
		26	1,21	1,15	1,1	1,02	0,96	0,91	0,75	0,65	
		28	1,59	1,55	1,51	1,46	1,42	1,38	1,27	1,21	
0,75	0,116	10	-1,16	-1,23	-1,35	-1,54	-1,67	-1,78	-2,14	-2,34	
		12	-0,84	-0,92	-1,03	-1,2	-1,32	-1,42	-1,74	-1,93	
		14	-0,52	-0,6	-0,7	-0,85	-0,97	-1,06	-1,34	-1,51	
		16	-0,2	-0,29	-0,38	-0,51	-0,61	-0,69	-0,95	-1,1	
		18	0,12	0,03	-0,05	-0,17	-0,26	-0,32	-0,55	-0,68	
		20	0,43	0,34	0,28	0,18	0,1	0,04	-0,15	-0,26	
		22	0,75	0,68	0,62	0,54	0,48	0,43	0,27	0,17	
		24	1,07	1,01	0,97	0,9	0,85	0,81	0,68	0,61	
1,00	0,155	8	-0,95	-1,02	-1,11	-1,26	-1,36	-1,45	-1,71	-1,86	
		10	-0,68	-0,75	-0,84	-0,97	-1,07	-1,15	-1,38	-1,52	
		12	-0,41	-0,48	-0,56	-0,68	-0,77	-0,84	-1,05	-1,18	
		14	-0,13	-0,21	-0,28	-0,39	-0,47	-0,53	-0,72	-0,83	
		16	0,14	0,06	0	-0,1	-0,16	-0,22	-0,39	-0,49	
		18	0,41	0,34	0,28	0,2	0,14	0,09	-0,06	-0,14	
		20	0,68	0,61	0,57	0,5	0,44	0,4	0,28	0,2	
		22	0,96	0,91	0,87	0,81	0,76	0,73	0,62	0,56	
1,25	0,194	2	-1,74	-1,77	-1,88	-2,04	-2,15	-2,24	-2,51	-2,66	
		6	-1,27	-1,32	-1,42	-1,55	-1,65	-1,73	-1,97	-2,1	
		10	-0,8	-0,86	-0,94	-1,06	-1,14	-1,21	-1,41	-1,53	
		14	-0,33	-0,4	-0,47	-0,56	-0,64	-0,69	-0,86	-0,96	
		18	0,15	0,08	0,03	-0,05	-0,11	-0,15	-0,29	-0,37	
		22	0,63	0,57	0,53	0,47	0,42	0,39	0,28	0,22	
		26	1,11	1,08	1,05	1	0,97	0,95	0,87	0,83	
		26	1,62	1,6	1,58	1,55	1,53	1,52	1,47	1,45	
1,50	0,233	4	-1,52	-1,56	-1,65	-1,78	-1,87	-1,95	-2,16	-2,28	
		8	-1,11	-1,16	-1,24	-1,35	-1,44	-1,5	-1,69	-1,79	
		12	-0,69	-0,75	-0,82	-0,92	-0,99	-1,04	-1,2	-1,29	
		16	-0,27	-0,33	-0,39	-0,47	-0,53	-0,58	-0,72	-0,79	
		20	0,15	0,09	0,05	-0,02	-0,07	-0,11	-0,22	-0,29	
		24	0,58	0,53	0,49	0,44	0,4	0,37	0,28	0,23	
		28	1,01	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85	0,79	0,75	
		32	1,47	1,44	1,43	1,4	1,38	1,36	1,32	1,29	

Fig. 4.12 Índice de valoración medio (IVM)

Nivel de actividad: 139,2 W/m² (2,4 met)

Vestido		Temperatura seca °C	Velocidad relativa (m/s)								
clo	m ² °C/W		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50
0	0	16			-1,88	-2,22					
		18			-1,34	-1,63					
		20			-0,79	-1,05					
		22			-0,23	-0,44					
		24			0,34	0,17					
		26			0,91	0,78					
		28			1,49	1,4					
		30			2,07	2,03					
0,25	0,039	14			-1,31	-1,52	-1,85	-2,12	-2,34		
		16			-0,89	-1,08	-0,14	-1,61	-1,81	-2,49	
		18			-0,47	-0,63	-0,89	-1,1	-1,27	-1,87	-2,26
		20			-0,05	-0,19	-0,41	-0,58	-0,73	-1,24	-1,58
		22			0,39	0,28	0,09	-0,05	-0,17	-0,6	-0,88
		24			0,84	0,74	0,6	0,48	0,39	0,05	-0,17
		26			1,28	1,22	1,11	1,02	0,95	0,7	0,53
		28			1,73	1,69	1,62	1,56	1,51	1,35	
0,50	0,078	12			-0,97	-1,11	-1,34	-1,51	-1,65	-2,12	-2,4
		14			-0,62	-0,76	-0,96	-1,11	-1,24	-1,65	-1,91
		16			-0,28	-0,4	-0,58	-0,71	-0,82	-1,19	-1,42
		18			0,07	-0,03	-0,19	-0,31	-0,41	-0,73	-0,92
		20			0,42	0,33	0,2	0,1	0,01	-0,26	-0,43
		22			0,78	0,71	0,6	0,52	0,45	0,22	0,08
		24			1,15	1,09	1	0,94	0,88	0,7	0,59
		26			1,52	1,47	1,41	1,36	1,32	1,19	
0,75	0,116	10			-0,71	-0,82	-0,99	-1,11	-1,21	-1,53	-1,71
		12			-0,42	-0,52	-0,67	-0,79	-0,88	-1,16	-1,33
		14			-0,13	-0,22	-0,36	-0,46	-0,54	-0,79	-0,94
		16			0,16	0,08	-0,04	-0,13	-0,2	-0,42	-0,56
		18			0,45	0,38	0,28	0,2	0,14	-0,05	-0,17
		20			0,75	0,69	0,6	0,54	0,49	0,32	0,22
		22			1,06	1,01	0,94	0,88	0,84	0,7	0,62
		24			1,37	1,33	1,27	1,23	1,2	1,09	
1,00	0,155	6			-0,78	-0,87	-1,01	-1,12	-1,2	-1,45	-1,6
		8			-0,54	-0,62	-0,75	-0,85	-0,92	-1,15	-1,29
		10			-0,29	-0,37	-0,49	-0,57	-0,64	-0,86	-0,98
		12			-0,04	-0,11	-0,22	-0,29	-0,36	-0,55	-0,66
		14			0,21	0,15	0,06	-0,01	-0,07	-0,24	-0,34
		16			0,47	0,41	0,33	0,27	0,22	0,07	-0,02
		18			0,73	0,68	0,6	0,55	0,51	0,38	0,3
		20			0,98	0,94	0,88	0,84	0,8	0,69	
1,25	0,194	-4			-1,46	-1,56	-1,72	-1,83	-1,91	-2,17	-2,32
		0			-1,05	-1,14	-1,27	-1,37	-1,44	-1,67	-1,8
		4			-0,62	-0,7	-0,81	-0,9	-0,96	-1,16	-1,27
		8			-0,19	-0,26	-0,35	-0,42	-0,48	-0,64	-0,74
		12			0,25	0,2	0,12	0,06	0,02	-0,12	-0,2
		16			0,7	0,66	0,6	0,55	0,52	0,41	0,35
		20			1,16	1,13	1,08	1,05	1,02	0,94	0,9
		24			1,65	1,63	1,6	1,57	1,56	1,51	
1,50	0,233	-8			-1,44	-1,53	-0,17	-1,76	-1,83	-2,05	-2,17
		-4			-1,07	-1,15	-1,27	-1,35	-1,42	-1,61	-1,72
		0			-0,7	-0,77	-0,87	-0,94	-1	-1,17	-1,27
		4			-0,31	-0,37	-0,46	-0,53	-0,57	-0,72	-0,8
		8			0,07	0,02	-0,05	-0,1	-0,14	-0,27	-0,34
		12			0,47	0,43	0,37	0,33	0,29	0,19	0,14
		16			0,88	0,85	0,8	0,77	0,74	0,66	0,62
		20			1,29	1,27	1,24	1,21	1,19	1,13	

Fig. 4.13 Índice de valoración medio (IVM)

Nivel de actividad: 174 W/m² (3 met)

Vestido		Temperatura seca °C	Velocidad relativa (m/s)									
clo	m ² °C/W		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50	
0	0	14				-1,92	-2,49					
		16				-1,36	-1,87					
		18				-0,8	-1,24					
		20				-0,24	-0,61					
		22				0,34	0,04					
		24				0,93	0,7					
		26				1,52	1,36					
		28				2,12	2,02					
0,25	0,039	12				-1,19	-1,53	-1,8	-2,02			
		14				-0,77	-1,07	-1,31	-1,51	-2,21		
		16				-0,35	-0,61	-0,82	-1	-1,61	-2,02	
		18				0,08	-0,15	-0,33	-0,48	-1,01	-1,36	
		20				0,51	0,32	0,17	0,04	-0,41	-0,71	
		22				0,96	0,8	0,68	0,57	0,21	-0,03	
		24				1,41	1,29	1,19	1,11	0,83	0,64	
		26				1,87	1,78	1,71	1,65	1,45	1,32	
0,50	0,078	10				-0,78	-1	-1,18	-1,32	-1,79	-2,07	
		12				-0,43	-0,64	-0,79	-0,92	-1,34	-1,6	
		14				-0,09	-0,27	-0,41	-0,52	-0,9	-1,13	
		16				0,26	0,1	-0,02	0,12	0,45	0,65	
		18				0,61	0,47	0,37	0,28	0	0,18	
		20				0,96	0,85	0,76	0,68	0,45	0,3	
		22				1,33	1,24	1,16	1,1	0,91	0,79	
		24				1,7	1,63	1,57	1,53	1,38	1,28	
0,75	0,116	6				-0,75	-0,93	-1,07	-1,18	-1,52	-1,72	
		8				-0,47	-0,64	-0,76	-0,86	-1,18	-1,14	
		10				-0,19	-0,34	-0,45	-0,54	-0,83	-1	
		12				0,1	-0,03	-0,14	-0,22	-0,48	-0,63	
		14				0,39	0,27	0,18	0,11	0,12	0,26	
		16				0,69	0,58	0,5	0,44	0,24	0,12	
		18				0,98	0,89	0,82	0,77	0,59	0,49	
		20				1,28	1,2	1,14	1,1	0,95	0,87	
1,00	0,155	6				-1,68	-1,88	-2,03	-2,14	-2,5	-2,7	
		-2				-1,22	-1,39	-1,52	-1,62	-1,94	-2,12	
		2				-0,74	-0,9	-1,01	-1,1	-1,37	-1,53	
		6				-0,26	-0,39	-0,49	-0,56	-0,8	-0,93	
		10				0,22	0,12	0,04	0,02	0,22	-0,33	
		14				0,73	0,64	0,58	0,53	0,38	0,29	
		18				1,24	1,18	1,13	1,09	0,97	0,91	
		22				1,77	1,73	1,69	1,67	1,59	1,54	
1,25	0,194	-8				-1,36	-1,52	-1,64	-1,73	-2	-2,15	
		-4				-0,95	-1,1	-1,2	-1,28	-1,52	-1,65	
		0				-0,54	-0,66	-0,75	-0,82	-1,03	-1,15	
		4				0,12	-0,22	-0,3	-0,36	-0,54	-0,64	
		8				0,31	0,22	0,16	0,11	-0,04	-0,13	
		12				0,75	0,68	0,63	0,59	0,47	0,4	
		16				1,2	1,15	1,11	1,08	0,98	0,93	
		20				1,66	1,62	1,59	1,57	1,5	1,46	
1,50	0,233	-10				1,13	-1,26	-1,35	-1,42	-1,64	-1,76	
		-6				0,76	-0,87	-0,96	-1,02	-1,21	-1,32	
		-2				-0,39	-0,49	-0,56	-0,62	-0,79	-0,88	
		2				-0,01	0,1	-0,16	-0,21	-0,36	-0,44	
		6				0,38	0,3	0,25	0,21	0,08	0,01	
		10				0,76	0,7	0,66	0,62	0,52	0,46	
		14				1,17	1,12	1,09	1,06	0,98	0,93	
		18				1,58	1,54	1,52	1,5	1,44	1,4	

Fig. 4.14 Índice de valoración medio (IVM)

Nivel de actividad

Para obtener el nivel de actividad desarrollado, Fanger establece una clasificación atendiendo al consumo energético:

	Valor mínimo (W/m^2)	Valor máximo (W/m^2)
Nivel sedentario	58	87
Nivel medio	87	145
Nivel alto	145	232

En caso de que la humedad relativa no sea del 50% y/o la temperatura radiante media sea mayor que la temperatura del aire, debemos aplicar los factores de corrección f_h y/o f_r de la siguiente manera.

Corrección del IVM

Cuando no se cumple que la humedad relativa sea del 50% y/o que la (TRM) sea igual a la (t_a) debemos corregir el IVM en función de la siguiente expresión:

$$IVM_{\text{final}} = IVM + f_h (HR - 50) + f_r (TRM - t_a) \quad (22)$$

donde:

t_a : temperatura seca del aire, ($^{\circ}C$)

TRM: temperatura radiante media, ($^{\circ}C$)

HR: humedad relativa, (%)

f_h : factor de corrección de IVM en función de la humedad

f_r : factor de corrección de IVM en función de TRM

Las tablas de las figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, y 4.20, muestran los valores de los factores de corrección f_h y f_r en función del nivel de actividad desarrollado, del vestido y de la velocidad del aire, y calculados a partir de las gráficas de las figuras 4.21 y 4.22; ya sea con un sistema o con el otro, podemos obtener los factores de corrección a implementar en la IVM_{final} para calcular el porcentaje de personas insatisfechos (PPI).

Cálculo de la temperatura radiante media (TRM)

Aún necesitamos hallar otro valor, que es el de la temperatura radiante media (TRM); éste se obtiene a través de las siguientes expresiones, según la velocidad del aire:

Para convección natural ($v_a < 0,15$ m/s):

$$TRM = [(t_g + 273)^4 + (0,25 \cdot 10^8) / \varepsilon (|t_g - t_a|/d)^{0,25} (t_g - t_a)]^{0,25} - 273 \quad (23)$$

Para convección forzada ($v_a > 0,15$ m/s):

$$\text{TRM} = [(t_g + 273)^4 + (1,1 \cdot 10^8 v_a^{0,6}) / (\epsilon d^{0,4}) (t_g - t_a)]^{0,25} - 273 \quad (24)$$

donde:

- t_g : temperatura de globo, (°C)
- v_a : velocidad del aire, (m/s)
- d : diámetro del globo, (m)
- t_a : temperatura del aire, (°C)
- ϵ : coeficiente de emisividad

Al valor resultante de estas situaciones se le denomina IVM índice de valoración medio (*Predicted Mean Vote*) que, llevado a la figura 4.23, nos ofrece el porcentaje de personas insatisfechas PPI para esa situación.

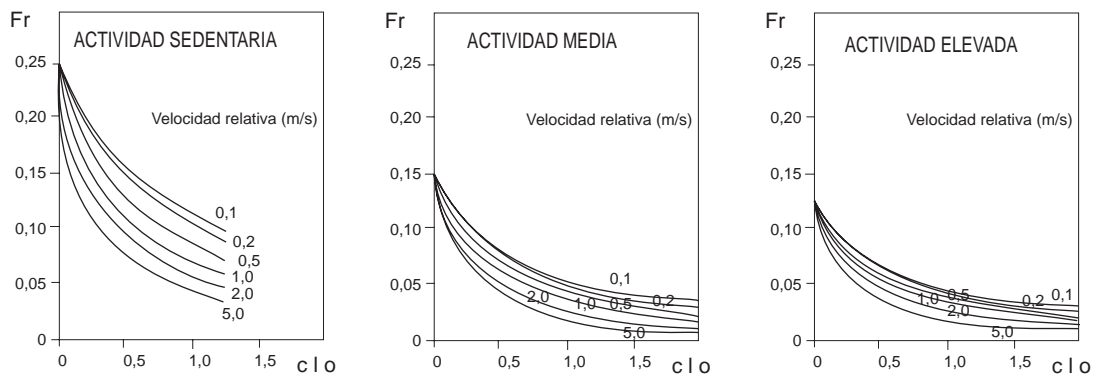


Fig. 4.15 Factor de corrección (f) en función de la temperatura radiante media

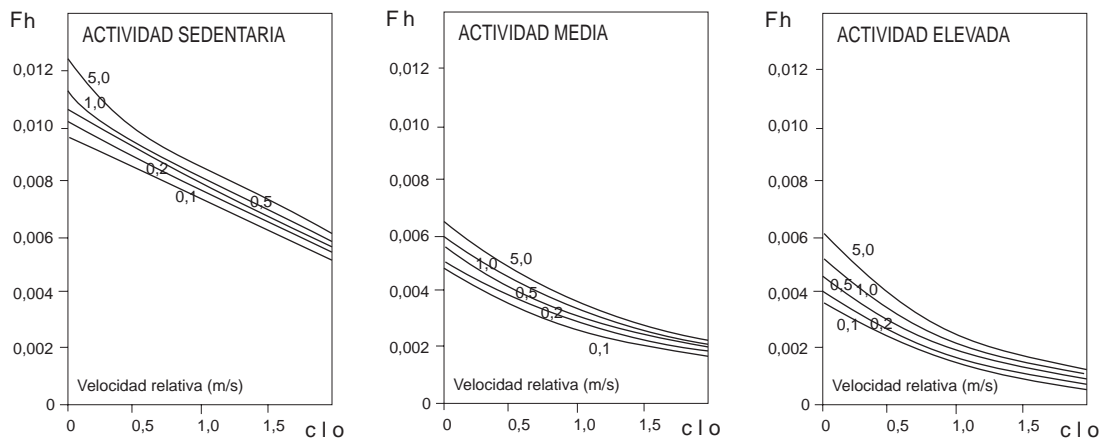


Fig. 4.16 Factor de corrección (F_h) en función de la humedad

V_a (m/s)	0 clo	0,25 clo	0,50 clo	0,75 clo	1,00 clo	1,25 clo	1,50 clo
0,05	0,0103	0,0096	0,0088	0,0082	0,0076	0,0068	0,0062
0,10	0,0103	0,0096	0,0088	0,0082	0,0076	0,0068	0,0062
0,15	0,0104	0,0098	0,0090	0,0084	0,0078	0,0070	0,0066
0,20	0,0108	0,0100	0,0092	0,0084	0,0079	0,0072	0,0067
0,30	0,0110	0,0102	0,0093	0,0086	0,0080	0,0074	0,0068
0,40	0,0112	0,0104	0,0094	0,0088	0,0081	0,0076	0,0069
0,50	0,0114	0,0106	0,0096	0,0090	0,0082	0,0078	0,0070
1,00	0,0120	0,0108	0,0100	0,0093	0,0086	0,0080	0,0072
1,50	0,0130	0,0109	0,0110	0,0094	0,0087	0,0081	0,0073

Fig. 4.17 Factor de corrección f_h del índice de valoración medio, en función de la humedad, para actividades sedentarias (P.O. Fanger)

V_a (m/s)	0 clo	0,25 clo	0,50 clo	0,75 clo	1,00 clo	1,25 clo	1,50 clo
0,05	0,0050	0,0042	0,0038	0,0032	0,0030	0,0024	0,0020
0,10	0,0050	0,0042	0,0038	0,0032	0,0030	0,0024	0,0020
0,15	0,0052	0,0044	0,0040	0,0034	0,0031	0,0024	0,0021
0,20	0,0053	0,0046	0,0042	0,0036	0,0032	0,0025	0,0023
0,30	0,0055	0,0048	0,0043	0,0037	0,0033	0,0026	0,0023
0,40	0,0058	0,0050	0,0043	0,0038	0,0033	0,0027	0,0023
0,50	0,0060	0,0052	0,0044	0,0040	0,0034	0,0028	0,0024
1,00	0,0063	0,0053	0,0046	0,0041	0,0036	0,0032	0,0026
1,50	0,0065	0,0054	0,0047	0,0042	0,0037	0,0032	0,0026

Fig. 4.18 Factor de corrección f_h del índice de valoración medio, en función de la humedad, para actividades medias (P.O. Fanger)

V_a (m/s)	0 clo	0,25 clo	0,50 clo	0,75 clo	1,00 clo	1,25 clo	1,50 clo
0,05	0,0040	0,0032	0,0026	0,0021	0,0018	0,0014	0,0012
0,10	0,0040	0,0032	0,0026	0,0021	0,0018	0,0014	0,0012
0,15	0,0040	0,0033	0,0027	0,0022	0,0018	0,0014	0,0012
0,20	0,0041	0,0034	0,0028	0,0023	0,0018	0,0014	0,0012
0,30	0,0043	0,0036	0,0030	0,0024	0,0019	0,0015	0,0013
0,40	0,0047	0,0037	0,0031	0,0025	0,0019	0,0015	0,0013
0,50	0,0048	0,0039	0,0033	0,0026	0,0020	0,0016	0,0014
1,00	0,0054	0,0044	0,0036	0,0028	0,0024	0,0020	0,0016
1,50	0,0055	0,0045	0,0037	0,0029	0,0025	0,0020	0,0016

Fig. 4.19 Factor de corrección f_h del índice de valoración medio, en función de la humedad, para actividades altas (P.O. Fanger)

V_a (m/s)	0 clo	0,25 clo	0,50 clo	0,75 clo	1,00 clo	1,25 clo	1,50 clo
0,05	0,2600	0,2000	0,1600	0,1320	0,1100	0,1000	0,0900
0,10	0,2600	0,2000	0,1600	0,1320	0,1100	0,1000	0,0900
0,15	0,2600	0,1950	0,1550	0,1300	0,1075	0,0950	0,0850
0,20	0,2600	0,1920	0,1510	0,1200	0,1050	0,0900	0,0800
0,30	0,2600	0,1850	0,1450	0,1150	0,1000	0,0830	0,0730
0,40	0,2600	0,1850	0,1400	0,1100	0,0950	0,0770	0,0670
0,50	0,2600	0,1850	0,1300	0,1050	0,0900	0,0700	0,0600
1,00	0,2600	0,1600	0,1200	0,0900	0,0700	0,0600	0,0500
1,50	0,2600	0,1550	0,1100	0,0800	0,0650	0,0500	0,0480

Fig. 4.20 Factor de corrección f_r del índice de valoración medio, en función de la TRM, para actividades sedentarias (P.O. Fanger)

V_a (m/s)	0 clo	0,25 clo	0,50 clo	0,75 clo	1,00 clo	1,25 clo	1,50 clo
0,05	0,1500	0,1050	0,0850	0,0700	0,0600	0,0500	0,0500
0,10	0,1500	0,1050	0,0850	0,0700	0,0600	0,0500	0,0500
0,15	0,1500	0,1000	0,0800	0,0700	0,0550	0,0450	0,0500
0,20	0,1500	0,1000	0,0800	0,0680	0,0550	0,0450	0,0400
0,30	0,1500	0,0950	0,0800	0,0630	0,0500	0,0430	0,0360
0,40	0,1500	0,0900	0,0750	0,0590	0,0450	0,0400	0,0330
0,50	0,1500	0,0900	0,0750	0,0550	0,0400	0,0380	0,0300
1,00	0,1500	0,0850	0,0650	0,0500	0,0370	0,0300	0,0250
1,50	0,1500	0,0850	0,0600	0,0450	0,0350	0,0280	0,0230

Fig. 4.21 Factor de corrección f_r del índice de valoración medio, en función de la TRM, para actividades medias (P.O. Fanger)

V_a (m/s)	0 clo	0,25 clo	0,50 clo	0,75 clo	1,00 clo	1,25 clo	1,50 clo
0,05	0,1200	0,0900	0,0700	0,0450	0,0350	0,0300	0,0300
0,10	0,1200	0,0900	0,0700	0,0600	0,0450	0,0350	0,0300
0,15	0,1200	0,0900	0,0700	0,0600	0,0450	0,0350	0,0300
0,20	0,1200	0,0900	0,0700	0,0550	0,0400	0,0350	0,0300
0,30	0,1200	0,0860	0,0660	0,0500	0,0380	0,0330	0,0280
0,40	0,1200	0,0830	0,0630	0,0450	0,0360	0,0310	0,0260
0,50	0,1200	0,0800	0,0600	0,0400	0,0350	0,0300	0,0250
1,00	0,1200	0,0750	0,0550	0,0400	0,0300	0,0250	0,0200
1,50	0,1250	0,0750	0,0500	0,0350	0,0250	0,0200	0,0200

Fig. 4.22 Factor de corrección f_r del índice de valoración medio, en función de la TRM, para actividades altas (P.O. Fanger)

Porcentaje de personas insatisfechas (PPI)

Definimos a las personas insatisfechas como aquellas que con las condiciones microclimáticas otorgan una valoración entre [-2, -3] y entre [+2, +3]

Conociendo el IVM_{final} resultante, podemos calcular el porcentaje de personas insatisfechas PPI mediante el gráfico de la figura 4.23.

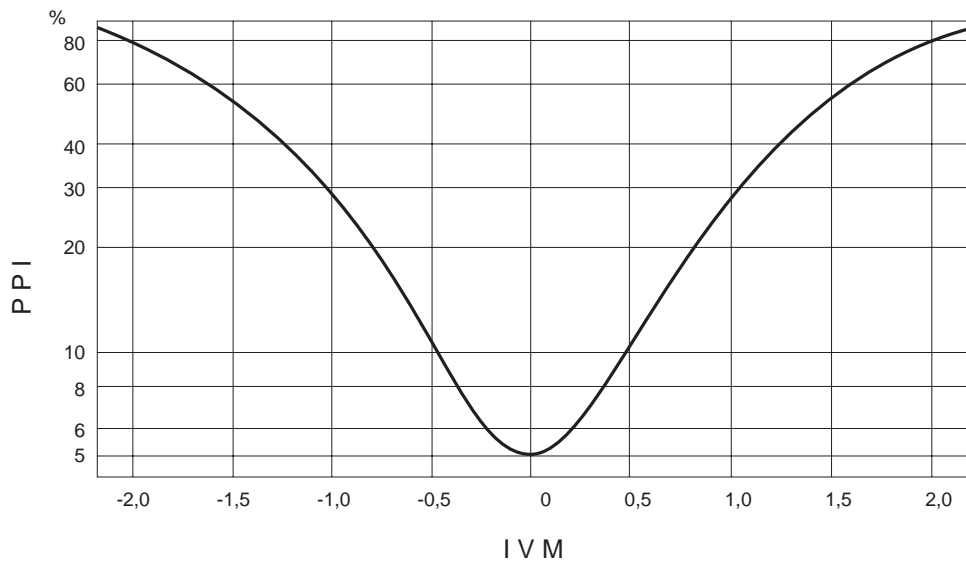


Fig.4.23 Gráfico para el cálculo del porcentaje de personas insatisfechas (PPI)

O también, por la siguiente expresión:

$$PPI = 100 - 95 \exp [-(0,03353 IVM^4 - 0,2179 IVM^2)] \quad (25)$$

Observando el gráfico podemos ver que, incluso cuando la situación del IVM es cero, es decir, para condiciones térmicas óptimas, el grado de insatisfechos será del 5%.

Se recomienda que no se sobrepase el 10% de insatisfechos, o lo que es lo mismo, que no se exceda el valor ($\pm 0,5$). A partir de este valor debemos intervenir en las variables termohigrométricas para ajustar los valores de los parámetros de tal forma que se adecúen a los rangos sugeridos por Fanger para obtener una situación confortable.

Aplicabilidad del método de Fanger

Es recomendable su aplicación para valores de IVM entre ± 2 . Y únicamente cuando los seis parámetros principales se encuentran dentro de los siguientes intervalos, ya que si se sobrepasan se puede dar por hecho que estamos en una situación de disconfort:

Actividad metabólica	[46 - 232]	W/m ²
Aislamiento térmico de la ropa	[0 - 2]	clo
Temperatura del aire	[10 - 30]	°C
Temperatura radiante media	[10 - 40]	°C
Velocidad relativa del aire	[0 - 1]	m/s
Presión parcial del vapor de agua	[0 - 2700]	Pa

Cuando en la aplicación de Fanger (ISO 7730) no se sobrepase el 10% de insatisfechos, o lo que es lo mismo, que los valores estén entre $\pm 0,5$ se considera una situación correcta; a partir de esos valores es conveniente la intervención.

De todas formas, cabe recordar que en trabajos sedentarios las situaciones de bienestar térmico se pueden deteriorar debido a la asimetría de radiación, o a corrientes de aire; por todo ello recordamos a continuación los límites de confort para ese tipo de tareas:

Diferencia máxima de temperatura del aire entre los pies y la cabeza: 3 °C
Velocidad del aire entre: 0,1 - 0,15 m/s en invierno y 0,15 - 0,25m/s en verano
Humedad relativa entre: (40 - 70 %)
Asimetría máxima calor radiante entre paredes verticales: 10 °C
Asimetría máxima calor radiante entre techos y suelo: 5 °C