

Evaluación del estrés térmico. Índice de sudoración requerida

Objetivo

Esta Nota Técnica de Prevención describe un sistema de cálculo e interpretación de los resultados para la valoración del riesgo de estrés térmico, que aporta mayor exactitud que el conocido método del índice WBGT y cuyo campo de aplicación debería extenderse a aquellas situaciones en las que la valoración previa y rápida mediante dicho índice WBGT revelase una situación de probable riesgo de estrés térmico (ver NTP-322.1993).

Asimismo se pretende actualizar la NTP-18.1982, en la que se describía el método de Belding y Hatch, aportando, como sustitutiva de dicho método, una sistemática aceptada internacionalmente y normalizada a través de la ISO/7933.1989, de la que se ha extraído la mayor parte del contenido de este documento

Fundamentos del método

La metodología se basa en la comparación de los valores de dos variables, la humedad de la piel y la producción de sudor necesarias en unas determinadas condiciones de trabajo, frente a los valores fisiológicamente posibles de esas variables. La estimación de dichos valores se obtiene en el desarrollo de las siguientes etapas:

- Determinación de la evaporación requerida (Ereq) para que se mantenga el equilibrio térmico del organismo.
- Determinación de la evaporación máxima permitida (Ereq) por las condiciones ambientales.
- Cálculo de la sudoración requerida (SWreq) y de la humedad requerida de la piel (wreq).

Determinación de las variables

■ Cálculo de la evaporación requerida (Ereq)

La acumulación de calor en el cuerpo humano (S) se puede expresar como la suma algebraica de los siguientes términos:

$$S = M - W - K - C - R - C_{res} - E_{res} - E \quad (1)$$

Donde:

M es la producción de energía metabólica.

W es el trabajo exterior útil.

K es el calor intercambiado con el ambiente por conducción.

C es el calor intercambiado por convección.

R es el calor intercambiado por radiación.

C_{res} es el calor intercambiado por convección respiratoria.

E_{res} es el calor latente intercambiado a través de la respiración.

E es el calor intercambiado por la evaporación del sudor.

Todos los términos de la ecuación (1) están expresados como potencia por unidad de superficie corporal y las unidades que se emplean son normalmente W/m².

Puede despreciarse la pérdida de energía como consecuencia del trabajo útil desarrollado en la actividad laboral, pues el rendimiento real del organismo suele ser pequeño en casi todas las tareas.

En la práctica, el término de conducción de calor (K) tampoco es tenido en cuenta. Debido a lo pequeñas que resultan las superficies de contacto frente a la superficie corporal, al aislamiento que suponen las prendas de vestir y a que, en general, cuando las superficies de contacto están a muy diferente temperatura de la piel, éstas suelen estar aisladas. Por otra parte, la transmisión de calor que se lleva a cabo por conducción puede, en general, estar asumida cuantitativamente por los intercambios de calor por convección y radiación que habría si las superficies no estuvieran en contacto con la piel. Para mantener constante la temperatura del cuerpo, el término S debe ser nulo y entonces el término de evaporación del sudor se denomina evaporación requerida (Ereq).

$$\mathbf{E_{req} = M - C - R - C_{res} - E_{res} \quad (2)}$$

El término M debe hallarse con un método que ofrezca una cierta fiabilidad (ver NTP-323.1993). Los términos de convección C y radiación R se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\mathbf{C = hc \, F_{cl} \, (t_{sk} - t_a) \quad (3)}$$

$$\mathbf{R = s \, e_{sk} \, F_{cl} \, A_r / ADU [(t_{sk} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \dots \quad (4)}$$

Si hacemos en la ecuación:

$$\mathbf{hr = s \, e_{sk} \, A_r / ADU [(t_{sk} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] / (t_{sk} - t_r) \quad (5)}$$

Entonces:

$$\mathbf{R = hr \, F_{cl} \, (t_{sk} - t_r) \quad (6)}$$

De esta forma se obtiene que:

$$\mathbf{E_{req} = M - \{hcF_{cl} (t_{sk} - t_a)\} - \{hr \, F_{cl} (t_{sk} - t_r)\} - C_{res} E_{res} \quad (7)}$$

Donde los significados de los símbolos no definidos hasta ahora son los siguientes:

- **hc** es el coeficiente de intercambio de calor por convección en w/m². Se expresa de la siguiente forma:

Si la convección es natural: $hc = 2,38 (tsk - tr)^{0,25}$

Si es forzada:
 $hc = 3,5 + 5,2 Var$ si Var es menor o igual que 1 m/s.
 $hc = 8,7 Var^{0,6}$ si Var es mayor que 1 m/s.
- Siendo **Var** la velocidad relativa del aire, cuya expresión es:
 $Var = Va + 0,0052 (M - 58)$

Donde Va es la velocidad medida del aire en el lugar de trabajo.
- **Fcl** es el factor adimensional de reducción, de los intercambios de calor sensible debidos al atuendo. Su valor se deduce de la ecuación:

$$Fcl = 1 / [1 / (1 + 1,97 Icl) + (hc + hr)] Icl'$$

donde **Icl** es el aislamiento térmico intrínseco del atuendo. Para la estimación de Icl puede utilizarse la tabla 1.
- **tsk** es la temperatura cutánea media en grados centígrados (se toman 36° C).
- **ta** es la temperatura del aire en grados centígrados.
- **s** es la constante de Stefan Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8}$ w/m²K⁴).
- **esk** es la emisividad cutánea (0,97).
- **Ar/ADU** es la fracción de superficie cutánea participante en los intercambios de calor por radiación (0,67 para trabajo agachado; 0,70 para trabajo sentado y 0,77 para trabajo de pie).
- **Tr** es la temperatura radiante media en grados centígrados.
- **hr** es el coeficiente de radiación en w/m²K, cuya expresión es:

$$hr = s esk Ar / ADU [(tsk + 273)^4 - (tr + 273)^4] / (tsk - tr)$$
- **Cres** es el calor intercambiado por convección respiratoria, que, para una temperatura estimada del aire expirado de 35° C, vale:

$$Cres = 0,0014 M (35 - ta)$$
- **Eres** es el calor intercambiado por evaporación respiratoria que, para una temperatura estimada del aire expirado de 35° C, viene dado por:

Tabla 1: Valores de la resistencia térmica específico del atuendo

Descripción de las prendas	Resistencia térmica I _{cl} (clo)
Ropa interior	
Calzoncillos	0.03
Calzoncillos largos	0.10
Camiseta de tirantes	0.04
Camiseta de manga corta	0.09
Camiseta de manga larga	0.12
Sujetadores y bragas	0.03
Camisas – Blusas	
Manga corta	0.15
Ligera, mangas cortas	0.20
Normal, mangas largas	0.25
Camisa de franela, mangas largas	0.30
Blusa ligera, mangas largas	0.15
Pantalones	
Corto	0.06
Ligero	0.20
Normal	0.25
Franela	0.28
Vestidos – Faldas	
Falda ligera (verano)	0.15
Falda gruesa (invierno)	0.25
Vestido ligero, mangas cortas	0.20
Vestido de invierno, mangas largas	0.40
Mono de trabajo	0.55
Pullover	
Chaleco sin mangas	0.12
Pullover ligero	0.20
Pullover medio	0.28
Pullover grueso	0.35
Chaqueta	
Chaqueta ligera de verano	0.25
Chaqueta normal	0.35
Bata de trabajo (guardapolvo)	0.30
Prendas forradas con elevado aislamiento	
Mono de trabajo	0.90
Pantalón	0.35
Chaqueta	0.40
Chaleco	0.20
Prendas exteriores de abrigo	
Abrigo	0.60
Chaqueta larga	0.55
Parka	0.70
Mono forrado	0.55
Diversos	
Calcetines	0.02
Calcetines, gruesos cortos	0.05
Calcetines, gruesos largos	0.10
Medias nylon	0.03
Zapatos de suela delgada	0.02
Zapatos de suela gruesa	0.04
Botas	0.10
Guantes	0.05

1 clo = 0,155 m² °C w⁻¹

$$E_{res} = 0,0173 M (5,624 - p_a)$$

■ Cálculo de la evaporación máxima permitida por el ambiente (E_{max})

La pérdida evaporativa máxima es la que el individuo puede realizar bajo la hipótesis de la piel íntegramente mojada, donde se cumple:

$$E_{max} = (p_{sk,s} - p_a) / R_t \quad (8)$$

En la que:

$p_{sk,s}$ es la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de la piel en Kilopascales (a 35° C es de 5,624 KPa).

p_a es la presión parcial del vapor de agua a la temperatura ambiente en KPa. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$p_a = [10(8,8446 - 2225/(t_h + 273)) - 0,5 (t_a - t_h)] / 7,57$$

donde t_h es la temperatura húmeda sicrométrica.

R_t es la resistencia evaporativa total de la capa limitante de aire y atuendo de vestir. Su cálculo se basa en la expresión:

$$R_t = 1 / 16,7 h_c F_{pcl}$$

Aquí, F_{pcl} es el factor adimensional de reducción de los intercambios de calor latente debidos al atuendo. Se calcula a través de la ecuación:

$$F_{pcl} = 1 / \{1 + 2,22 h_c [I_{cl} - (1 - 1/(1 + 1,97 I_{cl}))]/(h_c + h_r)\}$$

■ Cálculo de la humedad requerida de la piel (w_{req}) y de la sudoración requerida (SW_{req})

La humedad de la piel (w) en una situación de trabajo determinada se define como un factor que multiplicado por la evaporación máxima da el valor de la evaporación real:

$$w E_{max} = E \quad (9)$$

La humedad requerida de la piel está entonces expresada como la razón entre la evaporación requerida y la evaporación máxima:

$$w_{req} = E_{req} / E \quad (10)$$

El cálculo de la sudoración se basa en la expresión:

$$SW = E / r \quad (11)$$

donde r es la eficacia evaporativa de la sudoración del individuo desnudo, coeficiente adimensional que es función de la humedad de la piel.

$$r = 1 - w^2 / 2 \quad (12)$$

De la ecuación $SW = E / r$ se deduce que:

$$SW_{req} = E_{req} / r_{req} \quad (13)$$

en la que r_{req} se obtiene de sustituir w por w_{req} en la ecuación (12). SW_{req} es la sudoración requerida expresada en w/m^2 , cuya equivalencia en agua perdida por sudoración es $SW_{req} (w/m^2) / 0,68 = SW_{req} (gr/m^2 h)$.

Valoración de los resultados

Aspectos fundamentales

La interpretación de los resultados requiere la posibilidad de comparar éstos con valores límite establecidos según criterios de salud y seguridad. En este sentido, la Norma ISO-7933 establece unos criterios de valoración diferenciando los límites propuestos entre exposiciones de individuos aclimatados o no y fijando dos niveles (alarma y peligro) que gradúan dicha limitación:

Tabla 2				
Variable	Sujeto no aclimatado		Sujeto aclimatado	
	alarma	peligro	alarma	peligro
Calor máximo acumulado Q_{max} (Wh/m^2)	50	60	50	60
Sudoración Sw_{max} (Wh/m^2)	200	250	300	400
D_{max} (Wh/m^2)	1000	1250	1500	2000
Humedad máxima de la piel W_{max}	0,85	0,85	1	1

Para la comparación de los resultados obtenidos con los límites fijados, debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- La **sudoración requerida** no debe sobrepasar la sudoración máxima (SW_{max}). Los valores propuestos para la sudoración máxima figuran en la tabla.
- La **humedad requerida de la piel** no debe sobrepasar la humedad máxima posible de la piel (w_{max}).
- La **acumulación de calor interno** no debe sobrepasar un cierto valor máximo (Q_{max}) fijado de forma que la elevación de la temperatura interna se sitúe entre $0,8^\circ C$ y $1^\circ C$. Su utilización se justifica en la ecuación:

$$T_{max} = 60Q_{max} / (E_{req} - E_p). \quad (19)$$

- La **deshidratación del organismo** no debe sobrepasar un valor máximo (D_{max}), fijado teniendo en cuenta que la pérdida de agua del organismo no debe sobrepasar el 4% - 6% del peso corporal. Su utilización se justifica en la ecuación:

$$T_{max} = 60 D_{max} / SW_p. \quad (20)$$

- **Características individuales:** para prevenir el riesgo de estrés térmico teniendo en cuenta las diferencias fisiológicas de los individuos expuestos, los límites establecidos en la tabla presentan un nivel inferior de alarma que previenen del riesgo de estrés térmico a todas las personas expuestas

físicamente aptas para la actividad que deben desarrollar y en buen estado de salud. Otros niveles, de peligro, están pensados para ser aplicados sólo a ciertos individuos especialmente dotados físicamente.

- **Aclimatación:** la aclimatación al calor supone la adecuación de ciertas funciones del organismo (disminución de la frecuencia cardíaca, incremento de la eficacia de la sudoración) a ambientes calurosos, que aumentan la tolerancia de las personas al calor. Por ello, se establecen también límites más permisivos de alarma y peligro para estas situaciones.

■ Estimación de valores previsibles

La valoración de una situación de trabajo exige conocer los valores previsible de la humedad de la piel (w_p), la evaporación del sudor (E_p) y de la sudoración (SW_p). El diagrama de flujo de interpretación del método y el ejemplo del apartado 6 ayudan a la mejor comprensión de la metodología que a continuación se explica para la evaluación. Pueden darse dos situaciones:

a) La humedad requerida de la piel es inferior a la humedad máxima y la sudoración requerida es inferior a la máxima (ver tabla 2 para conocer ambos valores): el equilibrio térmico se mantiene y entonces el valor de w_p es el de w_{req} , E_p es igual a E_{req} y SW_p es igual a SW_{req} .

b) La humedad requerida de la piel sobrepasa la humedad máxima: entonces se hace $W_p = W_{max}$.

El valor de E_p se deduce de:

$$E_p = W_p E_{max} \quad (14)$$

y el de SW_p se obtiene de la ecuación:

$$SW_p E_p / r_p, \quad (15)$$

donde r_p es la eficacia evaporativa correspondiente a w_p .

Si la sudoración previsible es superior a la sudoración máxima, se obtienen los valores previsible de la siguiente forma:

$$W_p E_{max} = r_p SW_{max} \quad (16)$$

SW_{max} es el valor límite de referencia que figura en la tabla 1 y r_p es la eficacia evaporativa de la sudoración, que se obtiene de $SW = E / r$, sustituyendo el valor de w por w_p .

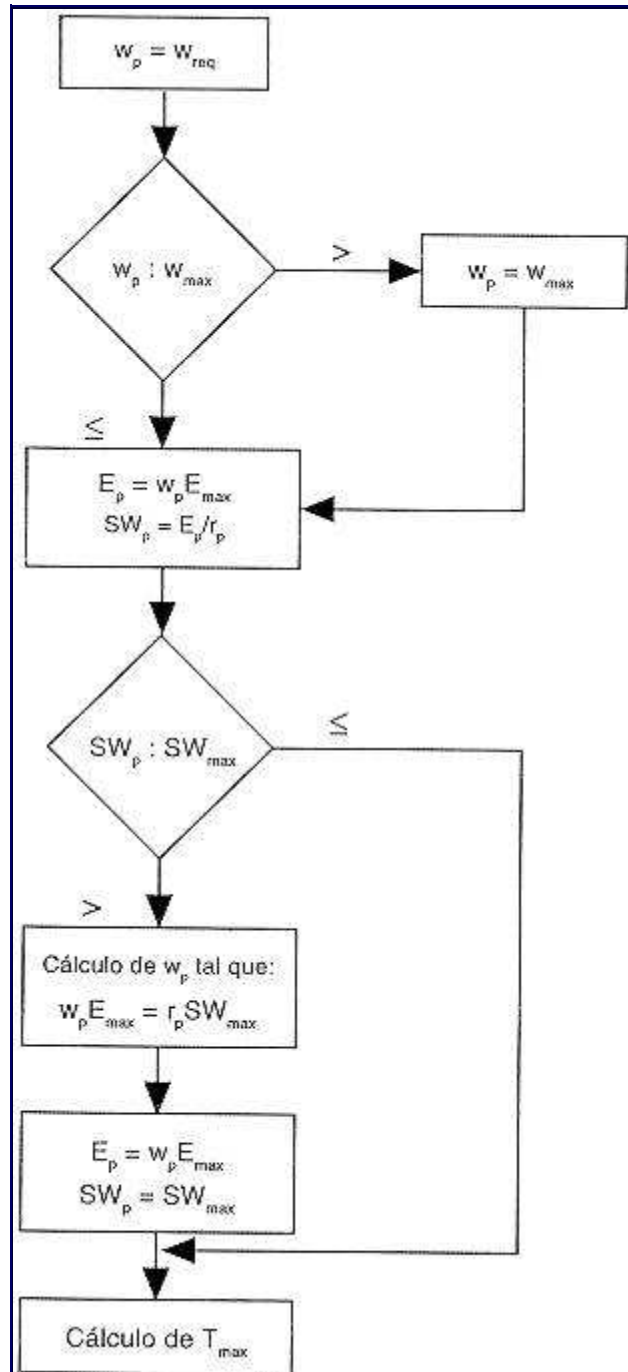


Fig. 1: Diagrama de interpretación del método ISO-7933

Tiempo límite de exposición

Debe determinarse un tiempo de exposición límite para una determinada situación de trabajo cuando no se cumple una de las condiciones siguientes:

$$E_p = E_{req} \quad (17)$$

$$SWp \leq D_{max} / 8 \quad (18)$$

Si no se cumple la ecuación entonces existe riesgo por elevación excesiva de la temperatura interna del cuerpo y se obtendrá el tiempo máximo de exposición de la ecuación:

$$T_{max} = 60 Q_{max} / (E_{req} - E_p) \quad (19)$$

Si no se cumple la ecuación significa que existe riesgo por deshidratación excesiva, entonces:

$$T_{max} = 60 D_{max} / SWp \quad (20)$$

El menor de los tiempos de exposición obtenidos en estas ecuaciones es el que debe tomarse como tiempo máximo de duración del trabajo en esas condiciones.

Cuando el T_{max} determinante es el deducido de $T_{max} = 60 D_{max} / SWp$ no debe someterse a las personas expuestas a otra exposición durante el resto de la jornada.

Exposiciones de más de una secuencia de trabajo

Cuando existen exposiciones compuestas de dos o más secuencias diferenciables en cuanto a las condiciones de trabajo, debe procederse al análisis hasta aquí relatado para cada una de las secuencias y para todas las combinaciones posibles entre las que sean sucesivas, es decir, que si hay cuatro secuencias y se denominan P1, P2, P3, P4, deberán estudiarse por separado P1, P2, P3, P4, (P1 + P2), (P2 + P3), (P3 + P4), (P1 + P2 + P3), (P2 + P3 + P4) y (P1 + P2 + P3 + P4).

La forma de valorar las combinaciones de dos o más secuencias se realizará tal como se ha indicado para una sola secuencia utilizando como valores de E_{req} y E_{max} de la combinación, las medias ponderadas en el tiempo de los valores de E_{req} y E_{max} de las respectivas secuencias, por ejemplo:

$$E_{req} (P_1 + P_2 + P_n) = S_n (E_{req} (P_i) \times t_i) / S_{nti} \quad (21)$$

siendo t_i el tiempo de duración real de cada secuencia.

Ejemplo de aplicación

Un determinado puesto de trabajo tiene las siguientes características:

- Consumo metabólico: $M = 207,5 \text{ w/m}^2$.
- Temperatura del aire: $T_a = 37 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Presión parcial del vapor de agua $P_a = 2,11 \text{ Kpa}$.
- Temperatura radiante media: $t_r = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Aislamiento térmico del vestido: $I_{cl} = 0,5 \text{ clo } (0,0775 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C w}^{-1})$.
- Velocidad del aire medida en el puesto de trabajo: $v = 0,5 \text{ m/s}$.
- Se trata de un individuo no aclimatado al calor que permanece de pie durante el trabajo.

Los valores de las variables son los siguientes:

Coeficiente de reducción de calor sensible

$$F_{cl} = 0,497$$

Coeficiente de reducción de calor latente

$$F_{pcl} = 0,402$$

Resistencia evaporativa

$$R_t = 0,0149$$

Coeficiente de convección

$$h_c = 10,01$$

Coeficiente de radiación

$$h_r = 5,1$$

Convección
 $C = -9,95 \text{ w/m}^2$

Radiación
 $R = -5,07 \text{ w/m}^2$

Convección respiratoria

$$C_{res} = -0,58 \text{ w /m}^2$$

Evaporación respiratoria

$$E_{res} = -11,6 \text{ w/m}^2$$

Evaporación Requerida

$$E_{req} = 234,7 \text{ w/m}^2$$

Evaporación Máxima

$$E_{max} = 235,6 \text{ w/m}^2$$

Humedad requerida de la piel

$$w_{req} = 0,996$$

Sudoración requerida

$$SW_{req} = 465,7 \text{ w/m}^2$$

Los límites propuestos para sujetos no aclimatados (nivel de alarma) son los siguientes:

$$W_{max} = 0,85$$

$$SW_{max} = 200 \text{ w/m}^2$$

$$Q_{max} = 50 \text{ w.h/m}^2$$

$$D_{max} = 1000 \text{ w.h/m}^2$$

A través del diagrama de interpretación del método calculamos los valores previsibles de w , E y SW :

$$W_p = w_{req} = 0,996, \text{ como es mayor que } w_{max} \text{ se hace } w_p = w_{max} = 0,85$$

$$\text{Entonces } E_p = w_p E_{max} = 200,3 \text{ w/m}^2 \text{ y } SW_p = E_p / r_p = 313,6$$

Como SW_p es mayor que SW_{max} se recalcula w_p tal que $w_p E_{max} = r_p SW_{max}$ de donde $w_p = 0,66$.

Se calcula entonces E_p de forma que $E_p = w_p E_{max}$ de donde $E_p = 155,5 \text{ w/m}^2$.

Se hace $SW_p = SW_{max}$, por lo que $SW_p = 200 \text{ w/m}^2$.

No se cumple la ecuación $E_p = E_{req}$ ni $SW_p \leq D_{max} / 8$, por lo que existe riesgo de incremento térmico y pérdida hídrica excesiva. En este caso debe hallarse el tiempo máximo de exposición que será el menor de los hallados según las ecuaciones:

$$T_{\max} = 60 Q_{\max} / (E_{\text{req}} - E_p)$$

y

$$T_{\max} = 60 D_{\max} / SW_p.$$

$$T_{\max 1} = 38 \text{ minutos}$$

$$T_{\max 2} = 300 \text{ minutos}$$

La duración del trabajo no debe exceder de 38 minutos de forma continuada.