

Estrés por frío: evaluación de las exposiciones laborales - 1º Parte

Introducción

La exposición laboral a ambientes fríos (cámaras frigoríficas, almacenes fríos, trabajos en el exterior, etc.) depende fundamentalmente de la temperatura del aire y de la velocidad del aire. El enfriamiento del cuerpo o de los miembros que quedan al descubierto puede originar hipotermia o su congelación. Es relativamente desconocido el sistema de valorar la magnitud del riesgo que supone el trabajo en ambientes fríos por lo que en este documento se informa de la tendencia actual al respecto, proporcionando una herramienta, que aunque todavía no es objeto de Norma, si que se ha estudiado por la International Standard Organización (ISO) en forma de documento de base (Technical Report. ISO TR 11079:1993 "*Evaluation of cold environments. Determination of required clothing insulation. IREQ*").

Efectos fisiológicos debidos al frío

El cuerpo humano genera energía a través de numerosas reacciones bioquímicas cuya base son los compuestos que forman los alimentos y el oxígeno del aire inhalado. La energía que se crea se emplea en mantener las funciones vitales, realizar esfuerzos, movimientos, etc. Gran parte de esta energía desprendida es calorífica. El calor generado mantiene la temperatura del organismo constante siempre que se cumpla la ecuación del balance térmico (ver apartado Evaluación del riesgo por enfriamiento general del cuerpo).

Cuando la potencia generada no puede disiparse en la cantidad necesaria, porque el ambiente es caluroso, la temperatura del cuerpo aumenta y se habla de riesgo de estrés térmico. Si por el contrario el flujo de calor cedido al ambiente es excesivo, la temperatura del cuerpo desciende y se dice que existe riesgo de estrés por frío. Se generan entonces una serie de mecanismos destinados a aumentar la generación interna de calor y disminuir su pérdida, entre ellos destacan el aumento involuntario de la actividad metabólica (tiritera) y la vasoconstricción. La tiritera implica la activación de los músculos con la correspondiente generación de energía acompañada de calor.

La vasoconstricción trata de disminuir el flujo de sangre a la superficie del cuerpo y dificultar así la disipación de calor al ambiente. Paradójicamente y debido a la vasoconstricción, los miembros mas alejados del núcleo central del organismo ven disminuido el flujo de sangre y por lo tanto del calor que ésta transporta, por lo que su temperatura desciende y existe riesgo de congelación en manos, pies, etc.

Estos dos efectos principales del frío, descenso de la temperatura interna (hipotermia) y congelación de los miembros originan la subdivisión de las situaciones de estrés por frío en *enfriamiento general del cuerpo* y *enfriamiento local* de ciertas partes del cuerpo (extremidades, cara, etc.)

Según la American Conference of Governmental industrial Hygienists (ACGIH), los efectos sufridos por el organismo cuando desciende su temperatura interna (enfriamiento general del cuerpo) son los que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Situaciones clínicas progresivas de la hipotermia

Temperatura interna (°C)	Síntomas clínicos
37,6	Temperatura rectal normal
37	Temperatura oral normal
36	La relación metabólica aumenta en un intento de compensar la pérdida de calor
35	Tiritones de intensidad máxima
34	La víctima se encuentra consciente y responde. Tiene la presión arterial normal
33	Fuerte hipotermia por debajo de esta temperatura
32 31	Consciencia disminuida. La tensión arterial se hace difícil de determinar. Las pupilas están dilatadas aunque reaccionan a la luz. Cesa el tiriteo
30 29	Pérdida progresiva de la consciencia. Aumenta la rigidez muscular. Resulta difícil determinar el pulso y la presión arterial. Disminuye la frecuencia respiratoria
28	Posible fibrilación ventricular
27	Cesa el movimiento voluntario. Las pupilas no reaccionan a la luz. Ausencia de reflejos tendinosos
26	Consciencia durante pocos momentos
25	Puede producirse fibrilación ventricular espontánea
24	Edema pulmonar
22 21	Riesgo máximo de fibrilación ventricular
20	Parada cardíaca
18	Hipotermia accidental mas baja para recuperar a la víctima
17	Electroencefalograma isoelectrico
9	Hipotermia más baja simulada por enfriamiento para recuperar al paciente

●Evaluación del riesgo por enfriamiento general del cuerpo Intercambio de calor entre el organismo y el ambiente

Para la evaluación del riesgo por enfriamiento general se propone el cálculo del índice IREQ (aislamiento requerido del atuendo). El IREQ es el aislamiento del vestido necesario para que se cumpla la ecuación del balance térmico, cuya expresión es la siguiente:

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

Donde M es la actividad metabólica del trabajo, W es la potencia mecánica (la mayoría de las veces cuantitativamente despreciable), C_{res} y E_{res} son los términos de calor sensible y latente respectivamente debido a la diferencia de temperatura y humedad del aire inspirado y exhalado, E es el calor cedido por evaporación del sudor, K es el calor intercambiado entre el cuerpo y superficies en contacto con él (también es despreciable su valor frente a los otros términos y se considera asumida su influencia en el balance a través de los términos C y R, que son los términos de intercambio de calor por convección y radiación respectivamente, mientras que S es el calor acumulado por el organismo, cuyo valor permite conocer tiempos máximo de permanencia en un ambiente determinado.

El valor de cada uno de los términos mencionados (todos ellos se expresan como potencia por unidad de superficie corporal, wátios/m²) viene determinado por las siguientes ecuaciones:

$$C_{res} = 0,0014 M (t_{ex} - t_a) \quad (2)$$

$$E_{res} = 0,0173 M (p_{ex} - p_a) \quad (3)$$

$$E = w (p_{sks} - p_a) / R_t \quad (4)$$

$$C = f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (5)$$

$$R = f_{cl} h_r (t_{cl} - t_r) \quad (6)$$

donde:

- t_{ex} es la temperatura del aire exhalado, $t_{ex} = 29 + 0,2t_a$
- t_a es la temperatura seca del aire
- p_{ex} es la presión parcial del vapor de agua en el aire exhalado, que se calcula sabiendo que

$$p_{ex} = 0,1333 e^{[18,6686 - 4030,183 / (t_{ex} + 235)]}$$

- p_a es la presión parcial del vapor de agua en el aire ambiente y se calcula mediante la expresión:

$$p_a = (HR/100) 0,1333 e^{[18,6686 - 4030,183 / (t_a + 235)]}$$

siendo HR la humedad relativa en %.

- w es la fracción de piel húmeda que participa en la evaporación del sudor. Su valor se encuentra entre 0,06 (no hay prácticamente evaporación) y 1 (piel totalmente mojada)
- p_{sks} es la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de la piel y puede calcularse a partir de la expresión:

$$p_{sks} = 0,1333 e^{[18,6686 - 4030,183 / (t_{sk} + 235)]},$$

siendo t_{sk} la temperatura de la piel.

- R_t es la resistencia evaporativa del vestido y se obtiene de la expresión $R_t = 0,16 [f_{cl} / (h_c + h_r) + I_{clr}]$
- f_{cl} es un factor de superficie del vestido tal que $f_{cl} = 1 + 1,97 I_{clr}$
- h_c es el coeficiente de convección,

$$h_c = 3,5 + 5,2 v_{ar} \quad \text{si } v_{ar} \leq 1 \text{ m/s}$$

$$h_c = 8,7 v_{ar}^{0,6} \quad \text{si } v_{ar} > 1 \text{ m/s}$$

- v_{ar} es la velocidad relativa del aire, su valor se calcula a partir de

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

siendo v_a la velocidad medida del aire.

- h_r es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, que se calcula según la expresión

$$h_r = s e_{sk} A_r / A_{DU} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] / (t_{cl} - t_r),$$

donde s es la constante de Stefan Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{ K}^4$) y e_{sk} es la emisividad del atuendo (0,95). Si la temperatura radiante media (t_r) es muy alta, e_{sk} varía claramente con el color de la ropa y debe ajustarse su valor.

- A_r / A_{DU} es la fracción de superficie corporal participante en los intercambios de calor por radiación y depende de la postura del cuerpo. Puede tomarse el valor 0,77 para la mayoría de situaciones.
- I_{clr} es la resistencia térmica del vestido considerando las condiciones reales de utilización. Se obtiene a partir de la resistencia térmica del vestido (I_{cl}) extraída de las tablas correspondientes (ver Norma ISO 9920 ó resumen en tabla 2) y teniendo en cuenta la actividad metabólica M de la siguiente forma:

$$I_{clr} = 0,9 I_{cl} \quad \text{si } M \leq 100 \text{ w/m}^2$$

$$I_{clr} = 0,8 I_{cl} \quad \text{si } M > 100 \text{ w/m}^2$$

Tabla 2: Criterios para la determinación del IREQ y valoración del enfriamiento local

Enfriamiento	Índice	Temperatura de la piel t_{sk} (°C)	Humedad de la piel w	Pérdida máxima de Energía calorífica Q_{lim} (wh/m2)	Pérdida máxima de Potencia calorífica WCI (w/m2)
General	$IREQ_{min}$	30	0,06	X	X
	$IREQ_{neutro}$	35,7-0,0285M	0,001 M	X	X
	Tiempo máximo de exposición	30 (estrés por frío) 35,7-0,0285M (mínimo confort)	0,06 (estrés por frío) 0,001 M (mínimo confort)	-40	X
	WCI	X	X	X	1600
Local	Temperatura de la piel de las manos	15-24	X	X	X

M es la actividad del trabajo en w/m^2

●Flujo de calor a través del vestido y cálculo del IREQ

El flujo de calor a través de la ropa de trabajo se lleva a cabo por conducción, convección y radiación (intercambio de calor seco) y por evaporación del sudor (intercambio de calor latente). El efecto del vestido en este último ya viene contabilizado por la expresión (4) mientras que el calor seco fluye dependiendo de la resistencia térmica de aquél (I_{clr}) y del gradiente de temperatura entre la superficie de la piel (t_{sk}) y la superficie del vestido (t_{cl}).

Como el flujo de calor seco ($R + C_r$) a través de la superficie del vestido es equivalente al intercambio de calor entre la superficie del vestido y el ambiente, se justifican las ecuaciones (5) y (6) en el cálculo del balance térmico, pero también se pueden expresar los valores de C y R en función de la resistencia térmica del vestido de la siguiente forma:

$$(t_{sk} - t_{cl}) / I_{clr} = R + C \quad (7)$$

De la ecuación (1) se deduce que

$$R + C = M - W - E_{res} - C_{res} - K - E - S$$

donde el término K es despreciable.

El índice IREQ es el valor de I_{clr} que hace cumplir la ecuación del balance térmico con pérdida neta de calor nula ($S = 0$), de forma que representa la resistencia térmica del vestido necesaria para evitar el enfriamiento general del cuerpo, por lo que teniendo en cuenta además la expresión (7) se obtiene:

$$R + C = M - W - E_{res} - C_{res} - E \dots (8)$$

y

$$IREQ = (t_{sk} - t_{cl}) / (M - W - E_{res} - C_{res} - E) (9)$$

La ecuación (9) contiene dos variables desconocidas (IREQ y t_{cl}); de ella se despeja t_{cl} :

$$t_{cl} = t_{sk} - IREQ (M - W - E_{res} - C_{res} - E)$$

Al sustituir t_{cl} en la ecuación (8), los términos C y R contienen así mismo esa variable por lo que debe resolverse (8) por iteración.

● **Cálculo del IREQ_{min} e IREQ_{neutro}**

El hecho de que se cumpla la ecuación del balance térmico ($S=0$), no implica necesariamente que la situación sea confortable, antes bien, admite numerosas soluciones en las que la temperatura interna del cuerpo se mantiene constante (no son previsible efectos adversos por estrés térmico o estrés por frío) pero el ambiente sería considerado de inconfortable por el individuo expuesto.

Se dice que existe confort térmico cuando la sensación es neutra respecto al ambiente térmico. La situación de confort térmico implica que los valores de la temperatura de la piel y la evaporación del sudor estén acotados entre ciertos límites. Para la evaluación de la exposición al frío mediante el índice IREQ, se propone el cálculo de dos valores de éste, IREQ_{min} e IREQ_{neutro}.

El primero de ellos representa el aislamiento térmico del vestido (I_{clr}) mínimo para evitar el enfriamiento general del cuerpo. El segundo corresponde al I_{clr} que proporcionará además confort térmico.

Para el cálculo de ambos índices se emplean valores diferentes de t_{sk} (temperatura de la piel) en función de la actividad metabólica y de w (humedad de la piel) en la resolución de la ecuación (8), según el criterio de la tabla 2.

Estrés por frío: evaluación de las exposiciones laborales - 2ª Parte

Cálculo del tiempo máximo de exposición y tiempo de recuperación

● **Tiempo máximo admisible**

Un individuo trabajando en un ambiente frío cuya resistencia térmica del vestido (I_{clr}) sea menor que el IREQ_{min} está expuesto a riesgo de estrés por frío con posibles efectos adversos para su salud al cabo de un tiempo determinado. En este caso la pérdida neta de calor del cuerpo es $S \neq 0$, por lo que al cabo de un tiempo T la energía calorífica neta perdida (Q) será $Q = S \times T$. Se admite un valor máximo de pérdida de energía calorífica neta, $Q_{lim} = -40 \text{ Wh/m}^2$, para individuos físicamente sanos (ver tabla 2). Al principio de la exposición, y por un tiempo limitado (20-30 minutos), hay una pérdida neta de calor en los tejidos, mayoritariamente causada por enfriamiento de la piel y reducción de la circulación periférica, que corresponde a una pérdida de calor de aproximadamente 40 Wh/m^2 . Se equilibra entonces la temperatura del cuerpo y el almacenamiento de calor es nulo.

Para calcular el tiempo máximo de permanencia o exposición a un ambiente frío (para evitar el riesgo de enfriamiento general) debe conocerse el valor de S a partir de las expresiones:

$$R + C = M - W - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - E - S \dots (10)$$

y

$$I_{\text{clr}} = (t_{\text{sk}} - t_{\text{cl}}) / (M - W - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - E - S) (11)$$

derivadas de (8) y (9) cuando $S \neq 0$. La resolución debe realizarse como en el cálculo del IREQ, por iteración.

Una vez conocido el valor S, se obtiene el tiempo máximo de permanencia en el ambiente frío a través de la expresión:

$$T_{\text{max}} = Q_{\text{lim}} / S (12)$$

•Tiempo de recuperación

Desde el punto de vista preventivo es útil conocer el tiempo de recuperación necesario para que un individuo expuesto a ambientes fríos, en los que $S < 0$, recupere la energía calorífica que ha perdido. Es de suponer que el periodo de recuperación se llevará a cabo bajo condiciones diferentes a las de trabajo, es decir que las variables termohigrométricas, la actividad metabólica, y el aislamiento térmico del vestido, tendrán nuevos valores. Para que el organismo recupere energía calorífica, el término S' debe ser positivo y se obtiene de las ecuaciones (10) y (11) como en el caso del cálculo de T_{max} , sustituyendo los valores de las variables correspondientes al trabajo por las de recuperación. A continuación se emplea la expresión:

$$T_{\text{rec}} = Q_{\text{lim}} / S' (13)$$

donde $Q_{\text{lim}} = 40 \text{ wh/m}^2$

Los cálculos del tiempo máximo de exposición y de recuperación se pueden estimar tanto para prevenir el riesgo de enfriamiento general del cuerpo como para evitar el incomfort. En el primer caso se empleará un valor de $t_{\text{sk}} = 30^\circ\text{C}$ y $w = 0,06$ y en el segundo, $t_{\text{sk}} = 35,7 - 0,0285 M$ y $w = 0,001 M$, tal como se estableció para el cálculo del IREQ_{min} y del IREQ_{neutro} (ver tabla 2).

El cálculo exacto del IREQ, tiempo máximo admisible y tiempo de recuperación precisa la utilización de un programa informático o calculadora programable. En la tabla 8 se dan los valores del IREQ en función de la velocidad y la temperatura del aire y del nivel de actividad; en las tablas 9 a 13 se da una selección de los valores calculados de T_{max} para distintos valores del aislamiento del vestido, de la temperatura del aire y del nivel de actividad. En el documento ISO/TR 11079:1993, se publica el programa informático adecuado para la resolución de todos los cálculos precisos.

Tabla 8: Valores de IREQ en función de la velocidad y la temperatura del aire y del nivel de actividad

V_{ar} (m/seg)	IREQ _{min} (clo) para $M = 80 \text{ w/m}^2$					
	t_a					
	5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
0.2	1.91	2.40	2.89	3.38	4.36	5.34
0.5	1.98	2.47	2.97	3.45	4.42	5.39
1	2.07	2.55	3.03	3.52	4.49	5.46
2	2.15	2.63	3.11	3.58	4.55	5.51
5	2.23	2.70	3.18	3.65	4.60	5.57

V_{ar} (m/seg)	IREQ _{min} (clo) para $M = 115 \text{ w/m}^2$					
	t_a					
	5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
0.2	1.16	1.51	1.86	2.20	2.89	3.58
0.5	1.24	1.58	1.93	2.27	2.95	3.63
1	1.32	1.66	2.00	2.34	3.02	3.70
2	1.40	1.74	2.07	2.41	3.08	3.76
5	1.49	1.82	2.15	2.49	3.15	3.82

V_{ar} (m/seg)	IREQ _{min} (clo) para $M = 145 \text{ w/m}^2$					
	t_a					
	5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
0.2	0.83	1.10	1.38	1.65	2.20	2.75
0.5	0.89	1.17	1.44	1.71	2.26	2.80
1	0.97	1.24	1.51	1.78	2.32	2.87
2	1.05	1.31	1.58	1.85	2.39	2.93
5	1.14	1.40	1.67	1.93	2.46	3

V_{ar} (m/seg)	IREQ _{min} (clo) para $M = 200 \text{ w/m}^2$					
	t_a					
	5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
0.2	0.40	0.69	0.89	1.09	1.49	1.89
0.5	0.54	0.74	0.94	1.14	1.54	1.94
1	0.61	0.80	1.00	1.20	1.59	1.99
2	0.68	0.87	1.07	1.26	1.66	2.05
5	0.76	0.96	1.15	1.34	1.73	2.12

V_{ar} (m/seg)	IREQ _{min} (clo) para $M = 250 \text{ w/m}^2$					
	t_a					
	5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
0.2	0.33	0.49	0.65	0.81	1.13	1.45
0.5	0.37	0.53	0.69	0.85	1.71	1.49
1	0.42	0.58	0.74	0.90	1.21	1.53
2	0.49	0.64	0.80	0.96	1.27	1.59
5	0.57	0.73	0.88	1.04	1.35	1.66

Tabla 9: Valores de $T_{\max}$ (horas) en función de las características del vestido y de la temperatura del aire para $M=80 \text{ w/m}^2$ y distintos valores de la velocidad del aire, V_{ar}

I_{cl} (clo)	V_{ar} (m/seg)	t_a					
		5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
1.5	0.2	2.06	1.09	0.75	0.57	0.39	0.30
	0.5	1.71	0.97	0.68	0.52	0.36	0.27
	1	1.41	0.84	0.60	0.47	0.33	0.25
	2	1.18	0.74	0.54	0.42	0.30	0.23
	5	0.99	0.64	0.48	0.38	0.27	0.21
2	0.2	6.41	2.30	1.27	0.88	0.55	0.40
	0.5	7.33	1.96	1.14	0.81	0.51	0.38
	1	4.71	1.67	1.02	0.73	0.47	0.35
	2	3.44	1.44	0.91	0.67	0.44	0.33
	5	2.63	1.24	0.82	0.61	0.4	0.30
2.5	0.2	>8	>8	2.50	1.42	0.78	0.54
	0.5	>8	6.95	2.23	1.35	0.73	0.51
	1	>8	5.00	1.90	1.19	0.68	0.48
	2	>8	3.81	1.71	1.08	0.63	0.45
	5	>8	3.02	1.48	0.98	0.59	0.42
3	0.2	>8	>8	>8	2.75	1.11	0.71
	0.5	>8	>8	6.90	2.43	1.06	0.68
	1	>8	>8	5.22	2.14	0.98	0.64
	2	>8	>8	4.15	1.91	0.92	0.61
	5	>8	>8	3.42	1.70	0.85	0.57
3.5	0.2	>8	>8	>8	>8	1.77	0.98
	0.5	>8	>8	>8	6.93	1.64	0.93
	1	>8	>8	>8	5.40	1.51	0.88
	2	>8	>8	>8	4.45	1.40	0.83
	5	>8	>8	>8	3.73	1.29	0.78
4	0.2	>8	>8	>8	>8	3.15	1.37
	0.5	>8	>8	>8	>8	2.83	1.30
	1	>8	>8	>8	>8	2.56	1.22
	2	>8	>8	>8	>8	2.32	1.16
	5	>8	>8	>8	>8	2.11	1.09
4.5	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	2.05
	0.5	>8	>8	>8	>8	7.07	1.92
	1	>8	>8	>8	>8	5.86	1.79
	2	>8	>8	>8	>8	4.95	1.68
	5	>8	>8	>8	>8	4.27	1.58
5	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	3.44
	0.5	>8	>8	>8	>8	>8	3.17
	1	>8	>8	>8	>8	>8	2.90
	2	>8	>8	>8	>8	>8	2.69
	5	>8	>8	>8	>8	>8	2.49

Tabla 10: Valores de $T_{\max}$ (horas) en función de las características del vestido y de la temperatura del aire para $M=115 \text{ w/m}^2$ y distintos valores de la velocidad del aire, V_{ar}

I_d (clo)	V_{ar} (m/seg)	t_a					
		5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
1.5	0.2	>8	2.33	1.10	0.73	0.44	0.31
	0.5	>8	1.83	0.95	0.64	0.40	0.29
	1	5.54	1.38	0.81	0.56	0.36	0.26
	2	3.20	1.13	0.69	0.50	0.32	0.24
	5	1.91	0.90	0.58	0.43	0.29	0.21
2	0.2	>8	>8	3.36	1.46	0.69	0.45
	0.5	>8	>8	2.56	1.26	0.63	0.42
	1	>8	>8	2.00	1.08	0.57	0.39
	2	>8	>8	1.60	0.94	0.51	0.35
	5	>8	>8	1.16	0.80	0.46	0.32
2.5	0.2	>8	>8	>8	5.00	1.16	0.66
	0.5	>8	>8	>8	3.71	1.05	0.61
	1	>8	>8	>8	2.77	0.95	0.57
	2	>8	>8	>8	2.23	0.84	0.52
	5	>8	>8	5.66	1.78	0.75	0.48
3	0.2	>8	>8	>8	>8	2.41	1.02
	0.5	>8	>8	>8	>8	2.09	0.94
	1	>8	>8	>8	>8	1.77	0.86
	2	>8	>8	>8	>8	1.56	0.79
	5	>8	>8	>8	>8	1.36	0.72
3.5	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	1.74
	0.5	>8	>8	>8	>8	>8	1.57
	1	>8	>8	>8	>8	5.86	1.41
	2	>8	>8	>8	>8	4.34	1.28
	5	>8	>8	>8	>8	3.35	1.16
4	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	4.02
	0.5	>8	>8	>8	>8	>8	3.36
	1	>8	>8	>8	>8	>8	2.86
	2	>8	>8	>8	>8	>8	2.48
	5	>8	>8	>8	>8	>8	2.15

Tabla 11. Valores de $T_{\max}$ (horas) en función de las características del vestido y de la temperatura del aire para $M = 145 \text{ w/m}^2$ y distintos valores de la velocidad del aire, V_{ar}

I_{cl} (clo)	V_{ar} (m/seg)	t_a					
		5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
1	0.2	>8	1.46	0.78	0.53	0.28	0.23
	0.5	>8	1.14	0.65	0.46	0.27	0.21
	1	>8	0.88	0.55	0.40	0.26	0.19
	2	>8	0.69	0.45	0.34	0.23	0.17
	5	>8	0.53	0.37	0.28	0.19	0.15
1.5	0.2	>8	>8	3.18	1.25	0.57	0.37
	0.5	>8	>8	2.13	1.05	0.51	0.34
	1	>8	6.41	1.64	0.88	0.46	0.31
	2	>8	4.18	1.25	0.73	0.40	0.28
	5	>8	2.19	0.24	0.60	0.35	0.25
2	0.2	>8	>8	>8	6.41	1.16	0.61
	0.5	>8	>8	>8	5.78	1.01	0.56
	1	>8	>8	>8	3.42	0.88	0.50
	2	>8	>8	>8	2.38	0.78	0.46
	5	>8	>8	>8	1.71	0.66	0.41
2.5	0.2	>8	>8	>8	>8	4.02	1.09
	0.5	>8	>8	>8	>8	3.04	0.98
	1	>8	>8	>8	>8	2.36	0.88
	2	>8	>8	>8	>8	1.87	0.78
	5	>8	>8	>8	>8	1.49	0.70
3	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	2.68
	0.5	>8	>8	>8	>8	>8	2.25
	1	>8	>8	>8	>8	>8	1.89
	2	>8	>8	>8	>8	>8	1.62
	5	>8	>8	>8	>8	>8	1.37
3.5	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	0.5	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	1	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	2	>8	>8	>8	>8	>8	7.71
	5	>8	>8	>8	>8	>8	4.81

Tabla 12: Valores de $T_{\max}$ (horas) en función de las características del vestido y de la temperatura del aire para $M=200 \text{ w/m}^2$ y distintos valores de la velocidad del aire, V_{ar}

I_{cl} (clo)	V_{ar} (m/seg)	t_a					
		5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
0.5	0.2	2.47	0.76	0.45	0.32	0.21	0.15
	0.5	1.40	0.60	0.38	0.28	0.18	0.14
	1	0.90	0.46	0.31	0.24	0.16	0.12
	2	0.60	0.35	0.25	0.19	0.13	0.10
	5	0.39	0.25	0.19	0.15	0.11	0.08
1	0.2	>8	>8	3.39	1.07	0.45	0.29
	0.5	>8	>8	2.04	0.86	0.40	0.26
	1	>8	>8	1.37	0.69	0.35	0.24
	2	>8	3.47	0.95	0.55	0.30	0.21
	5	>8	1.45	0.65	0.42	0.25	0.18
1.5	0.2	>8	>8	>8	>8	1.38	0.59
	0.5	>8	>8	>8	>8	1.13	0.53
	1	>8	>8	>8	>8	0.93	0.47
	2	>8	>8	>8	5.70	0.76	0.41
	5	>8	>8	>8	2.22	0.60	0.35
2	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	1.69
	0.5	>8	>8	>8	>8	>8	1.41
	1	>8	>8	>8	>8	>8	1.17
	2	>8	>8	>8	>8	>8	0.98
	5	>8	>8	>8	>8	3.14	0.79
2.5	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	0.5	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	1	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	2	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	5	>8	>8	>8	>8	>8	4.16

Tabla 13: Valores de $T_{\max}$ (horas) en función de las características del vestido y de la temperatura del aire para $M=250 \text{ w/m}^2$ y distintos valores de la velocidad del aire, V_{ar}

I_{cl} (clo)	V_{ar} (m/seg)	t_a					
		5°C	0°C	-5°C	-10°C	-20°C	-30°C
0.5	0.2	>8	1.90	0.67	0.41	0.22	0.16
	0.5	>8	1.20	0.54	0.35	0.21	0.15
	1	1.61	0.80	0.43	0.29	0.18	0.13
	2	1.51	0.54	0.33	0.24	0.15	0.11
	5	0.66	0.34	0.23	0.18	0.12	0.09
1	0.2	>8	>8	>8	>8	0.73	0.37
	0.5	>8	>8	>8	4.71	0.63	0.34
	1	>8	>8	>8	2.13	0.53	0.30
	2	>8	>8	>8	1.30	0.43	0.27
	5	>8	>8	2.28	0.78	0.34	0.22
1.5	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	1.27
	0.5	>8	>8	>8	>8	>8	1.06
	1	>8	>8	>8	>8	>8	0.88
	2	>8	>8	>8	>8	3.94	0.72
	5	>8	>8	>8	>8	1.71	0.56
2	0.2	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	0.5	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	1	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	2	>8	>8	>8	>8	>8	>8
	5	>8	>8	>8	>8	>8	5.70

Velocidad del aire (m/s)	t (°C)										
	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
1.8	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
2	-1	-6	-11	-16	-21	-27	-32	-37	-42	-47	-52
3	-4	-10	-15	-21	-27	-32	-38	-44	-49	-55	-60
5	-9	-15	-21	-28	-34	-40	-47	-53	-59	-66	-72
8	-13	-20	-27	-34	-41	-48	-55	-62	-69	-76	-83
11	-16	-23	-31	-38	-46	-53	-60	-68	-75	-83	-90
15	-18	-26	-34	-42	-49	-57	-65	-73	-80	-88	-96
20	-20	-28	-36	-44	-52	-60	-68	-76	-84	-92	-100

La humedad relativa en el almacén es del 50%, la velocidad del aire de 0.2 m/s y la temperatura radiante es igual a la del aire ($t_r = t_a$).

●Resolución

La actividad metabólica M se estima a partir de los datos disponibles de la siguiente forma (ver NTP-322.93):

$$M = 0.6 \times 0.6 \text{ kcal/min} + 0.4 \times 2.0 \text{ kcal/min} + 0.9 \times 1.5 \text{ kcal/min} + 0.1 \times 2.5 \text{ kcal/min} + 1 \times 1 \text{ kcal/min} = 3.76 \text{ kcal/min} \\ = 144.4 \text{ W/m}^2$$

El valor de la resistencia térmica del vestido según sus componentes, extraído de la tabla 4, es de $I_{cl} = 2.03 \text{ clo}$.

Tabla 4. Valores de las resistencia térmica específica 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
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 de nylon	0.03
Zapatos de suela delgada	0.02
Zapatos de suela gruesa	0.04
Botas	0.10
Guantes	0.05

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C w}^{-1}$$

De las tablas 8 y 11 para $M = 145 \text{ W/m}^2$ y $t_a = 20^\circ\text{C}$ obtenemos, respectivamente, para $v_{ar} = 0.2 \text{ m/s}$ e $I_{cl} = 2$ clo, los siguientes valores:

$$IREQ_{min} = 2.20 \text{ clo}$$

$$T_{max} = 1,16 \text{ horas}$$

El valor de $IREQ_{min}$ de 2.20 clo equivale a una vestimenta según tablas de 2.75 clo ya que se debe proveer un 25% más de resistencia térmica cuando los valores son teóricos. Como que el individuo en cuestión viste con 2 clo deberá proveerse al mismo de ropa que alcance mayor nivel de aislamiento térmico o reducir la exposición habitual hasta aproximadamente 1 hora, puesto que según el valor del $IREQ_{min}$ ($< I_{clr}$) existe riesgo de estrés por frío debido al enfriamiento general del cuerpo.

Para conocer con exactitud el aumento de resistencia térmica del atuendo necesario o el tiempo de recuperación del individuo en las condiciones actuales después de la exposición máxima de 70 minutos, es necesario disponer de un programa informático.

Enfriamiento localizado

El enfriamiento de algunas partes del cuerpo especialmente manos, pies y cabeza, puede producir incomfort, disminución de la destreza manual y daños por frío.

La evaluación de los riesgos debidos al enfriamiento localizado se puede llevar a cabo a través del índice experimental WCI (Wind Chill Index), especialmente indicado para exposiciones al frío en exteriores basado en el poder de enfriamiento del viento.

El WCI (potencia calorífica perdida) se calcula a través de la expresión:

$$WCI = (h_c + h_r) (t_{sk} - t_a) \quad (14)$$

El valor de h_r es independiente del viento y es pequeño en relación a h_c a altas velocidades del aire, por lo que la expresión (14), expresando WCI en W/m^2 se transforma,

$$WCI = 1,16 (10,45 + 10(v_{ar})^{-1/2} - v_{ar})(33 - t_a) \quad (15)$$

El valor máximo de WCI admisible para evitar daños por enfriamiento localizado, es de 1600 w/m². (Tabla 2) Se define la temperatura de congelación (t_{ch}) como la temperatura ambiente que para valores de $v_{ar} \leq 1,8$ m/s, posee el mismo poder de enfriamiento que las condiciones existentes, se puede obtener de la siguiente expresión:

$$t_{ch} = 33 \text{ WCI} / 25,5 \text{ (16)}$$

En la tabla 5 se muestran los efectos del frío a diferentes valores de WCI y T_{ch} , mientras que en la tabla 6 figuran los valores de t_{ch} según la temperatura del aire y la velocidad del viento.

Tabla 5. Efectos del frío para diferentes valores de WCI y t_{ch}

WCI (w/m ²)	t_{ch} (°C)	Efectosensación
1200	-14	Muy frío
1400	-22	Extremadamente frío
1600	-30	Congelación de tejidos expuestos en una hora
1800	-38	
2000	-45	Congelación de tejidos expuestos en un minuto
2200	-53	
2400	-61	Congelación de tejidos expuestos en medio minuto
2600	-69	

Medidas preventivas

La actuación preventiva frente al riesgo de estrés por frío pasa mayoritariamente por la intervención sobre aquellas variables que intervienen en el balance térmico, susceptibles de modificación. La tabla 7 muestra un resumen de las posibles medidas preventivas a aplicar, debiendo decidirse en cada caso las mas adecuadas

Tabla 7. Medidas preventivas frente al riesgo de estrés por frío

ACTUACIÓNPREVENTIVA	EFEECTO BUSCADO
Utilización de pantallas cortaviento en exteriores	Reducir la velocidad del aire.
Protección de extremidades	Evitar enfriamiento localizado. Minimizar el descenso de la temperatura de la piel.
Seleccionar la vestimenta	Facilitar evaporación del sudor. Minimizar pérdidas de calor a través de la ropa.
Establecer regímenes de trabajo-recuperación	Recuperar pérdidas de energía calorífica.
Ingestión de líquidos calientes	Recuperar pérdidas de energía calorífica.
Limitar el consumo de café como diurético y modificador de la circulación sanguínea	Minimizar pérdidas de agua. Evitar vasodilatación.
Modificar difusores de aire (interiores, cámaras, etc.)	Reducir la velocidad del aire (< 1m/s).
Utilizar ropa cortaviento	Reducir la velocidad del aire.
Excluir individuos con medicación que interfiera la regulación de temperatura	Evitar pérdidas excesivas de energía calorífica.
Reconocimientos médicos previos	Detectar disfunciones circulatorias, problemas dérmicos, etc.
Sustituir la ropa humedecida	Evitar la congelación del agua y la consiguiente pérdida de energía calorífica.
Medir periódicamente la temperatura y la velocidad del aire	Controlarlas dos variables termohigrométricas de mayor influencia en el riesgo de estrés por frío.
Disminuir el tiempo de permanencia en	La pérdida de energía calorífica depende del

ambientes fríos	tiempo de exposición al frío. Se consigue de esta forma minimizar la pérdida de calor.
Controlar el ritmo de trabajo	Aumentar el metabolismo para generar mayor potencia calorífica evitando excederse, ya que podría aumentar la sudoración y el humedecimiento de la ropa.