

Método de cálculo de la variable “CCH. Voto medio esperado diurno.” (alias = pmvd)

Método de cálculo de la variable “CCH. Voto medio esperado nocturno.” (alias = pmvn)

Método de cálculo de la variable “CCH. Índice de insatisfacción esperado diurno.” (alias = iipd)

Método de cálculo de la variable “CCH. Índice de insatisfacción esperado nocturno.” (alias = iipn)

Método de cálculo de la variable “CCH. Horas de insatisfacción esperadas (51%) por calor.” (alias = hipc)

Método de cálculo de la variable “CCH. Horas de insatisfacción esperadas (51%) por frío.” (alias = hipf)

“Grupo de variables de Confort Climático Humano”

De los métodos que pretenden evaluar en que medida se alcanza el confort térmico en una determinada situación en función de diversidad de variables ambientales, el modelo de *P.O. Fanger (Thermal Confort, McGraw-Hill, 1973)* es el que contempla mayor número de parámetros en una metodología que combina una formulación física basada en un balance energético y otra probabilista en función de la respuesta de la población a un determinado ambiente. El *método de Fanger* considera el nivel de actividad, las características de la ropa, la temperatura seca, la humedad relativa, la temperatura radiante media, la velocidad del aire entre otros factores. Todas estas variables influyen en los intercambios térmicos hombre-entorno, afectando a la sensación de confort.

El *método de Fanger*, es en la actualidad uno de los más extendidos para la estimación del confort térmico. Calcula dos índices denominados Voto medio estimado (*PMV-predicted mean vote*) y Porcentaje de personas insatisfechas (*PPD-predicted percentage dissatisfied*), que indican la sensación térmica media de un entorno y el porcentaje de personas que se sentirán inconfortables en un ambiente determinado. Esto resulta de gran interés no solo cuando se trata de evaluar una situación sino también cuando se pretende proyectar o modificar un ambiente térmico. La importancia y aplicación generalizada del método queda patente en su inclusión como parte de la norma ISO 7730 relativa a la evaluación del ambiente térmico (*Diego-Mas, José Antonio. Evaluación del confort térmico con el método de Fanger. Ergonautas, Universidad Politécnica de Valencia, 2015.*).

Este modelo es aplicable solo a zonas de interior, dado que no tiene cuenta la radiación solar directa y velocidades del viento superiores a 1 m/s, por lo que su aplicabilidad en exterior solo es una referencia aproximada.

El Voto medio estimado es un índice que refleja el valor medio de los votos emitidos por un grupo numeroso de personas respecto a una situación dada en una escala de sensación térmica de 7 niveles (frío, fresco, ligeramente fresco, neutro, ligeramente caluroso, caluroso, muy caluroso), basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano (la diferencia entre la producción interna de calor del cuerpo y su pérdida hacia el ambiente).

El Voto medio estimado predice el valor medio de la sensación térmica, no obstante, los votos individuales se distribuirán alrededor de dicho valor medio, por lo que resulta útil estimar el porcentaje de personas insatisfechas por notar demasiado frío o calor, es decir aquellas personas que considerarían la sensación térmica provocada por el entorno como desagradable.

Aplicación del método

Mediante el cálculo del Voto medio estimado (PMV), el método Fanger permite valorar la sensación térmica global correspondiente a determinado ambiente térmico. El cálculo del Porcentaje de personas insatisfechas (IIP) permitirá predecir el porcentaje de personas que considerarán dicha situación como no confortable.

Aplicar el método de Fanger para valorar el confort térmico de un determinado entorno supone aplicar los pasos del siguiente procedimiento:

- Recopilación de información sobre el entorno
 - ◆ Aislamiento de la ropa de los trabajadores en el entorno

- ◆ Tasa metabólica de la actividad desarrollada
- ◆ Características ambientales del entorno
 - Temperatura del aire
 - Temperatura radiante
 - Humedad relativa o presión parcial del vapor de agua
 - Velocidad relativa del aire
- Cálculo del Voto medio estimado (PMV)
- Cálculo de Porcentaje estimado de insatisfechos (PPD) a partir del valor del PMV.
- Análisis de resultados
 - ◆ Valoración de la situación (satisfactoria o no adecuada) en función del valor del PMV y del PPD
 - ◆ Análisis del balance térmico correspondiente a las condiciones evaluadas

Limitaciones del método

Es necesario considerar ciertas limitaciones en la aplicabilidad del método de Fanger. Según las recomendaciones de la norma ISO 7730 "Ergonomía del ambiente térmico", el índice del Voto medio estimado (PMV) sólo debería utilizarse para evaluar ambientes térmicos en los que las variables implicadas en el cálculo permanecieran comprendidas dentro de los siguientes intervalos (que equivalen a ambientes térmicos entre frescos (-2) y calurosos (2)):

- Tasa metabólica comprendida entre 46 y 232 W/m² (entre 0,8 met. y 4 met).
- Aislamiento de la ropa entre 0 y 0,31 m² K/W (0 clo. y 2 clo).
- Temperatura del aire entre 10°C y 30°C.
- Temperatura radiante media entre 10°C y 40°C.
- Velocidad del aire entre 0 m/s y 1 m/s.
- Presión del vapor de agua entre 0 y 2700 Pa.

El método está especialmente diseñado para el estudio de condiciones ambientales estacionarias, aunque resulta una buena aproximación ante pequeñas variaciones de las condiciones en estudio utilizándose en este caso valores medios ponderados en el tiempo (en concreto en la hora precedente).

Estimación del aislamiento de la ropa

Para aplicar el método es necesario conocer el grado de aislamiento de la ropa. En teoría debería existir una adaptación del aislamiento de la ropa para cada condición climatológica, tanto espacial como temporal (a lo largo del año y a lo largo del día). Sin embargo, para hacer posibles las comparativas, entre escenarios y localidades, se ha optado por un aislamiento térmico variable entre meses y hora del día (distinción de horas diurnas y nocturnas), ya que en caso contrario, cualquier variación del confort climático puede ser enmascarado por la modificación del aislamiento con la ropa, por lo que se dejan constantes los parámetros entre periodos climáticos, escenarios y modelos (tabla 1).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Nocturno	2.00	1.70	1.50	1.50	1.00	0.80	0.50	0.40	0.50	1.50	1.70	2.00
Diurno	1.50	1.20	1.00	1.00	0.65	0.50	0.30	0.20	0.30	1.00	1.20	1.50

Tabla 1. Aislamiento de la ropa en clo. por mes y hora del día (nocturno y diurno). 1 tog. = 0.155 m²K/W

Las unidades para medir el aislamiento térmico de la ropa son el clo. y los metros cuadrados kelvin por vatio (m^2K/W). Para la obtención del Voto Medio Estimado se requiere el valor del aislamiento de la ropa medido en m^2K/W . Si se dispone de la medida en unidades clo. se aplicará la siguiente conversión: 1 clo. = 0,155 m^2K/W .

La Tasa metabólica

La tasa metabólica mide el gasto energético muscular que experimenta el trabajador cuando desarrolla una tarea. Gran parte de dicha energía es transformada directamente en calor, y una pequeña parte en trabajo efectivo. Aproximadamente sólo el 25% de la energía es aprovechada en realizar el trabajo, el resto se convierte en calor.

En el modelo implementado para este proyecto se ha tomado una tasa metabólica y eficiencia constante en todas las condiciones de 110 W/m^2 y 20% respectivamente.

Caracterización térmica del entorno

Las características térmicas del entorno que es necesario medir para la aplicación del método son:

- La temperatura del aire medida en grados Celsius.
- La temperatura radiante media medida en grados Celsius, que se corresponde con el intercambio de calor por radiación entre el cuerpo y las superficies que lo rodean. La temperatura radiante media se puede calcular a partir de los valores medidos de la temperatura seca, la temperatura de globo y la velocidad relativa del aire leídas empleando un psicrómetro y mediante la siguiente ecuación:

$$T_{rm} = T_g + 1.9 \cdot \sqrt{V_a} \cdot (T_g - T_s)$$

donde:

$T_{rm} \Rightarrow$ temperatura radiante media medida ($^{\circ}C$)

$T_g \Rightarrow$ temperatura de globo medida ($^{\circ}C$)

$V_a \Rightarrow$ velocidad del aire medida (m/s)

$T_s \Rightarrow$ temperatura de termómetro seco ($^{\circ}C$)

- La humedad relativa medida en porcentaje. El método permite también realizar los cálculos empleando la presión parcial del vapor de agua medida en Pa.
- La velocidad relativa del aire. Medida en metros por segundo (m/s).

Cálculo del voto medio estimado (PMV)

El Voto medio estimado es un índice que refleja el valor medio de los votos emitidos por un grupo numeroso de personas respecto a una situación dada en una escala de sensación térmica de 7 niveles (frío, fresco, ligeramente fresco, neutro, ligeramente caluroso, caluroso, muy caluroso), basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano.

Para realizar el cálculo se empleará la ecuación de confort de Fanger. Se trata de una ecuación paramétrica cuya resolución requiere de cálculos iterativos (25 iteraciones máximas usadas en este modelo).

$$PMV = (0.303 \cdot e^{-0.036 \cdot M} + 0.028) \cdot \{ (M - V) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - V) - p_a] - 0.42 \cdot [(M - V) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \}$$

donde:

$PMV \Rightarrow$ voto medio estimado

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - V) - I_{cl} \{ 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \}$$

$$h_{cl} = \begin{cases} 2.38 \cdot [t_{cl} - t_a]^{0.25} \Leftarrow 2.38 [t_{cl} - t_a]^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \Leftarrow 2.38 [t_{cl} - t_a]^{0.25} \leq 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$h_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot l_{cl} \Leftarrow l_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2/\text{w} \\ 1.05 + 0.645 \cdot l_{cl} \Leftarrow l_{cl} > 0.078 \text{ m}^2/\text{w} \end{cases}$$

$M \Rightarrow$ tasa metabólica (W/m^2)

$V \Rightarrow$ trabajo efectivo (W/m^2)

$l_{cl} \Rightarrow$ aislamiento de la ropa ($m^2 \cdot K/W$)

$f_{cl} \Rightarrow$ factor de superficie de la ropa

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

$t_r \Rightarrow$ temperatura radiante media ($^{\circ}C$)

$v_{ar} \Rightarrow$ velocidad relativa del aire (m/s)

$p_a \Rightarrow$ presión parcial de vapor del agua (*pascales*)

$h_c \Rightarrow$ coeficiente de transmisión del calor por convección ($W/m^2 \cdot K$)

$t_{cl} \Rightarrow$ temperatura de la ropa ($^{\circ}C$)

Los valores de PMV van desde +3 "Muy caluroso" hasta -3 frío (tabla 2)

PMV	Sensación térmica
+3	Muy caluroso
+2	Caluroso
+1	Ligeramente caluroso
0	Neutro
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frío

Tabla 2. Sensación térmica en función del valor del voto medio estimado.

Cálculo Índice de Insatisfacción Previsible (IIP)

Conocido el voto medio estimado es posible calcular el porcentaje de personas insatisfechas en el entorno térmico evaluado. Este índice estima la dispersión de los votos de las personas alrededor del PVM obtenido, y representa el porcentaje de personas que considerarían la sensación térmica como desagradable, demasiado fría o calurosa.

Para realizar el cálculo se emplea la siguiente ecuación:

$$IIP = 100 - 95 \cdot e^{-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.02179 \cdot PMV^2}$$

Cálculo del "CCH. Voto medio esperado diurno." (PMVD).

El "Voto medio esperado diurno" $PMVD_p^m$ (adimensional) es calculado mediante el voto medio estimado (PMV) particularizado para la temperatura $Tmax_p^m$ y humedad $Hmax_p^m$ en los periodos anual, mensual y estacional (p) (anual, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, invierno, primavera, verano y otoño), para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100).

Cálculo del “CCH. Voto medio esperado nocturno.” (PMVN).

El “Voto medio esperado nocturno” $PMVN_p^m$ (adimensional) es calculado mediante el voto medio estimado (PMV) particularizado para la temperatura $Tmin_p^m$ y humedad $Hmin_p^m$ en los periodos anual, mensual y estacional (p) (anual, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, invierno, primavera, verano y otoño), para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100).

Cálculo del “CCH. Índice de insatisfacción esperado diurno.” (IIPD).

El “índice de insatisfacción esperado diurno” $IIPD_p^m$ (adimensional) es calculado mediante el índice de insatisfacción esperado (IIP) particularizado para la temperatura $Tmax_p^m$ y humedad $Hmax_p^m$ en los periodos anual, mensual y estacional (p) (anual, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, invierno, primavera, verano y otoño), para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100).

Cálculo del “CCH. Índice de insatisfacción esperado nocturno.” (IIPN).

El “índice de insatisfacción esperado nocturno” $IIPN_p^m$ (adimensional) es calculado mediante el índice de insatisfacción esperado (IIP) particularizado para la temperatura $Tmin_p^m$ y humedad $Hmin_p^m$ en los periodos anual, mensual y estacional (p) (anual, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, invierno, primavera, verano y otoño), para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100).

Cálculo del “CCH. Horas de insatisfacción esperadas (51%) por calor.” (HIPC).

Las “horas de insatisfacción esperadas por calor” $HIPD_p^m$ (horas) son calculadas mediante el índice de insatisfacción esperado diurno $IIPD_p^m$ particularizado para el 51% de la población, con el amanecer y atardecer correspondiente a cada mes (tabla 3), en los periodos anual, mensual y estacional (p) (anual, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, invierno, primavera, verano y otoño), para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100).

Cálculo del “CCH. Horas de insatisfacción esperadas (51%) por frío.” (HIPF).

Las “horas de insatisfacción esperadas por frío” $HIPF_p^m$ (horas) son calculadas mediante el índice de insatisfacción esperado nocturno $IIPN_p^m$ particularizado para el 51% de la población, con el amanecer y atardecer correspondiente a cada mes (tabla 3), en los periodos anual, mensual y estacional (p) (anual, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, invierno, primavera, verano y otoño), para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Amanecer	8.5	8.0	7.5	8.0	7.0	7.0	7.0	7.5	8.0	8.5	8.0	8.5
Atardecer	18.5	19.0	19.5	21.0	21.5	21.5	21.5	21.0	20.5	20.0	18.0	18.0

Tabla 3. Hora del amanecer y atardecer.

La nomenclatura del nombre del fichero que almacena los datos de la variable “CCH. Voto medio esperado diurno.” es la siguiente:

pmvd_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

pmvd = alias de “CCH. Voto medio esperado diurno.”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual

La nomenclatura del nombre del fichero que almacena los datos de la variable “CCH. Voto medio esperado nocturno.” es la siguiente:

pmvn_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

pmvn = alias de “CCH. Voto medio esperado nocturno.”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual

La nomenclatura del nombre del fichero que almacena los datos de la variable “CCH. Índice de insatisfaccion esperado diurno.” es la siguiente:

iipd_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

iipd = alias de “CCH. Índice de insatisfaccion esperado diurno.”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual

La nomenclatura del nombre del fichero que almacena los datos de la variable “CCH. Índice de insatisfaccion esperado nocturno.” es la siguiente:

iipn_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

iipdn = alias de “CCH. Índice de insatisfaccion esperado nocturno.”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual

La nomenclatura del nombre del fichero que almacena los datos de la variable “CCH. Horas de insatisfacción esperadas (51%) por calor.” es la siguiente:

hipc_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

hipc= alias de “CCH. Horas de insatisfacción esperadas (51%) por calor.”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual

La nomenclatura del nombre del fichero que almacena los datos de la variable “CCH. Horas de insatisfacción esperadas (51%) por frío.” es la siguiente:

hipf_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

hipf= alias de “CCH. Horas de insatisfacción esperadas (51%) por frío.”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual