



Guía metodológica para determinar el efecto del discomfort térmico sobre operaciones industriales estandarizadas

Methodological guide for determining the effect of thermal discomfort on standardized industrial operations

Robinson Pacheco García¹, César Augusto García Ubaque², Juan Carlos García Ubaque³

Fecha de recepción: 11 de noviembre de 2015

Fecha de aceptación: 23 de agosto de 2016

Cómo citar: Pacheco García, R., García Ubaque, C. A., & García Ubaque, J. C. (2016). Guía metodológica para determinar el efecto del discomfort térmico sobre operaciones industriales estandarizadas. *Revista Tecnura*, 20(Edición especial), 122-131. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.SE1.a09

RESUMEN

Objetivos: Diseñar una metodología que permita determinar el grado de incidencia del confort térmico en los tiempos requeridos para realizar una actividad productiva.

Método: Se siguieron las metodologías y normas internacionales asociadas al confort térmico establecidas en la norma ISO 7730.

Resultados: Se plantearon dos escenarios. En primer lugar, la definición de zona de confort térmico; en segundo lugar, la determinación de la incidencia del malestar térmico sobre tiempos productivos.

Conclusión: La propuesta metodológica es experimental; sin embargo, reúne elementos fundamentados en normas internacionales hacia la medición del confort térmico en el marco de la ergonomía ambiental. Además, se complementa esta propuesta con herramientas matemáticas de soporte estadístico que han demostrado sus bondades en análisis de datos y en el modelo que permite establecer la pérdida de productividad y grado de insatisfacción en función de la sensación térmica.

Palabras Clave: ergonomía ambiental, confort térmico, tiempo estándar.

ABSTRACT

Objectives: To design a methodology to determine the degree of incidence of thermal comfort in times of productive activity.

Method: For the development of this work, we followed the international methodologies and standards associated with thermal comfort established in ISO 7730.

Results: We considered two scenarios: first, the definition of thermal comfort zone; and second, the determination of the incidence of thermal discomfort over productive times.

Conclusion: This is an experimental methodological proposal; however, it brings together elements based on international standards of thermal comfort related to environmental ergonomics. In addition, we complement this proposal with mathematical tools of statistical support for data analysis that allows to establish the loss of productivity and degree of dissatisfaction as a function of the thermal sensation.

Keywords: environmental ergonomics, thermal comfort, standard time.

- 1 Ingeniero Industrial, magister en Gerencia Ambiental. Docente de planta Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: rpachecog@udistrital.edu.co
- 2 Ingeniero Civil, especialista en Manejo Integrado del Medio Ambiente, magister en Ingeniería Civil, doctor en Ingeniería. Docente de Planta Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: cagarciau@udistrital.edu.co
- 3 Médico, magister Salud Pública, doctor en Salud Pública. Docente de Planta Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Contacto: jcgarciau@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

Existen varias normas relacionadas con la evaluación de entornos de trabajo y algunas condiciones particulares que afectan la percepción que un trabajador puede tener sobre el disconfort térmico, entre las cuales se destacan la norma ISO 7730, versión 1994, que establece la fijación de índices y la especificación de las condiciones para el bienestar térmico en ambientes moderados, donde la valoración final se expresa a través de dos índices: 1) el índice PMV (del inglés Predicted Mean Vote) y 2) el índice PPD (del inglés Predicted Percentage of Dissatisfied); el primero o PMV reporta la estimación de sensación térmica, mientras que el PPD proporciona información sobre el grado de incomodidad.

Así mismo, se destaca la norma ISO 7726, versión 1998, en cuanto a instrumentación y métodos recomendados para la medición de las variables ambientales. Las normas ISO 8996, versión 1990, e ISO 9920, versión 1995, abordan temas sobre ergonomía y generación de calor metabólico, considerando aspectos de estimación en aislamiento térmico y resistencia a la evaporación que ofrece la indumentaria de un trabajador.

Con este propósito se empieza abordando los conceptos básicos que involucra la norma ISO 7730 en lo referente a temperatura de neutralidad o confort en conjunto con las otras normas anteriormente citadas (ISO 7726, ISO 8996 e ISO 9920) y el uso de la matemática aplicada para establecer los niveles de correlación estadística e inferencia entre variables; conceptos sobre los cuales se pondrá una metodología para calcular la temperatura de neutralidad (zona de confort térmico) a partir de los indicadores PMV y PPD. Se establecerá la potencial incidencia del disconfort térmico sobre los tiempos estándar de proceso para definir la selección de suplementos adecuados en su cálculo; todo lo anterior tomando como referencia un estudio desarrollado por la Universidad Tecnológica de Loughborough en Países Bajos, con base en un modelo de balance térmico (Gagge, Fobelets, & Berglund, 1986).

La ergonomía ambiental

Considerando que la ergonomía es la adaptación del medio al hombre, no solo encasillado al lugar de trabajo sino que se aplica a todo el entorno de las personas desde el ámbito laboral, el hogar, el transporte y el deporte, entre otros; en los últimos años desde 1949, cuando se fundó la sociedad de investigación en ergonomía (Ergonomics Research Society), el término se orientó hacia la humanización del trabajo y el confort laboral, mediante la determinación científica de los puestos de trabajo y la adaptación al medio o hábitat, de lo cual se deriva el término *ergonomía ambiental* (Melo, 2009). Por definición la ergonomía ambiental es la rama de la ergonomía que estudia los factores del medio ambiente que inciden en el comportamiento, rendimiento, bienestar y motivación del trabajador condicionando su confort en el trabajo a variables como el ruido, la temperatura, la humedad, la iluminación, las vibraciones, etc. (CROEM, 2008).

En este sentido conviene resaltar que un ambiente que no reúne las condiciones ambientales adecuadas afecta la capacidad física y mental del trabajador, por lo que la ergonomía ambiental analiza los factores del entorno para prevenir su influencia negativa, logrando con ello un mayor confort y bienestar del trabajador para un óptimo rendimiento sin dejar de lado otros condicionamientos como los correspondientes al ambiente psicosocial, derivados de la organización del trabajo, las relaciones entre los individuos y la personalidad de cada uno de ellos.

Entre los factores que analiza la ergonomía ambiental se toma como referencia el que corresponde al confort térmico, considerando que de todos los factores enunciados es el único que presenta una interacción compartida con el trabajador; lo anterior por cuanto existen condiciones de la temperatura del entorno que afectan al trabajador, pero a su vez en el individuo también se generan condiciones internas a nivel calórico asociado con su metabolismo, lo cual particulariza aún más esta variable ambiental si consideramos además el

lugar geográfico en donde se encuentra la empresa, la fisiología del trabajador, el tipo de actividad que desarrolla y hasta la dieta, por el contenido calórico que aporta a su temperatura corporal.

Principios del confort térmico

A partir de los estudios sobre temperatura ambiental desarrollados por Ole Fanger hacia el año 1970 se definió la norma internacional ISO 7730, que determina los índices y la especificación de las condiciones para el bienestar térmico en ambientes moderados (PMV y PPD), considerando la respuesta de las personas al medio térmico implementando principios de la física y la fisiología por transferencia de calor.

Sin embargo, el origen de la norma ISO 7730 y las demás relacionadas a la evaluación del confort térmico como las ISO 7726, ISO 8996 e ISO 9920 tienen su origen en países con contextos diversos, por lo que algunos componentes presentan dificultad en el momento de calcularse y requieren ajuste al realizar el trabajo de campo. De hecho, los

problemas surgen cuando se utilizan índices racionales porque en algunos casos requieren el conocimiento de aislamiento de la ropa y la tasa metabólica de los individuos, lo cual no es fácil de estimar sin dejar de lado la dificultad para medir con precisión las condiciones ambientales; esto ha contribuido al desarrollo del enfoque de adaptación al confort térmico, basado en los resultados de las encuestas de confort térmico al realizar el trabajo de campo; enfoque basado en la resiliencia para buscar un estado de equilibrio cuando una persona después de experimentar una molestia tiende a restaurar su estado inicial de comodidad, lo que se aplica a variables térmicas como temperatura, humedad y velocidad del aire (Nicol & Humphreys, 2001).

Para el cálculo de PMV se recurrirá a la fórmula establecida por Ole Fanger de la norma ISO 7730 (ecuación (1)).

$$PMV = t_3 \cdot (M - W - E_d - E - E_{res} - C_{res} - R - C) \quad (1)$$

Donde las variables relacionadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Variables involucradas en el cálculo del PMV.

Var.	Descripción	Valor	Unidades
t_s	Coefficiente de transferencia de sensación térmica.	$0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028$	m^2/W
W	Energía metabólica producida por el organismo	W	W/m^2
M	Trabajo mecánico externo	M	W/m^2
E_d	Pérdida de calor por difusión de agua por la piel	$3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a]$	W/m^2
E	Pérdida de calor por evaporación de sudor	$0,42 \cdot [(M - W) - 58,15]$	W/m^2
E_{res}	Pérdida de calor latente por respiración	$1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 \cdot p_a)$	W/m^2
C_{res}	Pérdida de calor sensible por respiración	$0,0014 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (34 - t_a)$	W/m^2
R	Pérdida de calor por radiación	$3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{clo} \cdot [(t_{clo} + 273)^4 - (TRM + 273)^4]$	W/m^2
C	Pérdida de calor por convección	$f_{clo} \cdot h_c \cdot (t_{clo} - t_a)$	W/m^2

Fuente: Elaboración propia

Aplicando a su vez la escala de sensación térmica que aparece en la tabla 2, se establecerá un diagrama de dispersión entre el PMV obtenido y la temperatura operativa para cada trabajador evaluado, con lo que, mediante la ecuación obtenida y un rango PMV definido sobre el punto neutro (cero) se obtiene la zona de confort térmico, lo cual se puede validar gráficamente y corresponde al mayor porcentaje de personas satisfechas cuando perciben que las sensaciones térmicas reales y las que desean coinciden.

Tabla 2. Escala de sensación térmica.

PMV	PPD	Sensación
+3	99%	Muy caluroso
+2	77%	Caluroso
+1	26%	Ligeramente caluroso
0	5%	Confort (neutro)
-1	26%	Ligeramente frío
-2	77%	Frío
-3	99%	Muy frío

Fuente: Elaboración propia

La estandarización del tiempo en operaciones industriales

Todo trabajador experimentado cuando logra dominio sobre la actividad que realiza, llega a un nivel de desempeño estándar cuando trabaja en condiciones adecuadas a un ritmo ni muy rápido ni muy lento; sin embargo, en los trabajadores pueden existir diferencias individuales considerables inherentes a la capacidad física, la salud, el conocimiento del oficio, la destreza física y la capacitación, lo cual hace que unos trabajadores sean mejores que otros en términos de rendimiento (Niebel & Freivalds, 2009).

Este rendimiento se determina con un estudio de tiempos, donde a partir de un marco estadístico se define un tamaño de observaciones adecuadas, dependiendo del tiempo promedio de duración

de la operación (TP), lo cual garantiza el nivel de confiabilidad de la muestra para operaciones manuales, lo que incluso también se puede obtener mediante tablas previamente definidas, como las manejadas por las compañías General Electric y Westinghouse.

Posteriormente a la toma de tiempos de estas muestras se procede a establecer una serie de suplementos que en primera instancia se asocian a la calificación de la actuación y corresponden a criterios de habilidad, condiciones del lugar de trabajo, consistencia y esfuerzo, con lo cual se llega a definir el tiempo normal (ver la ecuación 2); sin embargo, esta primera valoración resulta difusa si se tiene en cuenta que la asignación se realiza por medio de tablas que comercialmente fueron creadas por la compañía Westinghouse dedicada a la producción de aparatos eléctricos y componentes electrónicos; donde las condiciones, según la tabla 3 oscilan desde un valor máximo equivalente a +0,06 con características ideales (letra A) hasta un valor mínimo con -0,07 con características de malo (letra F), combinando los aspectos de temperatura, ventilación, luz y ruido, sin establecer niveles de diferenciación.

Tabla 3. Sistema Westinghouse para calificar condiciones.

+0,06	A	Ideal
+0,04	B	Excelente
+0,02	C	Bueno
0,00	D	Promedio
-0,03	E	Aceptable
-0,07	F	Malo

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, y para definir finalmente el tiempo estándar de una operación industrial se utiliza la ecuación 3, donde a partir del tiempo normal nuevamente se establecen unos suplementos que la Organización Internacional del Trabajo (OIT) ha recomendado y que tienen que ver con tres factores

relacionados con el individuo, con la naturaleza del trabajo y con el medio ambiente; donde por fin se hace una diferenciación en este último hacia condiciones de calor y humedad, pero se deja a criterio del analista la asignación del suplemento desde un valor cero (0) hasta un valor cien (100), con lo cual se sigue manteniendo la situación difusa y subjetiva de asignación, lo cual se vislumbra como una inducción a error mientras el estudio no se particularice hacia las condiciones ideales de un tipo de industria previamente definido y se recurra a técnicas estadísticas de correlación de variables para volver más objetiva la asignación del suplemento, lo cual se corregirá de cierta manera con la propuesta metodológica.

Tiempo normal

$$TN = TP * (1 \neq \% \text{ de Calificación de Actuación}) \quad (2)$$

Tiempo estándar

$$TS = TN * (1 + \% \text{ Suplemento}) \quad (3)$$

Para reafirmar la subjetividad en la asignación de suplementos basta con revisar la posición de la OIT cuando a través de los años no reconoce como válida la aplicación universal de ninguna norma en particular, solo se limita a hacer recomendaciones en el uso de las tablas con la salvedad de que nunca adoptará normas relativas a la determinación de suplementos (Kanawaty, 2004).

Correlación entre variables de confort térmico y tiempo

Para poder determinar la incidencia entre variables correspondiente al disconfort térmico sobre el tiempo estándar de una operación industrial se puede recurrir a la estadística multivariada, la cual comprende un conjunto de técnicas o métodos estadísticos cuya finalidad es analizar simultáneamente información relativa a múltiples variables

para cada individuo o elemento estudiado. Algunos de estos métodos son puramente descriptivos de los datos muestrales, mientras que otros utilizan dichos datos muestrales para hacer inferencias acerca de parámetros poblacionales; entre los propósitos de estas técnicas podemos citar el describir información en forma resumida, agrupar observaciones o variables en subconjuntos homogéneos, explorar la existencia de asociaciones entre variables y explicar (o probar) comportamientos, estas últimas como parte fundamental en el desarrollo del estudio sobre confort térmico y tiempo estándar de operación.

Para el planteamiento de la metodología se define el método de interdependencia, esto en razón de que no distingue entre variables dependientes e independientes, sino que tiene como objetivo identificar qué variables pueden estar relacionadas entre sí, cómo lo están y por qué (Ordaz, Melgar y Rubio, 2010).

Uno de los temas involucrados en el estudio corresponde a la regresión, cuyo término se acuñó para denotar todos aquellos modelos que explican la dependencia de una variable (y) respecto a otra/s (x). El planteamiento de estos modelos se basa en calcular la esperanza condicionada de la variable "y" con respecto a la variable "x", ya que esta esperanza condicionada (media condicionada) es la mejor predicción que podemos dar de la variable "y" conociendo la "x". Si "x" no tiene información relevante de "y", la esperanza condicionada de "y" respecto a "x" será simplemente la media de "y"; por lo que el problema de regresión se concretará en obtener las relaciones entre las variables "x" con "y" a partir de n pares de observaciones (x1, y1), ..., (xn, yn) (Febrero, Galeano, & Pateiro, 2008); para lo cual se relacionarán los registros de temperatura obtenidos en la empresa y en los individuos que se encuentren fuera de la zona de confort y se enfrentarán con los tiempos de registro para la realización de la operación.

PROPUESTA METODOLÓGICA

Etapa 1. Definir la zona de confort térmico

Establecimiento del tipo de empresa, método y dispositivos

Determine el tipo de empresa que pretenda estudiar y el número de ellas que muestralmente desde la estadística resulte representativo para la evaluación, considerando aspectos de georreferenciación en altura sobre el nivel del mar, condiciones de temperatura y pluviosidad para los meses del año seleccionados en el momento de evaluar el trabajo de campo, pues estas condiciones tendrán efecto sobre los dispositivos de medición, lo cual se espera pueda mantenerse estable.

Defina a su vez las operaciones que conforman el proceso en específico para seleccionar aquellos procedimientos que sean comunes y permitan establecer una población homogénea por integración de equipos y actividades, lo que permitirá reducir incertidumbre en el momento de calcular tasas metabólicas. Los datos que se espera recoger guardarán relación con la medición de variables ambientales, una encuesta sobre sensación térmica y la recolección de información para estimar las variables personales de los trabajadores; lo cual, de acuerdo con la norma ISO 7726, demandará en varios casos el uso de dispositivos especializados como un psicrómetro, un termómetro de globo y un termoanemómetro, entre otros.

Estimación de variables personales

En este paso los valores de la tasa metabólica y el aislamiento térmico de la ropa de trabajo necesarios para el cálculo del PMV, se deben estimar a partir de las tablas relacionadas en la norma ISO 8996 (1990) e ISO 9920 (1995); se deben aplicar cuestionarios, así como las observaciones de todos los otros factores que puedan influir en las mediciones o en las respuestas del grupo de prueba de los trabajadores. En los cuestionarios se debe incluir datos personales como la edad, el sexo, la

altura, el peso y la prenda usada por el individuo para la ejecución de su trabajo.

La recopilación de datos de campo

Se deben definir los períodos de tiempo para la realización del trabajo de campo y buscar los puntos de medición que puedan representar una condición térmica promedio para el grupo de personas evaluadas, buscando la manera de hacer la medición cuando el trabajador ya se encuentre plenamente acoplado a sus funciones y sus equipos estén a punto de funcionamiento.

Cálculos de la tasa metabólica

Para este punto se requiere tener en cuenta la tasa metabólica de cada actividad con relación al tiempo de realización, lo cual no es una tarea fácil si se considera que cada trabajador tiene períodos de descanso cortos (incluyendo pausas activas) y otros momentos de mayor demanda física; por lo que el resultado final será un valor ponderado de todos los cálculos particionados que surgen de la descomposición de movimientos para llegar a un valor medio de la tasa metabólica del ciclo de trabajo de acuerdo con la norma ISO 8996 (1990).

Determinación de aislamiento térmico por indumentaria

Este parámetro se calcula mediante la suma de los valores de aislamiento de las piezas individuales de la indumentaria de los trabajadores, calculados a partir de tablas como las de la norma ISO 7730 (1994) y la norma ISO 9920 (1995).

Cálculo de los PMV, estimación de las temperaturas operativas y definición de zona de confort térmico, para lo cual se organizan los datos totales de las temperaturas operativas de los empleados evaluados frente al PMV obtenido en un diagrama de dispersión y se aplica regresión lineal simple para la obtención de la zona de confort térmico (el rango del PMV sobre el punto neutro se asume, generalmente en escala de magnitud 0,5).

Etapa 2. Determinar la incidencia del disconfort sobre tiempo productivo

En este punto se analizarán las operaciones que garanticen un mayor nivel de homogeneidad en el tipo de proceso, en el uso de equipos similares y en los tiempos de procesamiento por unidad, para escoger entre ellas una muestra entre los datos ubicados fuera de la zona de confort térmico; esto con el fin de determinar por análisis estadístico si existe incidencia de la variable de disconfort térmico sobre los tiempos de la operación y las tasas de producción.

Esta etapa se complementa con los estudios constituidos como modelos termofisiológicos para evaluación de las personas; en particular, el modelo de dos capas de Gagge (the two-layer Gagge), implementado en los Países Bajos y liderado por la Universidad Tecnológica de Loughborough; cuantificando la pérdida de rendimiento en las personas a partir del balance térmico y estableciendo la relación del PPD en función del PMV (Roelofsen, 2002).

RESULTADOS

Por ser una propuesta metodológica experimental se exponen algunos escenarios que potencialmente podrían presentarse y apoyan la importancia de su implementación.

Etapa 1. Definición de zona de confort térmico

Se espera contar con un grupo de empresas dedicadas a la producción de un mismo tipo de artículo en una muestra estadísticamente confiable, con ubicación georreferenciada similar y con tiempos de procesamiento iniciales que contemplen el tiempo estándar por unidad con factor de velocidad y tolerancias definido; el cual será reevaluado al final de la propuesta metodológica.

Se debe establecer en cada empresa un número estadístico de empleados para efectuar las

mediciones y elaborar los registros de acuerdo con Fanger en la norma ISO 7730 (1994) en lo correspondiente a ropa (Clo), tasa metabólica, temperatura de bulbo (DBT), temperatura radiante significativa (MRT), velocidad del aire, humedad relativa (RH) y la temperatura operativa (OT) bajo encuesta según los parámetros de normas adicionales como ISO 7726, ISO 8996 e ISO 9920; lo cual se consignará en una tabla que incluirá número de la empresa, cantidad de empleados evaluados en cada una, temperatura operativa OT promedio y rango.

Se establece el diagrama de dispersión correspondiente al PMV de cada trabajador contra la temperatura operativa, se hace la regresión lineal simple (ecuación de la recta que pasa por la mayor cantidad de puntos) de los datos y se asume un rango en la escala de sensación térmica que rodee al punto neutro, con lo cual se obtiene $-0,5 \leq PMV \leq 0,5$ según se recomienda (Roelofsen, 2002); para lo cual se establece la ecuación $y = ax + b$, y reemplazando en ella los valores límite del PMV (-0,5 y 0,5), obteniendo con ello la zona de confort.

De esta regresión simple se define $a=4,8$ y $b=22$, donde $Y=4,8x+22,2$; por tanto, la zona de confort térmico para $-0,5 \leq PMV \leq 0,5$ queda entre $19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $24,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Etapa 2. Determinación de la incidencia de disconfort térmico sobre tiempos productivos

Se define para este caso como disconfort térmico la situación que empieza a generar molestia en el trabajador y que está fuera de la zona de confort térmico (ZCT), es decir, todos aquellos valores que para el ejemplo citado estén fuera de $19,8\text{ }^{\circ}\text{C} \leq ZCT \leq 24,6$. Teniendo en cuenta que en su gran mayoría estarían por encima de $24,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y que es necesario seleccionarlos por afinidad, es decir, por igual actividad productiva dentro del proceso.

Es necesario definir los tiempos estándar de referencia para cada operación dentro del proceso productivo seleccionado; los cuales estarán

ubicados precisamente en la zona de confort térmico (ZCT) y para lo cual existe la siguiente relación de proporcionalidad inversa:

“A menor tiempo por unidad, mayor tasa de producción y viceversa”.

Teniendo en cuenta que desde un comienzo se debe buscar trabajar con homogeneidad de procesos y actividades, se determinará un número de muestras y se efectuará la comparación de algunos valores frente a su tiempo estándar de referencia por cada una de las empresas, siempre y cuando sea viable realizarlo.

Como esta relación entre tiempo estándar por unidad y la tasa de producción definen la productividad de las empresas, se puede establecer la valoración del disconfort sobre la misma haciendo uso de los pasos definidos en el modelo termo-fisiológico de dos capas de Gagge, en donde como resultado de su investigación y por adaptación de varios investigadores en concordancia con los niveles expuestos por Fanger, al final establece que la pérdida de rendimiento se puede asociar a un análisis de regresión múltiple con ecuación (4).

$$P = b_0 + b_1PMV + b_2PMV^2 + b_3PMV^3 + b_4PMV^4 + b_5PMV^5 + b_6PMV^6 \quad (4)$$

Donde P es la variable dependiente correspondiente a la pérdida porcentual de rendimiento ($P \geq 0$) y los PMV obtenidos constituyen las variables independientes, que son multiplicados por unos coeficientes de regresión $b_0 - b_6$ definidos por el modelo como sigue en la tabla 4.

Con ello los investigadores han logrado predecir la percepción térmica y el grado de insatisfacción ante el clima, haciendo uso del método

descrito, utilizando los conceptos PMV y PPD para graficar la variable P de pérdida de rendimiento, como se ve en la figura 2 (Roelofsen, 2002).

Por eso en este caso se tomarán los PMV de una misma empresa entre las analizadas que estén fuera de la ZCT por el lado cálido, en razón de que por el lado frío no se encontraron datos inferiores a 19,8 °C, por lo que un ejemplo sería de la siguiente manera de acuerdo con la tabla 5.

Tabla 4. Coeficientes de regresión en la ecuación de pérdida de la productividad.

Coeficiente de regresión	Calculado para el lado frío de la zona de confort	Calculado para el lado cálido de la zona de confort
b0	1,2802070	-0,15397397
b1	15,995451	3,8820297
b2	31,507402	25,176447
b3	11,754937	-26,641366
b4	1,4737526	13,110120
b5	0,0	-3,1296854
b6	0,0	0,29260920

Fuente: Elaboración propia.

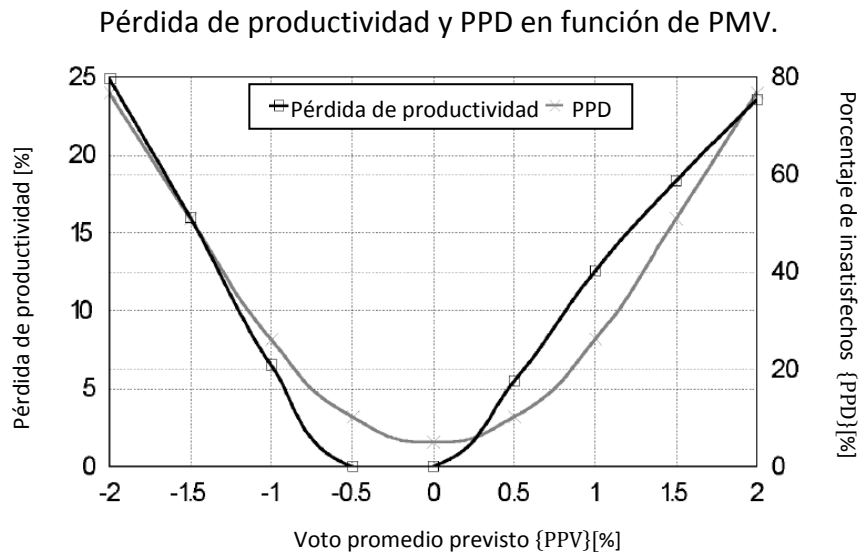


Figura 1. Pérdida de productividad y PPD en función de PMV.

Fuente: (Roelofsen, 2002).

Tabla 5. Registros PMV de empresa ejemplo con $-0,5 \leq PMV \leq 1,76$.

Tipo	PMV	PMV ₂	PMV ₃	PMV ₄	PMV ₅	PMV ₆
Número n	17	21	29	32	38	44
Valor	0,56	0,891	1,18	1,23	1,432	1,62

Fuente: Elaboración propia.

Con lo que P quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 &= -0,15397397 + (3,8820297)(0,56) + (25,176447)(0,891) + (-26,641366)(1,18) + (13,110120)(1,23) + (-3,1296854)(1,432) + (0,29260920)(1,62) \\
 &= -0,15397397 + 2,17936632 + 22,432214277 + 31,43681188 + 16,1254476 + 4,4817094928 + 0,474026904 \\
 &= 5,13 \%
 \end{aligned}$$

Lo cual significa que la pérdida de productividad no es tan alta, y de acuerdo con el gráfico representa un PPD cercano a 20% de incomodidad por muestras fuera de la zona de confort térmico (ZCT); información con la cual se establece una interpolación de datos y se reevalúa el tiempo estándar inicial de las operaciones.

CONCLUSIONES

La propuesta metodológica es experimental, pero sin embargo reúne una serie de elementos

fundamentados en normas internacionales hacia la medición del confort térmico en el marco de la ergonomía ambiental, complementada con herramientas matemáticas de soporte estadístico que han demostrado sus bondades en análisis de datos y en el modelo que al final permite establecer la pérdida de productividad y PPD en función del PMV, conocido como modelo de dos capas de Gagge, en concordancia con los niveles definidos por Ole Fanger en la norma ISO 7730.

Debe tenerse en cuenta que los ejemplos son ilustrativos y que esta clase de aplicaciones

requieren un mayor nivel de depuración para disminuir el margen de error presente en el momento de hacer el trabajo de campo; situación que es evidente cuando se asume un principio de homogeneidad en tiempos de producción y en el proceso, lo cual no será un trabajo sencillo cuando las condiciones dinámicas del entorno aumentan los niveles de incertidumbre en la realidad; sin embargo, se puede apreciar la viabilidad de la estadística aplicada por los resultados obtenidos y por las referencias utilizadas.

Finalmente, es necesario contextualizar de mejor forma el concepto de pérdida de rendimiento para un entorno específico, pues los estudios citados en este documento a manera de guía han mostrado sus bondades en algunos países de condiciones diversas muy diferentes a otros, por lo que es necesario validar la configuración de los coeficientes de regresión para cada caso particular.

REFERENCIAS

- CROEM (2008). *Prevención de riesgos ergonómicos*. Murcia: Instituto de Seguridad y Salud laboral Región de Murcia.
- Febrero, M.; Galeano, P., y Pateiro, B. (2008). *Estadística Ingeniería Técnica en Informática de sistemas*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- Gagge, A.; Fobelets, A., & Berglund, L. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 92 (1), 709-731.
- ISO (1998). ISO 7726. *Thermal environments-instruments and methods for measuring physical quantities*. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO (1994). ISO 7730. *Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO (1990). ISO 8996. *Ergonomics determination of metabolic heat production*. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO (1995). ISO 9920. *Ergonomics-estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Kanawaty, G. (2004). *Introducción al Estudio del Trabajo*. México, D.F.: Limusa-Noriega Editores.
- Melo, J. (2009). *Ergonomía práctica: guía para la evaluación ergonómica de un puesto de trabajo*. Buenos Aires: Fundación Mapfre.
- Nicol, J., & Humphreys, M. (2001). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Conference Proceedings of Windsor, Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century* (45-54). Oxford: Oxford Brookes University.
- Niebel, B., & Freivalds, A. (2009). *Ingeniería Industrial: métodos, estándares y diseño del trabajo*. México, D.F.: Interamericana Editores.
- Ordaz, J.; Melgar, M., y Rubio, C. (2010). *Métodos estadísticos y econométricos en la empresa y para finanzas*. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.
- Roelofsen, P. (2002). The impact of office environments on employee performance: The design of the workplace as a strategy for productivity enhancement. *Journal of Facilities Management*, 1 (3), 247-264.

