

# **Desarrollo de un Dispositivo Wearable para la Medición del Confort Térmico en Edificaciones**

Julio César Landa López

2023-10-10

# Tabla de contenidos

<b>Resumen</b>	<b>6</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>8</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>9</b>
<b>2 Antecedentes</b>	<b>13</b>
2.1 Confort térmico . . . . .	13
2.1.1 Confort térmico en México . . . . .	13
2.2 Evaluación de confort térmico a través de encuestas . . . . .	14
2.2.1 Escalas para el estado personal . . . . .	15
2.2.2 Escalas para describir el entorno físico . . . . .	15
2.3 Modelos predictivos de confort térmico . . . . .	16
2.3.1 Modelos para edificaciones con sistemas de aire acondicionado . . . . .	16
2.3.2 Modelos para edificaciones sin sistemas de aire acondicionado . . . . .	18
2.4 Estudios para generar modelos predictivos de confort térmico con mediciones de variables fisiológicas del ocupante . . . . .	20
2.5 Desarrollo de dispositivos . . . . .	21
<b>3 Metodología</b>	<b>24</b>
3.1 Elección de variables y sensores . . . . .	24
3.2 Elección de hardware y software . . . . .	24
3.3 Diseño del primer prototipo de wearable . . . . .	24
3.4 Diseño de encuesta de confort térmico en wearable . . . . .	24
3.5 Documentación del prototipo . . . . .	24
<b>4 Desarrollo del dispositivo</b>	<b>25</b>
4.1 Programación de encuestas . . . . .	25
4.2 Programación de sensores . . . . .	25
4.3 Implementación de la plataforma IoT . . . . .	25
4.4 Armado del primer prototipo de wearable . . . . .	25
4.5 Campaña de pruebas del primer prototipo . . . . .	25

<b>5 Conclusiones</b>	<b>26</b>
5.1 Discusión . . . . .	26
5.1.1 Interpretación de los resultados . . . . .	26
5.1.2 Contribuciones y limitaciones . . . . .	26
5.2 Conclusiones . . . . .	26
<b>Referencias</b>	<b>27</b>

# Listado de Figuras

2.1 Relación PMV-PPD . . . . .	17
--------------------------------	----

## Listado de Tablas

2.1	Escala unipolar . . . . .	15
2.2	Escala bipolar . . . . .	16
2.3	Valores de $e$ . . . . .	18

# Resumen

# Abstract

# Agradecimientos

Poner atención en el título, no convence “Medición de confort térmico”, no se puede medir el confort térmico



# 1 Introducción

El reporte de Cambio Climático 2023 del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) advierte sobre un probable aumento en la temperatura superior a 1.5°C entre los años 2021 y 2040, alcanzando hasta los 5.7°C para 2100 (Synthesis Report 2023). Para limitar este calentamiento, es imprescindible una reducción drástica de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Estas emisiones deben alcanzar su máximo antes del año 2025 y luego disminuir en un 43% para el año 2030, llegando a cero neto para el año 2050, conforme los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (2015).

Las emisiones de GEI generadas por el uso de energía representan el 73.2% a nivel global, y el uso de energía en edificaciones constituye el 17.5%, desglosado en un 6.6% en edificaciones no residenciales y un 10.9% en edificaciones residenciales (Ritchie 2020). En México, el sector residencial, comercial y público representa el 17.16% del consumo final de energía, de los cuales el 34.29% corresponden a consumo eléctrico (Secretaría de Energía 2023). En materia de eficiencia energética, el principal desafío que enfrentan los edificios no residenciales en México es su uso intensivo de electricidad (Lorentzen y McNeil 2020).

La eficiencia energética desempeña un papel crucial en la lucha contra el cambio climático al optimizar el uso de recursos. Avanzar hacia la eficiencia energética implica reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo cual favorece la descarbonización del sistema energético. Las fuentes de energías renovables pueden ser un aliado valioso en el camino a la eficiencia energética.

Además, es importante destacar que una parte esencial en la búsqueda de la eficiencia energética en edificaciones es la aplicación de estrategias de diseño bioclimático. Estas consisten en el diseño de la edificación de acuerdo al clima del lugar donde estará construida (Olgyay et al. 1963). Esto propicia tener espacios que satisfagan las necesidades y expectativas de los ocupantes, proporcionando condiciones de confort térmico para una mejor calidad de vida y productividad.

La digitalización energética tiene como objetivo contribuir a la eficiencia energética y la fiabilidad del sistema energético en su conjunto mediante el análisis de datos y la integración de tecnologías digitales en la producción, almacenamiento, distribución y consumo de energía. Esto implica el uso de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA) o el internet de las cosas (IoT) (Olabi, Abdelkarem, y Jouhara 2023). Esto favorece indirectamente a la sustentabilidad al respaldar la eficiencia energética y fortalecer la fiabilidad del sistema energético.

Si bien la digitalización energética es prometedora en este sentido para la eficiencia energética y la descarbonización, también presenta desafíos debido a que se espera un aumento en la demanda de energía a nivel global (Mitigation of Climate Change 2022). Para poder llevar a cabo un proceso de digitalización energética adecuado que permita lograr los objetivos de descarbonización, se debe buscar una democracia energética con tres perspectivas clave: soberanía popular, un gobierno participativo y propiedad civil (Judson, Fitch-Roy, y Soutar 2022).

En la búsqueda de un futuro sustentable, la transición hacia fuentes de energía renovables, tecnologías eficientes, edificaciones sustentables y una democracia energética son de vital importancia; aunado a la creciente necesidad de abordar la crisis climática, el consumo energético de edificaciones requiere de acciones inmediatas.

El confort térmico se define como una condición mental que expresa la satisfacción con el ambiente, y es un juicio cognitivo influenciado por procesos físicos, fisiológicos y otros factores (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017). Desempeña un papel esencial en el consumo de energía en edificaciones, pues está intrínsecamente ligado a la forma en que diseñamos las edificaciones. Una gran parte del consumo de energía en estas se ocupa en mantener condiciones óptimas de iluminación, temperatura y humedad del aire, buscando obtener espacios con condiciones adecuadas para que los ocupantes se encuentren confort térmico, lumínico y acústico.

Para el confort térmico se toman en cuenta siete variables físicas, las cuales están relacionadas a la transferencia de calor entre el ocupante y su entorno, así como a los modelos de predicción de confort térmico. Estas variables incluyen la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, temperatura radiante, presión atmosférica, aislamiento térmico de la ropa y nivel metabólico del ocupante (Enescu 2017). Asimismo, existen variables fisiológicas altamente relacionadas con el confort térmico que pueden servir como indicadores, tales como la temperatura de la piel, la frecuencia cardíaca y la variabilidad de la frecuencia cardíaca (Bogatu et al. 2023).

Durante la fase de diseño de una edificación, el empleo de modelos predictivos de confort térmico se convierte en una herramienta esencial para desarrollar estrategias efectivas de diseño bioclimático. Además, es crucial realizar encuestas de evaluación durante la ocupación para determinar el nivel de confort térmico y evaluar la efectividad de las estrategias implementadas durante la fase de diseño. Estas encuestas se basan principalmente en cuestionarios destinados a recabar la opinión de los ocupantes sobre su experiencia ambiental, mientras que las mediciones experimentales de las variables físicas que inciden en el entorno sirven como un respaldo fundamental (Aguirre 2021).

En este contexto, la transición hacia edificaciones sustentables no se trata solo de reducir el consumo energético, sino de hacerlo de manera eficiente sin comprometer el confort térmico, acústico y lumínico.

Existen diversos modelos que se utilizan para la predicción del confort térmico en edificaciones. Estos modelos se clasifican comúnmente en dos categorías: para edificaciones con sistemas de aire acondicionado y para edificaciones sin este tipo de sistemas. Entre los modelos para edificaciones con sistemas de aire acondicionado, el modelo más utilizado es el conocido como

método Fanger, este método se basa en las variables físicas relacionadas al confort térmico mencionadas previamente. Estas variables se utilizan en ecuaciones para calcular el índice de sensación térmica (PMV por sus siglas en inglés) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD por sus siglas en inglés) (Fanger 1970). Mientras que para los sistemas sin aire acondicionado existen algunos modelos como el PMV adaptativo o el PMV extendido (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017), entre otros, los cuales, se explicaran más a detalle en el siguiente capítulo.

Un problema es la precisión de los modelos existentes como el caso del método Fanger (PMV-PPD), un estudio realizado por Cheung et al. (2019) donde se determina la precisión del modelo con la base de datos de confort térmico global del ASHRAE, reporta que el PMV tiene una precisión del 34% respecto a la sensación térmica observada, mientras que el PPD puede llegar a sobrestimar la insatisfacción de los ocupantes. Esto da pie a continuar con la investigación y desarrollo de más modelos, como el caso de la implementación de algoritmos de aprendizaje automático.

En años recientes se han utilizado nuevas herramientas como el caso de los dispositivos wearables para el desarrollo de modelos de confort, la implementación de dichos dispositivos con sensores integrados, tienen la capacidad de medir variables ambientales y fisiológicas que permiten generar bases de datos que incluyan datos fisiológicos de los ocupantes y la obtención de modelos de confort más precisos.

En esta tesis se presenta el desarrollo de un prototipo de wearable con software y hardware libres que recopile y envíe datos sobre encuestas de confort térmico e información extra de variables fisiológicas a una plataforma de IoT, con el fin de crear una base de datos que permita el desarrollo de modelos de confort térmico. A continuación se presenta las contribuciones de este proyecto.

**Medición precisa y en tiempo real de variables fisiológicas:** El uso de un dispositivo wearable permite la captura directa de variables fisiológicas relacionadas al confort térmico, como la temperatura corporal y la frecuencia cardíaca.

**Monitoreo continuo y no intrusivo:** Al ser un dispositivo portable y de uso constante, este permite el monitoreo continuo y no intrusivo de las variables fisiológicas mencionadas previamente, facilitando la recopilación de datos a lo largo del tiempo, lo cual es fundamental para el análisis de patrones y tendencias en el confort térmico.

**Encuestas de confort térmico simplificadas:** La función de encuestas periódicas de confort térmico es una de las partes más importantes en el desarrollo del dispositivo para la creación de una base de datos. Estas encuestas permiten al usuario evaluar su nivel de confort térmico de manera rápida y sencilla.

**Contextualización de los datos de confort térmico:** Al integrarse el dispositivo a la red de Internet de las Cosas del Instituto de Energías Renovables junto con los demás dispositivos de medición de variables físicas previamente instalados en el instituto, permite contextualizar los datos de confort térmico del usuario en relación con las condiciones ambientales del entorno.

**Potencial desarrollo de modelos de confort térmico:** El desarrollo de este proyecto a un futuro puede tomar dos vertientes. Una en donde se puedan generar modelos de confort personalizados para cada individuo, favoreciendo a la digitalización energética y la automatización de espacios. Y la otra vertiente para generar modelos predictivos de confort térmico contextualizados para la comunidad del instituto.

## 2 Antecedentes

En este capítulo se presentan los antecedentes de este proyecto. Los estudios de confort térmico realizados en México. Se indaga más a profundidad los modelos predictivos, la evaluación de confort térmico a través de encuestas y los estudios para generar nuevos modelos de confort térmico

### 2.1 Confort térmico

Como se mencionó previamente en el capítulo anterior el confort térmico se define como una condición mental que expresa la satisfacción con el ambiente, y es un juicio cognitivo influenciado por procesos físicos, fisiológicos y otros factores (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017) y es de suma importancia en el diseño de las edificaciones sustentables.

#### 2.1.1 Confort térmico en México

En cuanto a investigación sobre confort térmico en México existen diversos estudios, tal es el caso del estudio realizado por Rincón-Martínez y Int (2019), donde se empleó la metodología del enfoque predictivo para estudiar el confort térmico en un grupo de estudiante en un laboratorio con ambiente controlado. Se realizaron pruebas experimentales con el propósito de calcular la temperatura neutra y los intervalos de confort térmico durante los periodos térmicos extremos de frío (enero) y calor (mayo). Llegaron a la conclusión de que los estudios de laboratorio son capaces de simular de manera adecuada las condiciones ambientales.

Otro caso de estudio realizado por Cetz y Azpeitia (2018) consistió en una muestra de 255 participantes donde midieron parámetros ambientales como la temperatura del aire, la temperatura radiante media y la velocidad del viento, obteniendo como resultado las temperaturas preferidas y aceptables en aulas con ventilación natural y aire acondicionado.

Por otro lado, el estudio de May-Tzuc et al. (2023) evaluó la viabilidad del modelo de confort térmico adaptativo en condiciones de clima cálido subhúmedo. Utilizaron dos modelos adaptativos, uno basado en la norma ASHRAE 55-2020 y otro de índole regional para la tipología climática tropical de México. Analizaron trece locaciones en el estado de Campeche. El estudio se centró en el ahorro energético en refrigeración. Mostraron que ambos modelos redujeron el uso de climatización, logrando un ahorro energético y una mejora del confort térmico.

Oropeza-Perez, Petzold-Rodriguez, y Bonilla-Lopez (2017) llevaron a cabo encuestas a 74 estudiantes voluntarios de la Universidad de las Americas Puebla (UDLAP) cuyas ciudades de origen están distribuidas en cuatro distintas regiones bioclimáticas de México. Llevaron a cabo las encuestas durante sus periodos vacacionales en invierno y verano, tanto en casas con sistemas de aire acondicionado como en casas sin ellos. Desarrollaron propuestas modelos de confort térmico adaptativos para las cuatro regiones. Sus resultados muestran que las personas en regiones áridas prefieren temperaturas interiores más altas en la temporada de frío y son capaces soportar temperaturas interiores más altas en la temporada de calor.

Martínez et al. (2020) se centraron en Ensenada, Baja California, analizando variables ambientales simultáneamente con la aplicación de cuestionarios para evaluar la temperatura del aire seco, la humedad relativa y la velocidad del viento, proporcionando así, una comprensión detallada del confort térmico en esta región.

Becerra-Santacruz y Lawrence (2016) llevaron a cabo un estudio a gran escala con aproximadamente 1800 participantes con la finalidad de comprender las condiciones térmicas en diferentes tipologías de viviendas, en él, se evaluaron variables como la temperatura del aire, la temperatura de globo negro, la velocidad del viento y la humedad relativa.

López-Pérez, Flores-Prieto, y Ríos-Rojas (2019) analizaron la percepción de confort térmico de los ocupantes en modo de aire acondicionado y ventilación natural en la región de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, para ello, se evaluaron la temperatura del aire, la temperatura del globo, la humedad relativa y la velocidad del aire.

Zepeda-Gil y Natarajan (2022) hicieron estudios de confort térmico en viviendas con ventilación natural en la zona urbana de Toluca con temperaturas invernales frías. Recopilaron datos ambientales y de ocupación, aplicaron encuestas bimestrales y se aplicaron los modelos de confort térmico adaptativo y el PMV. Los resultados destacan que solo el 42% de las horas de ocupación cumplían con los estándares de confort térmico, disminuyendo al 22% en invierno.

## **2.2 Evaluación de confort térmico a través de encuestas**

ISO 10551 (ISO, 2019) proporciona una guía sobre cómo construir escalas subjetivas. Los cinco tipos principales de escalas se pueden dividir en dos categorías: escalas utilizadas para el estado personal y escalas para describir el entorno físico. Las tres primeras escalas (perceptual, evaluativa y percepción) son para el estado personal y las dos últimas (aceptabilidad y satisfacción) son para el entorno físico. La aceptabilidad personal y la escala de satisfacción dan información de la opinión de los ocupantes sobre su entorno. Estas dos escalas deben aplicarse siempre después de los tres estados personales. Los principales tipos de escalas y el orden que sugieren aplicar en los cuestionarios son

La ISO 10551 (2019) establece escalas de juicio subjetivo para evaluar el entorno físico, con el objetivo de garantizar que los espacios sean diseñados teniendo en cuenta al usuario. La norma aborda cinco tipos principales de escalas, divididos en dos categorías: escalas para el estado

personal y escalas para describir el entorno físico. Las escalas para el estado personal son tres: perceptual, evaluativa y percepción. Mientras que para el entorno físico son dos: aceptabilidad y satisfacción.

Aguirre (2021) presenta las escalas de la siguiente manera:

### 2.2.1 Escalas para el estado personal

1. Escala de percepción del estado personal (¿Cómo te sientes ahora?): Se utiliza para comprender la percepción subjetiva del estado personal en un entorno específico. La escala puede ser unipolar o bipolar. Si es unipolar, se utiliza una graduación de 4 grados, que puede extenderse a 5 grados. El punto de origen se establece en 0, con grados de intensidad 1, 2, 3, (4). Si es bipolar, se utiliza una graduación de 7 grados, ampliables a 9 grados. El punto de indiferencia también es 0, pero esta escala tiene un polo A y un polo B. Los grados negativos de intensidad son -1, -2, -3, -4, siendo -4 el más cercano al polo A y -1 el más cercano a 0. Los grados positivos de intensidad son 1, 2, 3, 4, siendo 4 el más cercano al polo B y 1 el más cercano a 0. El 0 representa la ausencia de sensación en ambas escalas.
2. Escala evaluativa (¿Cómo te encuentras?): Evalúa el nivel de comodidad en un entorno. Es una escala unipolar de 4 grados ampliable a 5. El 0 representa comodidad y el polo representa la incomodidad extrema.
3. Escala de preferencia (¿Cómo preferirías estar?): Utiliza una escala bipolar simétrica con 7 grados para medir la preferencia de las personas respecto a ciertos aspectos del entorno. El 0 representa “sin cambio” en la preferencia.

### 2.2.2 Escalas para describir el entorno físico

1. Aceptabilidad: Esta escala se centra en la aceptabilidad a nivel personal del entorno. Tiene dos grados, se acepta o se rechaza.
2. Satisfacción: Se centra en la tolerancia al entorno. Es una escala de 5 grados. 0 es perfectamente tolerable, mientras que el polo es intolerable.

En las tablas 2.1 y 2.2 se observan las estructuras para las escalas unipolares y bipolares

Tabla 2.1: Escala unipolar

Punto de origen	Grados de intensidad	
0	1,2,3,(4)	Unipolar

Tabla 2.2: Escala bipolar

	Grados de intensidad	Punto de indiferencia	Grados de intensidad	
Polo A	(-4),-3,-2,-1	0	1,2,3,(4)	Polo B

## 2.3 Modelos predictivos de confort térmico

Para evaluar el confort térmico en edificaciones, se recurre a diversos modelos predictivos que se adaptan a condiciones específicas. Estos pueden dividirse en dos categorías: los modelos para edificaciones con sistemas de aire acondicionado y los modelos para edificaciones sin aire acondicionado.

### 2.3.1 Modelos para edificaciones con sistemas de aire acondicionado

#### 2.3.1.1 PMV

El Voto Medio Previsto o PMV por sus siglas en inglés está en función de las siete variables físicas que afectan al confort térmico: temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, temperatura radiante, presión atmosférica, nivel metabólico del ocupante y nivel de aislamiento térmico de la ropa. Dispone de una escala de sensación térmica de 7 puntos, donde -3 indica una sensación de mucho frío, 0 representa una sensación neutra y +3 representa una sensación de mucho calor. Este es un modelo pensado para edificaciones que cuenten con sistemas de aire acondicionado y está incluido en el ASHRAE55 (2017).

#### Agregar ecuación del PMV

#### 2.3.1.2 PMV-PPD

También conocido como el método de Fanger, es el modelo más utilizado y se basa en la combinación del PMV explicado previamente con el Porcentaje Previsto de Insatisfacción, o PPD por sus siglas en inglés. El PPD predice el porcentaje de personas insatisfechas en un ambiente en función del PMV. Este modelo fue propuesto por Fanger (1970). El PPD se calcula de la siguiente manera:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp \left( -0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2 \right)$$

El ASHRAE55 indica que el PPD no debe ser mayor al 10%, mientras que la ISO 7730 (2005) indica un valor menor al 10% para edificios nuevos y 15% para edificios ya existentes. En la Figura 2.1 observamos la relación entre el PMV y el PPD.





Figura 2.1: Relación PMV-PPD

## 2.3.2 Modelos para edificaciones sin sistemas de aire acondicionado

Existen dos tipos: los adaptativos y los no adaptativos

### 2.3.2.1 Adaptativos

#### ePMV

es una extensión del PMV, tal como su nombre lo indica *Extended Predicted Mean Vote*, fue propuesto por Fanger y Toftum (2002). Uno de los problemas al aplicar el PMV en ambientes sin aire acondicionado es que se sobrestima el voto de sensación térmica de calor en condiciones de clima cálido.

PMVe (Fanger y Toftum 2002): Es una modificación al PMV. Se observó que el PMV sobrestima el voto de sensación térmica de las personas en edificios sin aire acondicionado en climas cálidos, es por esto que se hizo una modificación al PMV. Proponen un factor de expectativa ( $e$ ) el cual está influenciado por la duración del clima cálido a lo largo del año y por la presencia de otros edificios en la región con sistemas de aire acondicionado.

En la Tabla 2.3 se observan los valores de  $e$  para los distintos casos.

Tabla 2.3: Valores de  $e$

Período Cálido	Edificios Cercanos con Aire Acondicionado	Valor ( $e$ )
Todo el año	No	0.5
Todo el año	Sí	0.7
Verano	No	0.7-0.8
Verano	Sí	0.8-0.9
Período corto en verano	-	0.9-1

Para el calculo del ePMV además de calcular el valor de  $e$ , se debe considerar el valor del estado metabólico del ocupante (MET). usualmente el MET se evalúa mediante cuestionarios que determinan el tiempo dedicado a actividades específicas como estar sentado, de pie o caminando. Sin embargo, esto no considera el comportamiento natural de las personas que al sentir calor tienden a reducir su actividad de manera inconsciente para adaptarse al clima, disminuyendo así su tasa metabólica. La solución propuesta para el ePMV es considerar esta reducción en la tasa metabólica en ambientes cálidos. Se considera una disminución del 6.7%.

De esta manera, para calcular el ePMV se deben seguir los siguientes pasos:

1. Calcular el PMV

2. Se calcula la nueva tasa metabólica de la siguiente manera:

$$M_{mod} = (0.067PMV)M$$

Donde  $M_{mod}$  es la tasa metabólica modificada y  $M$  es la tasa metabólica estimada para el PMV.

3. Se vuelve a obtener el valor del PMV utilizando  $M_{mod}$
4. Se multiplica el nuevo valor del PMV por el factor  $e$

### **aPMV**

*Adaptative Predicted Mean Vote*, es una adaptación del PMV y fue propuesta por Yao, Li, y Liu (2009). Es un modelo que toma en cuenta la sobrestimación del PMV de los ocupantes en edificios sin aire acondicionado. Se propone un coeficiente adaptativo  $\lambda$ , el cual se obtiene realizando encuestas de sensación térmica a los ocupantes del edificio, y en caso de que el edificio aún se encuentre en construcción, se busca un edificio con características similares. El aPMV se calcula de la siguiente manera:

$$aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda PMV}$$

### **2.3.2.2 No adaptativos**

#### **Índice Humidex Ontario**

Propuesto por Masterton, Richardson, y atmosphérique (1979). Representa en un solo valor cómo la temperatura y la humedad del aire afectan la sensación térmica. Utiliza datos recopilados en una encuesta a una muestra representativa de personas. Es un modelo exclusivo para climas cálidos. Se calcula de la siguiente manera:

$$Humidex = T + h$$

$$h = \frac{5}{9}(p_v - 10)$$

Donde  $T$  es la temperatura de bulbo seco en  $^{\circ}\text{C}$ .  $h$  es el factor de humedad, también en  $^{\circ}\text{C}$ .  $p_v$  es la presión de vapor en mbar.

#### **Índice Humidex Colima**

Es la misma ecuación que el Índice Humidex Ontario pero realizado con encuestas en la ciudad de Colima. Modifica la relación con la sensación térmica e incluye época de frío. (Gómez-Azpetia, Gómez, y Peña 2006)

## 2.4 Estudios para generar modelos predictivos de confort térmico con mediciones de variables fisiológicas del ocupante

Otro análisis importante es explorar e identificar que variables fisiológicas influyen en la evaluación del confort térmico. Indagando en la bibliografía, se encontraron estudios como el de S. Y. Sim et al. (2016) donde toman mediciones de la temperatura de la piel en 4 puntos (parte superior de la muñeca, arteria radial, arteria ulnar y punta del dedo índice), se menciona que por cuestiones de ergonomía y practicidad descartan la temperatura del dedo índice y tras la comparación de relación entre las temperaturas medidas y las encuestas de sensación térmica, obtuvieron que al combinar las 3 mediciones de la muñeca se obtenían mejores resultados con una mayor correlación Pearson (0.81) respecto a los votos de sensación térmica. Sin embargo, no representa una diferencia tan grande respecto a las correlaciones de los puntos individuales. Los resultados de las mediciones en la parte superior de la muñeca, como en la arteria radial son iguales (0.76), y deducen que la medición más conveniente es en la parte superior de la muñeca.

Bogatu et al. (2023) explican que existen diferentes variables que pueden servir como indicadores de confort térmico. En el estudio utilizan la temperatura en la parte superior de la muñeca y la frecuencia cardíaca, debido a que reportan que en estudios previos resultaron ser buenos indicadores, sobre todo el análisis de su variabilidad, reportan que la medición de la temperatura de la piel es comúnmente utilizada por su facilidad de ser capturada y porque puede ser de mucha utilidad, mientras que indicadores como la sudoración no resultan tan favorables por la dificultad que implica hacer la medición. Otro registro de variables es el caso de Liu et al. (2019), quienes midieron diferentes variables en un ambiente controlado, tales como: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del aire, temperatura en la superficie del asiento, frecuencia cardíaca, temperatura de la piel (en el tobillo y en la muñeca) y la temperatura del aire cercana al tobillo. Encontrando que la temperatura de la piel medida en el tobillo es más predictiva que la medida en la muñeca. Algo que resaltar es la forma en la que lograron hacer que los participantes validaran la información obtenida, ya que incentivaron económicamente a los participantes para hacer más largo el experimento y responder más encuestas.

Chaudhuri et al. (2018) realizaron un experimento con 20 participantes, 10 hombres y 10 mujeres, durante dos meses realizaron encuestas de confort térmico y midieron: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del aire, temperatura de globo, temperatura de la piel, conductancia de la piel, frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno en la sangre y presión arterial, registrando que la medición de la temperatura de la piel la realizaron en la parte posterior de la mano por el fácil acceso a las arterias radial y ulnar y en la mano no dominante.

El estudio de Choi y Yeom (2017) encontró que medir la temperatura de la piel en varios puntos (frente, brazo, cuello, parte superior de la muñeca, parte inferior de la muñeca, espalda) y aplicar algoritmos de árbol de decisiones para relacionar las temperaturas brinda mejores resultados al generar modelos de confort térmico combinando los temperaturas que usándolas

de forma individual. El estudio concluye que el resultado óptimo lo obtiene de la combinación de la temperatura de la piel en la cintura, la temperatura de la piel en el brazo y la tasa de cambio de la temperatura de la piel de la parte interior de la muñeca.

Estudios como el de Ziyang Wang, Matsuhashi, y Onodera (2022) proponen un nuevo enfoque para evaluar el confort térmico en tiempo real utilizando la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Se demuestra que, al combinar diferentes características de la frecuencia cardíaca, se puede predecir de manera precisa el confort térmico personal.

Respecto a los modelos y métodos utilizados se tiene el caso de Omidvar y Kim (2023), donde proponen un modelo matemático que utiliza la temperatura de la piel, la frecuencia cardíaca y la temperatura del aire para predecir las sensaciones térmicas individuales. Dicho modelo se basa en la teoría fisiológica de que la percepción de la temperatura corporal está influenciada por la temperatura del aire y la temperatura de la piel que a su vez está influenciada por la tasa metabólica y la circulación de la sangre.

Otros estudios implementan algoritmos de aprendizaje automático para analizar los resultados y hacer modelos de predicción de confort térmico, como el caso de Mansi2022, el cual monitorea señales fisiológicas como el electrocardiograma, el electroencefalograma y la actividad electrodérmica para evaluar el confort térmico en distintas condiciones. Utilizaron sensores portátiles (Empatica E4 e Interaxon MUSE). En sus resultados indican un aumento en las densidades de espectro de potencia (PSD) en las bandas alfa y theta. Por el contrario, en disconfort existe una disminución en las ondas beta y gamma.

Otro caso de implementación de Machine Learning es el reportado por Chaudhuri et al. (2020), en el que presentan un método mejorado de predicción del índice de estado térmico (TSI) personal, llamado método ePTS, para predecir el confort térmico de los ocupantes de edificios. El método utiliza la temperatura de la piel de la mano, la frecuencia cardíaca (pulso) y la temperatura ambiente para predecir el TSI, para ellos, utilizan la plataforma e-Health sensor.

## 2.5 Desarrollo de dispositivos

El término “wearable” viene del idioma inglés y se puede traducir como “vestible”, por ello, cuando se habla de dispositivos wearables se hace referencia a objetos como relojes, pulseras, auriculares, gafas, zapatillas, llaveros o cualquier otro accesorio o prenda de vestir que se lleve encima y que permita realizar alguna tarea adicional al usuario sin estorbar en su cotidianidad, mientras que, al mismo tiempo, el dispositivo puede proveer de datos de interés, como: estado de salud, rutinas, lugares, noticias, datos climatológicos, etc. Por esta razón, el uso de wearables para monitoreo del confort térmico resulta conveniente, ya que permite llevar un monitoreo constante sin ser invasivo para el usuario. Existen estudios donde se ha reportado el uso de wearables con dicho fin, tal es el caso de J. K. Sim, Yoon, y Cho (2018) quienes desarrollaron un dispositivo wearable para medir la tasa de sudor de la piel a través de una cámara de humedad y sensores de humedad, ya que mencionan que el estado térmico humano

puede ser medido a través del sudor. Feng et al. (2023) desarrollaron una base de datos y una interfaz para ver los datos medidos en tiempo real y planean implementar un control de HVAC (sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado por sus siglas en inglés) a través de su dispositivo de manera automática. El estudio se realizó solo en dos personas y desarrollaron modelos de confort térmico personalizados donde midieron variables como: la temperatura del aire, la humedad relativa, el nivel de luz, la frecuencia cardíaca, la conductancia eléctrica de la piel, la temperatura de la piel y la actividad basada en el movimiento. Otro experimento es el desarrollado por Ghahramani et al. (2018) en el que se monitorearon 231 participantes durante tres días seguidos en un entorno controlado de oficina. Midieron variables como: sonido, CO<sub>2</sub>, intensidad lumínica, temperatura del aire, humedad relativa y presión atmosférica. Los resultados obtenidos muestran que la tecnología de detección ambiental puede ser una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia energética de los edificios y mejorar la comodidad de los ocupantes. Garces et al. (2021) implementaron dispositivos de bajo costo que permitieron la medición de la calidad del aire y confort térmico en edificaciones. Emplearon los índices PMV y PPD para evaluar la percepción de confort. Midieron con cada nodo sensor la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del aire, y la temperatura radiante media, comparando los resultados de las mediciones con un dispositivo Testo 480. Los resultados obtenidos muestran que es posible determinar el confort térmico midiendo la temperatura y la humedad.

Haciendo uso de wearables comerciales, Nazarian et al. (2021) emplean el wearable Fitbit y hacen experimentación tanto en una cámara controlada, como en un ambiente exterior no controlado. Encontraron que la temperatura corporal puede ser predicha utilizando la frecuencia cardíaca, la temperatura de la piel y la temperatura del aire en la muñeca. Tartarini et al. (2022), haciendo uso también un Fitbit con sensores Ibutton y la aplicación Cozie para la implementación de encuestas de confort térmico, en el que implementaron un método que ellos llamaron micro-EMA para recopilar datos durante periodos prolongados de tiempo, concluyen que un experimento muy prolongado que involucre encuestas de confort térmico puede volverse tedioso y pesado para los usuarios. Hasan, Alsaleem, y Rafaie (2016) determinaron que la tasa metabólica y la ropa tienen un gran impacto en el modelo PMV, pero son difíciles de medir, por lo que con el uso de un Fitbit estimaron la tasa metabólica a través del acelerómetro del dispositivo. En cuanto al uso de sensores, Cho et al. (2023) reportan que hacer uso de 3 sensores de temperatura logra conseguir una mejor precisión que utilizar tan solo 1. Esto lo deciden tomando como base el artículo “Estimation of Thermal Sensation Based on Wrist Skin Temperatures” de S. Y. Sim et al. (2016), Los sensores utilizados son termistores montados sobre una banda elástica y maleable asemejando una pulsera de monitoreo. El artículo de Gnecco, Pigliautile, y Pisello (2023) presenta una nueva metodología para investigar la correlación entre el Voto de Sensación Térmica (TSV) diario de los individuos y la exposición ambiental. El objetivo es desarrollar modelos de confort personalizados maximizando el bienestar de los ocupantes y minimizando el consumo de energía. Durante el desarrollo del proyecto, se capacitó a los usuarios para utilizar los sensores iButton por sí mismos, facilitando la implementación de las encuestas de confort térmico y el estudio en sí. Malakhatka et al. (2021) presenta un proyecto que almacena datos de gasto energético en una base de datos. Se apoyaron del dis-

positivo OURA Ring para monitorear el sueño de los usuarios y desarrollaron un modelo de red neuronal para mejorar la calidad del sueño. En conjunto, los datos recopilados y el modelo ofrecen buenos resultados para evaluar y mejorar la calidad del sueño de los usuarios. Otro mecanismo reportado por Zhe Wang et al. (2020) consiste en un dispositivo que aplica ondas de enfriamiento o calentamiento en la muñeca que ha demostrado un efecto correctivo de hasta 2.5 °C en 3 minutos. Usan el wearable para ayudar a mejorar el confort térmico utilizando ondas de calor o frío para estimular los receptores de temperatura de la piel.

## **3 Metodología**

Aquí se describe cual fue la metodología a seguir para desarrollar el proyecto

### **3.1 Elección de variables y sensores**

### **3.2 Elección de hardware y software**

### **3.3 Diseño del primer prototipo de wearable**

### **3.4 Diseño de encuesta de confort térmico en wearable**

De las encuestas de confort existentes, que se va a tomar y como se va adaptar al dispositivo

### **3.5 Documentación del prototipo**



## **4 Desarrollo del dispositivo**

### **4.1 Programación de encuestas**

### **4.2 Programación de sensores**

### **4.3 Implementación de la plataforma IoT**

### **4.4 Armado del primer prototipo de wearable**

### **4.5 Campaña de pruebas del primer prototipo**

Se requiere una referencia para probar los sensores Se prueban cosas como duración de la batería, ergonomía Si es que se programaron alarmas.

Pruebas en un ambiente real.

Aquí pueden agregarse las conclusiones.

# **5 Conclusiones**

## **5.1 Discusión**

### **5.1.1 Interpretación de los resultados**

### **5.1.2 Contribuciones y limitaciones**

## **5.2 Conclusiones**

## Referencias

- Aguirre, Verónica Ivette Calixto. 2021. «Thermal comfort studies». Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2021/septiembre/0814603/Index.html>.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE Standard 55-2017. American Society of Heating, Refrigerating; Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Becerra-Santacruz, Habid, y Ranald Lawrence. 2016. «Evaluation of the thermal performance of an industrialised housing construction system in a warm-temperate climate: Morelia, Mexico». *Building and Environment* 107 (octubre): 135-53. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.029>.
- Bogatu, Dragos Ioan, Jun Shinoda, José Joaquín Aguilera, Bjarne W. Olesen, Futa Watanaabe, Yosuke Kaneko, y Ongun B. Kazanci. 2023. «Human physiology for personal thermal comfort-based HVAC control – A review». *Building and Environment* 240 (julio): 110418. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110418>.
- Cetz, Maella González, y Gabriel Gómez Azpeitia. 2018. «Thermal comfort in classrooms in Mexico's hot and humid climate».
- Chaudhuri, Tanaya, Yeng Chai Soh, Hua Li, y Lihua Xie. 2020. «Machine learning driven personal comfort prediction by wearable sensing of pulse rate and skin temperature». *Building and Environment* 170 (marzo): 106615. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106615>.
- Chaudhuri, Tanaya, Deqing Zhai, Yeng Chai Soh, Hua Li, y Lihua Xie. 2018. «Random forest based thermal comfort prediction from gender-specific physiological parameters using wearable sensing technology». *Energy and Buildings* 166 (mayo): 391-406. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.02.035>.
- Cheung, Toby, Stefano Schiavon, Thomas Parkinson, Peixian Li, y Gail Brager. 2019. «Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II». *Building and Environment* 153: 205-17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>.
- Cho, Seonghun, Hong Jae Nam, Chuanqi Shi, Choong Yeon Kim, Sang-Hyuk Byun, Karen-Christian Agno, Byung Chul Lee, Jianliang Xiao, Joo Yong Sim, y Jae-Woong Jeong. 2023. «Wireless, AI-enabled wearable thermal comfort sensor for energy-efficient, human-in-the-loop control of indoor temperature». *Biosensors and Bioelectronics* 223 (marzo): 115018. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.115018>.
- Choi, Joon Ho, y Dongwoo Yeom. 2017. «Study of data-driven thermal sensation prediction model as a function of local body skin temperatures in a built environment». *Building and Environment* 121 (agosto): 130-47. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2017.05.004>.
- Enescu, Diana. 2017. «A review of thermal comfort models and indicators for indoor envi-

- ronments». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (noviembre): 1353-79. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.175>.
- Fanger, P. O. 1970. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press. <https://archive.org/details/thermalcomfortan0000fang>.
- Fanger, P. O., y Jørn Toftum. 2002. «Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates». *Energy and Buildings* 34 (6): 533-36. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00003-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00003-8).
- Feng, Yanxiao, Julian Wang, Nan Wang, y Chenshun Chen. 2023. «Alert-based wearable sensing system for individualized thermal preference prediction». *Building and Environment* 232 (marzo): 110047. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110047>.
- Garces, Hugo O., Eduardo Morales, Rodrigo Gomez, Hans Cabrera, y Eduardo Espinosa. 2021. «Design and calibration of low cost sensor node for thermal comfort estimation». *2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2021*, junio, 1215-21. <https://doi.org/10.1109/MED51440.2021.9480306>.
- Ghahramani, Ali, Jovan Pantelic, Casey Lindberg, Matthias Mehl, Karthik Srinivasan, Brian Gilligan, y Edward Arens. 2018. «Learning occupants' workplace interactions from wearable and stationary ambient sensing systems». *Applied Energy* 230 (noviembre): 42-51. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.08.096>.
- Gnecco, Veronica Martins, Ilaria Pigliautile, y Anna Laura Pisello. 2023. «Long-Term Thermal Comfort Monitoring via Wearable Sensing Techniques: Correlation between Environmental Metrics and Subjective Perception». *Sensors* 23 (enero): 576. <https://doi.org/10.3390/s23020576>.
- Gómez-Azpetia, G., E. López Gómez, y M. Peña. 2006. «Adaptación del índice Humidex para el clima de la ciudad de Colima, México, de acuerdo con el enfoque adaptativo». *Anuario VIII*: 77-92.
- Hasan, Mohammad H., Fadi Alsaleem, y Mostafa Rafaie. 2016. «Sensitivity study for the PMV thermal comfort model and the use of wearable devices biometric data for metabolic rate estimation». *Building and Environment* 110 (diciembre): 173-83. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.007>.
- International Organization for Standardization. 2019. «Ergonomics of the thermal environment – Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales». ISO Standard 10551. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/45126.html>.
- International Standardization Organization (ISO). 2005. «Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort». ISO Standard 7730. Geneva.
- Judson, Emily, Oscar Fitch-Roy, y Iain Soutar. 2022. «Energy democracy: A digital future?». *Energy Research and Social Science* 91 (septiembre). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102732>.
- Liu, Shichao, Stefano Schiavon, Hari Prasanna Das, Ming Jin, y Costas J. Spanos. 2019. «Personal thermal comfort models with wearable sensors». *Building and Environment* 162 (sep-

- tiembre): 106281. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106281>.
- López-Pérez, L. A., J. J. Flores-Prieto, y C. Ríos-Rojas. 2019. «Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate». *Building and Environment* 150 (marzo): 181-94. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.011>.
- Lorentzen, Diego M. P. Chatellier, y Michael A. McNeil. 2020. «Electricity demand of non-residential buildings in Mexico». *Sustainable Cities and Society* 59 (agosto). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102165>.
- Malakhatka, Elena, Anas Al Rahis, Osman Osman, y Per Lundqvist. 2021. «Monitoring and Predicting Occupant's Sleep Quality by Using Wearable Device OURA Ring and Smart Building Sensors Data (Living Laboratory Case Study)». *Buildings* 11 (octubre): 459. <https://doi.org/10.3390/buildings11100459>.
- Martínez, Rincón, Martínez torres, González Trevizo, y Fernández Melchor. 2020. «Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores: Un estudio en la transición térmica de Ensenada, B.C.»
- Masterton, J. M., F. A. Richardson, y Canada. Service de l'environnement atmosphérique. 1979. *Humidex: A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity*, by J.M. Masterton and F.A. Richardson. 28cm. cli,1. Service de l'environnement atmosphérique. <https://books.google.com.mx/books?id=DBIazQEACAAJ>.
- May-Tzuc, Oscar, Mario Antonio Jiménez-Torres, Andrea Del Rosario Cruz Y. Cruz, Román Canul-Turriza, Juan Edgar Andrade-Durán, y Felipe Noh-Pat. 2023. «FEASIBILITY OF THE ADAPTIVE THERMAL COMFORT MODEL UNDER WARM SUB-HUMID CLIMATE CONDITIONS: COOLING ENERGY SAVINGS IN CAMPECHE, MEXICO». *Habitat Sustentable* 13 (junio): 120-31. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.10>.
- Mitigation of Climate Change, Climate Change 2022 -. 2022. «Mitigation of Climate Change Climate Change 2022 Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change». <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf>.
- Nazarian, Negin, Sijie Liu, Manon Kohler, Jason K W Lee, Clayton Miller, Winston T L Chow, Sharifah Badriyah Alhadad, et al. 2021. «Project Coolbit: can your watch predict heat stress and thermal comfort sensation?». *Environmental Research Letters* 16 (marzo): 034031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd130>.
- Olabi, A. G., Mohammad Ali Abdelkarem, y Hussam Jouhara. 2023. «Energy digitalization: Main categories, applications, merits, and barriers». *Energy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126899>.
- Olgyay, V., D. Lyndon, J. Reynolds, y K. Yeang. 1963. *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and expanded Edition*. Princeton University Press. <https://books.google.com.mx/books?id=RRQ-CgAAQBAJ>.
- Omidvar, Amir, y Jungsoo Kim. 2023. «A novel theoretical model for predicting the individuals' thermal sensations based on air temperature and biomarkers measured by wearable devices». *Building and Environment* 232 (marzo): 110050. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110050>.
- Organización de las Naciones Unidas. 2015. «Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development». <https://digitallibrary.un.org/record/3923923>.

- Oropeza-Perez, Ivan, Astrid H. Petzold-Rodriguez, y Claudia Bonilla-Lopez. 2017. «Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling». *Energy and Buildings* 145 (junio): 251-58. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.031>.
- Rincón-Martínez, J C, y Int. 2019. «Experimental thermal comfort under lab controlled conditions: An applied case». *Journal of Engineering Research and Application www.ijera.com* 9: 18-26. <https://doi.org/10.9790/9622-0912021826>.
- Ritchie, Hannah. 2020. «Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?» *Our World in Data*.
- Secretaría de Energía. 2023. «Balance Nacional de Energía Preliminar 2022». [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/841526/BNE\\_2022.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/841526/BNE_2022.pdf).
- Sim, Jai Kyoung, Sunghyun Yoon, y Young-Ho Cho. 2018. «Wearable Sweat Rate Sensors for Human Thermal Comfort Monitoring». *Scientific Reports* 8 (enero): 1181. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19239-8>.
- Sim, Soo Young, Myung Jun Koh, Kwang Min Joo, Seungwoo Noh, Sangyun Park, Youn Ho Kim, Kwang Suk Park, y Angelo Maria Sabatini. 2016. «Estimation of Thermal Sensation Based on Wrist Skin Temperatures». <https://doi.org/10.3390/s16040420>.
- Synthesis Report, Climate Change 2023: 2023. «IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.» Editado por Paola Arias, Mercedes Bustamante, Ismail Elgizouli, Gregory Flato, Mark Howden, Carlos Méndez-Vallejo, Joy Jacqueline Pereira, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Tartarini, Federico, Stefano Schiavon, Matias Quintana, y Clayton Miller. 2022. «Personal comfort models based on a 6-month experiment using environmental parameters and data from wearables». *Indoor Air* 32 (noviembre). <https://doi.org/10.1111/ina.13160>.
- Wang, Zhe, Kristen Warren, Maohui Luo, Xuchen He, Hui Zhang, Edward Arens, Wenhua Chen, et al. 2020. «Evaluating the comfort of thermally dynamic wearable devices». *Building and Environment* 167 (enero): 106443. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106443>.
- Wang, Ziyang, Ryuji Matsushashi, y Hiroshi Onodera. 2022. «Towards wearable thermal comfort assessment framework by analysis of heart rate variability». *Building and Environment* 223 (septiembre): 109504. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109504>.
- Yao, Runming, Baizhan Li, y Jing Liu. 2009. «A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)». *Building and Environment* 44 (10): 2089-96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.014>.
- Zepeda-Gil, Carlos, y Sukumar Natarajan. 2022. «Thermal comfort in naturally ventilated dwellings in the central Mexican plateau». *Building and Environment* 211 (marzo). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108713>.