

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

Julio César Landa López

2023-10-10

Table of contents

Resumen	3
Abstract	4
Agradecimientos	5
1 Introducción	6
2 Antecedentes	7
2.1 Confort térmico	7
2.2 Variables fisiológicas	8
2.3 Wearables en el confort térmico	10
3 Metodología	13
3.1 Elección de variables y sensores	13
3.2 Elección de hardware y software	13
3.3 Diseño del primer prototipo de wearable	13
3.4 Diseño de encuesta de confort térmico en wearable	13
3.5 Documentación del prototipo	13
4 Desarrollo del dispositivo	14
4.1 Programación de encuestas	14
4.2 Programación de sensores	14
4.3 Implementación de la plataforma IoT	14
4.4 Armado del primer prototipo de wearable	14
4.5 Campaña de pruebas del primer prototipo	14
5 Conclusiones	15
5.1 Discusión	15
5.1.1 Interpretación de los resultados	15
5.1.2 Contribuciones y limitaciones	15
5.2 Conclusiones	15
References	16

Resumen

Abstract

Agradecimientos

Libro en Quarto para la tesis

1 Introducción

Introducción de la tesis

Texto introductorio

Definir que es lo que quiero resaltar de confort térmico. Que si y que no voy a utilizar en mi tesis relacionado a confort térmico

2 Antecedentes

Aguirre (2021) Abunda en algunos métodos para predecir el confort térmico como el PMV-PPD y métodos adaptativos como el PMV extendido o el PMV adaptativo. Además de que describe detalladamente las encuestas de confort térmico

El American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (2017) define claramente el confort térmico, el PMV y las encuestas de confort térmico.

2.1 Confort térmico

Aquí se puede hablar de las encuestas (ASHRAE, tesis de Ivette)

Concepto de confort térmico y como se mide el confort

Información acerca del confort térmico

Notas

- La mayoría de las encuestas de confort térmico son en conjunto con medición de variables ambientales y del ocupante. ¿Existen encuestas en conjunto de mediciones de variables fisiológicas?
- Buscar estudios que obtengan un modelo para la evaluación que utilice variables fisiológicas
- Artículos de confort térmico en México

Field studies on human thermal comfort — An overview

Este trabajo aborda estudios sobre el confort térmico en diversos climas, utilizan la división de climas de Köppen-Geiger. Destaca la diferencia entre edificios con aire acondicionado y edificios naturales en términos de zonas de confort. Mencionan que más del 20% de los ocupantes se sienten incómodos en ambientes con ventilación natural, a pesar de cumplir con estándares de comodidad. También resalta el uso de la running mean temperature como indicador para el confort térmico. Mishra and Ramgopal (2013)

IPCC Climate Change 2022

Según el informe del IPCC 2022, la digitalización ofrece tanto oportunidades como desafíos en la mitigación del cambio climático. Si bien puede mejorar la eficiencia y la descarbonización,

también se prevé un aumento en la demanda de energía. Para abordar este dilema, se requieren políticas proactivas y regulación de desechos electrónicos. Además, es vital realizar más investigaciones para comprender plenamente el impacto de la digitalización en el consumo de energía. Esto se vuelve aún más urgente considerando la proyección de un aumento inevitable de 1.5 °C en la temperatura global en las próximas dos décadas. En este contexto, la transición lejos de los combustibles fósiles, la adopción de prácticas alimenticias más sostenibles y la reconfiguración de los modelos urbanos son medidas esenciales para abordar el cambio climático. “Mitigation of Climate Change Climate Change 2022 Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change” (n.d.)

Energy democracy: A digital future?

examina la relación entre la democracia energética y la digitalización. Destaca tres objetivos principales de la democracia energética y propone tres perspectivas clave: soberanía popular, gobierno participativo y propiedad civil mediante el uso de software de código abierto. El informe también presenta cuatro hallazgos fundamentales, enfocándose en cómo la digitalización puede impactar la sostenibilidad, la innovación en el sector energético, los posibles conflictos de propiedad y la reconfiguración de las relaciones de poder. Estos hallazgos resaltan la importancia de la digitalización en la evolución de la democracia energética y la sociedad en general. Judson, Fitch-Roy, and Soutar (2022)

2.2 Variables fisiológicas

Que variables influyen en el confort térmico

Con que sensores y que principios de medición utilizan

Estimation of Thermal Sensation Based on Wrist Skin Temperatures

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). Por cuestiones de ergonomía y practicidad en nuestro caso descartaremos la temperatura en la punta del dedo índice. Tras la comparación de relación entre las temperaturas medidas y 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 es 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). Así que por cuestiones de practicidad es conveniente realizar la medición en la parte superior de la muñeca. S. Y. Sim et al. (2016)

Human physiology for personal thermal comfort-based HVAC control – A review

Existen diferentes variables que pueden servir como indicadores de confort térmico. Las variables que hemos considerado utilizar (temperatura en la parte superior de la muñeca y frecuencia cardiaca) parecen ser buenos indicadores según estudios previos, sobre todo el análisis

de su variabilidad. La medición de la temperatura de la piel es muy comúnmente utilizada por su facilidad de ser capturada y porque puede ser de mucha utilidad. Indicadores como la sudoración quizás no resulten tan favorables, además de la dificultad que implica hacer la medición. Bogatu et al. (2023)

Thermal discomfort in the workplace: measurement through the combined use of wearable sensors and machine learning algorithms

Este trabajo se enfoca en monitorear 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). Implementaron algoritmos de machine learning para analizar los resultados y hacer modelos de predicción de confort térmico. Los resultados indican un aumento en las densidades de espectro de potencia (PSD) en las bandas alfa y theta. Por el contrario, en discomfort existe una disminución en las ondas beta y gamma. Mansi et al. (2022)

Personal thermal comfort models with wearable sensors

En este trabajo 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), temperatura del aire cercana al tobillo. Encontraron que la temperatura de la piel medida en el tobillo es más predictiva que la medida en la muñeca. Incentivaron económicamente a los participantes para hacer más largo el experimento y responder más encuestas. Liu et al. (2019)

Random forest based thermal comfort prediction from gender-specific physiological parameters using wearable sensing technology

Realizaron un experimento en 20 participantes, 10 hombres y 10 mujeres durante dos meses realizando encuestas de confort térmico y midiendo las siguientes variables: 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. La medición de la temperatura de la piel la llevan a cabo en la parte posterior de la mano por el fácil acceso a las arterias radial y ulnar. Al mismo tiempo las mediciones las llevaron a cabo en la mano no dominante. Chaudhuri et al. (2018)

Study of data-driven thermal sensation prediction model as a function of local body skin temperatures in a built environment

Este estudio 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. El mejor resultado se obtuvo 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. Choi and Yeom (2017)

A novel theoretical model for predicting the individuals' thermal sensations based on air temperature and biomarkers measured by wearable devices

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. Omidvar and Kim (2023)

Prediction of individual thermal comfort based on ensemble transfer learning method using wearable and environmental sensors

Destacan que el modelo híbrido CNN-SVM demostró un impresionante rendimiento con una precisión y puntuación F1 del 95% para el sujeto B. Además, aplicaron con éxito un método de transferencia de aprendizaje para predecir la comodidad térmica de los sujetos A y C, superando al modelo CNN-SVM en términos de rendimiento. Park and Park (2022)

Machine learning driven personal comfort prediction by wearable sensing of pulse rate and skin temperature

Este artículo presenta 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. Utilizan la plataforma e-Health sensor. Chaudhuri et al. (2020)

Towards wearable thermal comfort assessment framework by analysis of heart rate variability

Este artículo propone 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. Ziyang Wang, Matsushashi, and Onodera (2022)

2.3 Wearables en el confort térmico

Que se ha hecho con los wearables en el confort térmico

Hablar de la app Cozie, que es lo que hace, y porque nosotros no lo vamos a utilizar.

Learning occupants workplace interactions from wearable and stationary ambient sensing systems

Experimento en el que se monitorizaron 231 participantes durante tres días seguidos en un entorno de oficina (controlado). Se midieron variables como sonido, CO2, 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. Ghahramani et al. (2018)

Design and Calibration of Low Cost Sensor Node for Thermal Comfort Estimation

En este estudio se implementaron unos 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. Garces et al. (2021)

Wireless, AI-enabled wearable thermal comfort sensor for energy-efficient, human-in-the-loop control of indoor temperature

Mencionan que el uso de 3 sensores de temperatura brinda una mejor precisión que utilizar tan solo 1. Esto lo deciden basándose en el artículo anterior, más no mencionan que ellos lo hayan comprobado. Este artículo me es útil porque utilizan termistores montados sobre una banda elástica y maleable, brindan fotografías de las mismas y un pequeño diagrama de su funcionamiento. Esto puede ser útil para la colocación del termistor a utilizar en el dispositivo. Cho et al. (2023)

Project Coolbit: can your watch predict heat stress and thermal comfort sensation?

Utilizan un wearable (fitbit) y hacen experimentación tanto en una cámara controlada, como en un ambiente exterior no controlado. Encontraron que la temperatura corporal puede ser predecida utilizando la frecuencia cardíaca, la temperatura de la piel y la temperatura del aire en la muñeca. Nazarian et al. (2021)

Personal comfort models based on a 6-month experiment using environmental parameters and data from wearables

En este estudio implementaron el uso de un reloj fitbit con sensores Ibutton y usaron la aplicación Cozie para realizar encuestas de confort térmico realizaron demuestran como un experimento muy prolongado que involucre encuestas de confort térmico puede volverse tedioso y pesado para los usuarios. Implementaron un método que ellos llamaron micro-EMA para recopilar datos durante periodos prolongados de tiempo. Tartarini et al. (2022)

Long-Term Thermal Comfort Monitoring via Wearable Sensing Techniques: Correlation between Environmental Metrics and Subjective Perception

El artículo 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.

Estudio a largo plazo en el que capacitaron a los usuarios para usar los sensores iButton por sí mismos, facilitando la implementación de las encuestas de confort térmico y el estudio en sí. Gnecco, Pigliautile, and Pisello (2023)

Monitoring and Predicting Occupant's Sleep Quality by Using Wearable Device OURA Ring and Smart Building Sensors Data (Living Laboratory Case Study)

Este artículo presenta un proyecto que almacena datos de gasto energético en una base de datos. Se apoyaron del dispositivo OURA Ring para monitorear el sueño de los usuarios y se desarrolló 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. Malakhatka et al. (2021)

Wearable Sweat Rate Sensors for Human Thermal Comfort Monitoring

Desarrollaron un dispositivo wearable para medir la tasa de sudor de la piel a través de una cámara de humedad y sensores de humedad. Mencionan que el estado térmico humano puede ser medido a través del sudor. J. K. Sim, Yoon, and Cho (2018)

Alert-based wearable sensing system for individualized thermal preference prediction

Desarrollaron una base de datos y una interfaz para ver los datos medidos en tiempo real. planean implementar un control de HVAC a través de su dispositivo de manera automática. El estudio se realizó solo en dos personas y desarrollaron modelos de confort térmico personalizados. 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. Feng et al. (2023)

Evaluating the comfort of thermally dynamic wearable devices

El dispositivo aplica ondas de enfriamiento o calentamiento en la muñeca y 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. Zhe Wang et al. (2020)

Sensitivity study for the PMV thermal comfort model and the use of wearable devices biometric data for metabolic rate estimation

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. Hasan, Alsaleem, and Rafaie (2016)

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

References

- Aguirre, Verónica Ivette Calixto. 2021. “Thermal Comfort Studies.” Universidad Nacional Autonoma 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.
- Bogatu, Dragos Ioan, Jun Shinoda, José Joaquín Aguilera, Bjarne W. Olesen, Futa Watanabe, Yosuke Kaneko, and Ongun B. Kazanci. 2023. “Human Physiology for Personal Thermal Comfort-Based HVAC Control – a Review.” *Building and Environment* 240 (July): 110418. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110418>.
- Chaudhuri, Tanaya, Yeng Chai Soh, Hua Li, and Lihua Xie. 2020. “Machine Learning Driven Personal Comfort Prediction by Wearable Sensing of Pulse Rate and Skin Temperature.” *Building and Environment* 170 (March): 106615. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106615>.
- Chaudhuri, Tanaya, Deqing Zhai, Yeng Chai Soh, Hua Li, and Lihua Xie. 2018. “Random Forest Based Thermal Comfort Prediction from Gender-Specific Physiological Parameters Using Wearable Sensing Technology.” *Energy and Buildings* 166 (May): 391–406. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.02.035>.
- Cho, Seonghun, Hong Jae Nam, Chuanqi Shi, Choong Yeon Kim, Sang-Hyuk Byun, Karen-Christian Agno, Byung Chul Lee, Jianliang Xiao, Joo Yong Sim, and 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 (March): 115018. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.115018>.
- Choi, Joon Ho, and 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 (August): 130–47. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2017.05.004>.
- Feng, Yanxiao, Julian Wang, Nan Wang, and Chenshun Chen. 2023. “Alert-Based Wearable Sensing System for Individualized Thermal Preference Prediction.” *Building and Environment* 232 (March): 110047. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110047>.
- Garces, Hugo O., Eduardo Morales, Rodrigo Gomez, Hans Cabrera, and 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*, June, 1215–21. <https://doi.org/10.1109/MED51440.2021.9480306>.
- Ghahramani, Ali, Jovan Pantelic, Casey Lindberg, Matthias Mehl, Karthik Srinivasan, Brian Gilligan, and Edward Arens. 2018. “Learning Occupants’ Workplace Interactions from

- Wearable and Stationary Ambient Sensing Systems.” *Applied Energy* 230 (November): 42–51. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.08.096>.
- Gnecco, Veronica Martins, Ilaria Pigliautile, and Anna Laura Pisello. 2023. “Long-Term Thermal Comfort Monitoring via Wearable Sensing Techniques: Correlation Between Environmental Metrics and Subjective Perception.” *Sensors* 23 (January): 576. <https://doi.org/10.3390/s23020576>.
- Hasan, Mohammad H., Fadi Alsaleem, and 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 (December): 173–83. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.007>.
- Judson, Emily, Oscar Fitch-Roy, and Iain Soutar. 2022. “Energy Democracy: A Digital Future?” *Energy Research and Social Science* 91 (September). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102732>.
- Liu, Shichao, Stefano Schiavon, Hari Prasanna Das, Ming Jin, and Costas J. Spanos. 2019. “Personal Thermal Comfort Models with Wearable Sensors.” *Building and Environment* 162 (September): 106281. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106281>.
- Malakhatka, Elena, Anas Al Rahis, Osman Osman, and 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 (October): 459. <https://doi.org/10.3390/buildings11100459>.
- Mansi, Silvia Angela, Gloria Cosoli, Anna Laura Pisello, Ilaria Pigliautile, Gian Marco Revel, and Marco Arnesano. 2022. “Thermal Discomfort in the Workplace: Measurement Through the Combined Use of Wearable Sensors and Machine Learning Algorithms.” In *2022 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2022 - Proceedings*, 54–59. Institute of Electrical; Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT54413.2022.9831610>.
- Mishra, Asit Kumar, and Maddali Ramgopal. 2013. “Field Studies on Human Thermal Comfort — an Overview.” *Building and Environment* 64 (June): 94–106. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2013.02.015>.
- “Mitigation of Climate Change Climate Change 2022 Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.” n.d. <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 (March): 034031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd130>.
- Omidvar, Amir, and 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 (March): 110050. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110050>.
- Park, Hansaem, and Dong Yoon Park. 2022. “Prediction of Individual Thermal Comfort Based on Ensemble Transfer Learning Method Using Wearable and Environmental Sensors.” *Building and Environment* 207 (January): 108492. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV>

.2021.108492.

- Sim, Jai Kyoung, Sunghyun Yoon, and Young-Ho Cho. 2018. “Wearable Sweat Rate Sensors for Human Thermal Comfort Monitoring.” *Scientific Reports* 8 (January): 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, and Angelo Maria Sabatini. 2016. “Estimation of Thermal Sensation Based on Wrist Skin Temperatures.” <https://doi.org/10.3390/s16040420>.
- Tartarini, Federico, Stefano Schiavon, Matias Quintana, and Clayton Miller. 2022. “Personal Comfort Models Based on a 6-month Experiment Using Environmental Parameters and Data from Wearables.” *Indoor Air* 32 (November). <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 (January): 106443. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106443>.
- Wang, Ziyang, Ryuji Matsuhashi, and Hiroshi Onodera. 2022. “Towards Wearable Thermal Comfort Assessment Framework by Analysis of Heart Rate Variability.” *Building and Environment* 223 (September): 109504. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109504>.