

Disseny i desenvolupament d'un equip de mesura per a l'avaluació del confort tèrmic

Torres Bernat, Oscar

Universitat Politècnica de Catalunya – EPSEVG
Av. De Víctor Balaguer, 1, 08800 Vilanova i la Geltrú, Barcelona
oscar.torres.bernat@estudiantat.upc.edu

Resum

Aquest projecte pretén desenvolupar i dissenyar una solució de baix cost i baix consum energètic amb l'objectiu d'avaluar i simular el confort tèrmic que podria sentir un ésser humà a certes condicions ambientals dins d'un vehicle.

La solució que es presenta és un mòdul format per diferents sensors, els mateixos que porta un maniquí tèrmic comercial o, si més no, similars.

El microcontrolador que s'ha utilitzat per a la construcció del mòdul és una placa ESP32, ja que té unes dimensions raonables i permet una comunicació amb protocols SPI i I2C.

Durant tot el treball es presentaran els diferents sensors, els protocols de comunicació de cada sensor i l'esquema final del prototip proposat.

1. Introducció

Aquest projecte aborda els dubtes i incògnites actuals sobre la mobilitat personal i el mercat automobilístic, especialment els efectes nocius de la contaminació emesa pels vehicles de combustió. Es destaca la creixent popularitat del vehicle elèctric degut a les seves avantatges en la reducció d'emissions contaminants i la seva avançada tecnologia.

L'evolució tecnològica dels vehicles ha millorat tant la seguretat com el confort dels ocupants. Els avenços recents s'han centrat en l'automatització de sistemes, com el regulador de velocitat, el control de creuer adaptatiu i els sensors de proximitat. No obstant això, es planteja la pregunta de per què no s'ha automatitzat encara el confort tèrmic i ambiental dels ocupants del vehicle.

El projecte es proposa dissenyar i desenvolupar un mòdul que reculli informació per a realitzar assajos de confort tèrmic mitjançant la integració de sensors. Aquest mòdul ha de ser compacte i ubicable a diferents parts del cos. Actualment, existeixen maniquins complexos que realitzen aquestes mesures, però requereixen una inversió considerable. Per això, es busca desenvolupar un dispositiu econòmic i eficient que ofereixi la informació necessària per a estudis de confort tèrmic en vehicles.

L'objectiu d'aquest mòdul és trobar una correlació entre les magnituds físiques i les mesures pel sensor. A més de fer

una estimació de la sensació de confort dels passatgers d'un vehicle.

2. Estat de l'art

Els maniquins d'assaig, també coneguts com a maniquins de proves o dummies, són dispositius utilitzats principalment en proves de seguretat per simular el cos humà en diferents escenaris. Aquests maniquins són fonamentals en diverses indústries, com l'automobilística, la mèdica i la militar, per avaluar l'impacte i la seguretat en situacions de risc.

Quan ens parlen d'un maniquí d'assaig en automoció ens ve al cap un crash test dummy, que s'utilitzen per avaluar els sistemes de seguretat actius i passius (com els airbags, cinturons de seguretat, ...). També avaluen el comportament dels vehicles envers col·lisions frontals, laterals, frontals amb altres vehicles, etc. Aquest tipus de maniquins són essencials per garantir la seguretat dels vehicles i dels seus ocupants. La seva sofisticació i precisió permeten als fabricants avaluar l'impacte dels accidents de trànsit i desenvolupar solucions per reduir les lesions i salvar vides.



Figura 1. Maniquí de crash testing.

A part d'aquest tipus de maniquins, també n'existeixen d'altres tipus, és el cas dels maniquins d'assaig tèrmic. Aquest tipus de maniquins s'utilitzen en assaigs tèrmics per simular l'exposició dels éssers humans a diferents situacions climàtiques. S'utilitzen en una gran varietat de camps d'investigació, com podrien ser la meteorologia, l'arquitectura i l'indústria tèxtil, amb l'objectiu d'avaluar el rendiment tèrmic dels productes.



Figura 2. Maniquí tèxtil

Els maniquins tèrmics d'avui en dia disposen d'una gran precisió i estan dissenyats per simular la resposta del cos humà quan s'exposa a variacions de temperatura i humitat. Proporcionen dades precises sobre la transferència de calor, la distribució de la temperatura a la superfície del cos i l'eficàcia de l'aïllament tèrmic dels materials. Les dades recopilades s'utilitzen per millorar el disseny de peces de roba i equips de climatització, assegurant que siguin còmodes i segurs per als seus usuaris

En el sector de l'automoció, aquest tipus de maniquins s'utilitzen per a simular el comportament tèrmic del cos humà dins d'un vehicle. Aquesta classe de dispositius són fonamentals per millorar el confort tèrmic dels ocupants del vehicle, ja que pot tenir una influència directa en la sinistralitat viària, així com per optimitzar els sistemes de climatització i ventilació. És un model físic d'un cos humà que simula la pèrdua de calor del cos i d'on obtenim informació com la temperatura, la humitat i el flux d'aire dins d'un vehicle. Aquestes dades serveixen per optimitzar el sistema HVAC (Heating (calefacció), Ventilating (ventilació), Air Conditioned (aire acondicionat)) de l'automòbil i millorar la comoditat dels ocupants.

Aquest tipus de maniquins es solen utilitzar en el desenvolupament i prova de vehicles per a garantir el compliment de les normes i estàndards de la indústria. A continuació hi ha uns exemples de maniquins que s'utilitzen en el sector de l'automoció:

- DRESSMAN. Es tracta d'un maniquí tèrmic desenvolupat pel Fraunhofer Institute for Building Physics (Fraunhofer IBP) d'Alemanya {1}. Té la capacitat d'avaluar el confort tèrmic i la quantitat d'energia consumida a l'interior de l'habitacle del vehicle. Té l'avantatge que es pot usar en proves de laboratori i de carretera.



Figura 3. Maniquí DRESSMAN

- ADAM. Aquest maniquí tèrmic està desenvolupat pel National Renewable Energy Laboratory (NREL) {2} d'Estats Units. Igual que el DressMAN, mesura el confort tèrmic i l'energia consumida a l'interior del vehicle.



Figura 4. Maniquí ADAM

3. Desenvolupament del mòdul

A l'hora de desenvolupar el mòdul s'han tingut en compte certes característiques:

- Funcionalitat
- Rang d'operació
- Components
- Equacions

3.1 Funcionalitat

Els requisits per a un correcte desenvolupament del mòdul són els següents:

- Baix consum energètic
- Integrar els components necessaris per a monitoritzar el maniquí
- Que tingui petites dimensions
- Mínim manteniment i fàcil d'arreglar

3.2 Rang d'operació

Els assajos que es realitzen al departament engloben un rang de temperatures d'entre -20°C i 50°C, per tant, el mòdul, incloent sensòrica i microcontrolador, haurien, com a mínim, de poder treballar en aquest rang de temperatures. A més a més, la tensió d'alimentació de la qual disposem oscil·la entre 3,3V i 5V.

3.3 Components

Després de tota la recerca d'informació i definir les equacions que s'anaven a utilitzar per al desenvolupament del mòdul es va veure que es necessitarien els següents tipus de sensors:

- Sensor de temperatura ambient
- Sensor de temperatura radiant
- Sensor d'humitat relativa
- Sensor de flux radiant
- Sensor de flux de calor

3.4 Equacions

Per a relacionar els factors físics amb la sensació tèrmica d'una forma quantitativa, tenint en compte totes les variables que hi ha, s'ha fet ús de les equacions de Fanger i les de la normativa ISO 14505-2.

4. Integració del mòdul

Per a l'elaboració del mòdul s'han escollit els següents sensors:

- Sensor de temperatura ambient:
 - o Termistor 10K3A11 de TE Connectivity
- Sensor de temperatura radiant:
 - o Sensor D6T-1A-01 d'Omron
- Sensor d'humitat relativa:
 - o Sensor HDC1080 de Texas Instruments
- Sensor de pressió ambient:
 - o Sensor ELVH - B002A d'Amphenol
- Sensor de flux radiant
 - o Sensor de Captec
- Sensor de flux de calor
 - o Sensor FHF04SC de Hukseflux

4.1 Lectura dels sensors

Per a llegir els sensors s'ha fet ús d'una placa ESP32.

La ESP32 és una placa basada en el xip ESP32 d'Espressif Systems. Aquest xip és un microcontrolador de 32 bits amb un processador dual-core (amb velocitat de fins a 240MHz), connectivitat Bluetooth i Wi-Fi integrada. També disposa d'una gran varietat de perifèrics que es poden connectar (com sensors, motors i servomotors, teclats i joysticks, ...). Finalment, el microcontrolador disposa de memòria flash de 16MB i RAM, que permet emmagatzemar dades i programes.

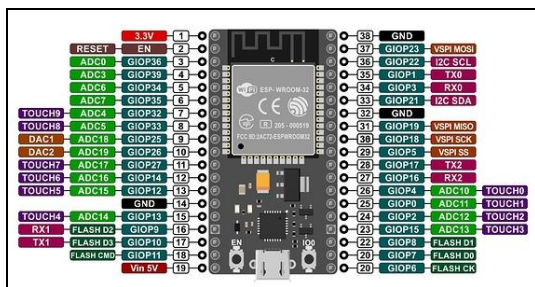


Figura 5. Esquema de la placa ESP32

La placa ESP32 pot ser utilitzada per a una varietat de projectes, des de dispositius IoT (internet de les coses) fins a robots i sistemes d'automatització. És altament versàtil i potent, fet que la fa ideal per a aplicacions en diverses àrees tecnològiques.

A més de les seves capacitats de processament, l'ESP32 inclou una sèrie de pins d'entrada/sortida (GPIO) per connectar-se a sensors i actuadors externs. També compta

amb característiques addicionals com modes de baixa potència i una àmplia varietat d'interfícies de comunicació, com I2C i SPI, que permeten connectar múltiples dispositius. A continuació, es detallen aquestes interfícies de comunicació:

- I2C (Inter-Integrated Circuit): I2C és un protocol de comunicació de baixa velocitat dissenyat per connectar dispositius electrònics en un sistema. Utilitza dues línies: SDA (línia de dades) i SCL (línia de rellotge). Cada dispositiu en un sistema I2C té una adreça única i un dispositiu mestre controla la comunicació, iniciant les transaccions i determinant els destinataris de les dades. El mestre també controla el ritme de la comunicació mitjançant polsos en la línia de rellotge. I2C és especialment útil per connectar dispositius amb pocs pins, com sensors i memòries, ja que només requereix dues línies per a la comunicació. És popular en sistemes incrustats a causa de la seva simplicitat i baix consum d'energia.

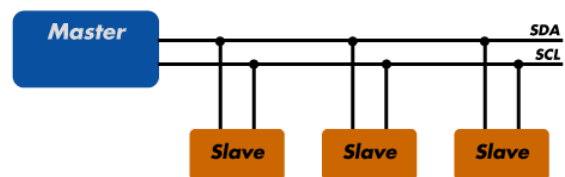


Figura 6. Exemple de connexió I2C, amb un microcontrolador com a màster i diferents dispositius com a esclaus

- SPI (Serial Peripheral Interface): SPI és un protocol de comunicació sèrie que permet la transferència de dades entre dispositius. Utilitza quatre línies de comunicació: SCLK (rellotge), MOSI (dades del mestre a l'esclau), MISO (dades de l'esclau al mestre) i SS (selecció de dispositiu esclau). El dispositiu mestre controla el bus i pot comunicar-se amb un o diversos dispositius esclaus. SPI és utilitzat en aplicacions que requereixen alta velocitat de transferència de dades, com sistemes d'emmagatzematge, dispositius de xarxa, pantalles i sensors.

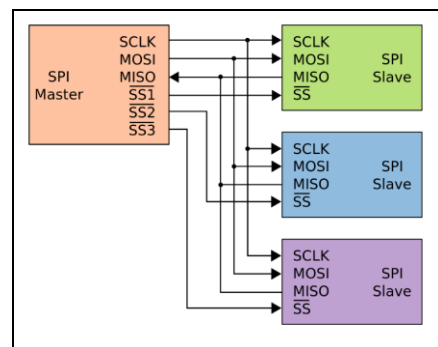


Figura 7. Exemple de la comunicació SPI amb un màster i 3 esclaus

Aquest últim protocol s'usa per llegir els sensors de flux radiant i de flux de calor. Per a llegir-los correctament es van haver de complementar amb el mòdul MAX31856 d'Adafruit.

Per altra banda, la lectura del sensor de temperatura ambient s'obté d'aplicar l'equació de Stenhardt-Hart:

$$\frac{1}{T} = \frac{\ln\left(\frac{R}{R0}\right)}{\beta} + \frac{1}{(T0 + 273.15)} \quad [1]$$

On:

R = Resistència mesurada del termistor (Ω)

R0 = Resistència del termistor a temperatura de referència (10k Ω a 25°C)

β = Constant beta del material

T0 = Temperatura de referència (25°C)

T = Temperatura ambient

4.2 Obtenció dels valors de confort tèrmic

Com s'ha comentat anteriorment, per relacionar els factors físics amb la sensació tèrmica d'una persona es fan servir les equacions de Fanger i les de la ISO 14505-2.

El PMV, o vot mig estimat, és un índex que reflexa el valor mig dels vots emesos per un grup nombrós de persones respecte a una situació donada en una escala de sensació tèrmica de 7 nivells i es calcula mitjançant l'equació següent: {3}

$$PMV = (0.303 \cdot e^{-0.036 \cdot M} + 0.028) \cdot \left\{ (M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} [2]$$

On:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} [3]$$

$h_c =$

$$\begin{cases} 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{si } 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{V_a} \\ 12.1 \cdot \sqrt{V_a} & \text{si } 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{V_a} \end{cases} [4]$$

$$f_{cl} = 1 + 0.3 \cdot I_{cl} [5]$$

I_{cl} es calcula mitjançant la calculadora que hi ha a l'Institut Nacional de Seguretat i Salut al Treball (INSST) {4}, però acostuma a ser 0,5 clo per roba d'estiu, 1 clo per roba d'hivern i 1,5 clo per roba militar i altres tipus de roba pesada.

On:

PMV = Predicted Mean Vote

M = Metabolisme (W/m²)

W = Treball Extern (W/m²)

p_a = Pressió Atmosfèrica (kPa)

t_a = Temperatura Ambient (°C)

f_{cl} = Àrea del maniquí vestida/Àrea del maniquí sense vestir

t_{cl} = Temperatura a la superfície de la roba (°C)

\bar{t}_r = Temperatura radiant (°C)

h_c = Coeficient de transferència de calor convectoria (W/m²°C)

I_{cl} = Aïllament intrínsec de la roba (clo)

V_a = Velocitat de l'aire (m/s)

L'avaluació del PMV es fa mitjançant una escala de 7 nivells:

Hot	+3
Warm	+2
Slightly warm	+1
Neutral	0
Slightly cool	-1
Cool	-2
Cold	-3

El PPD, o percentatge de persones insatisfetes, prediu el percentatge de persones que pot notar massa fred o calor en un determinat ambient tèrmic, és a dir, que no es sentirien tèrmicament confortables:

$$PPD (\%) = 100 - 95 \cdot e^{-(0.03353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)} [5]$$

La ISO14505, concretament la segona part, és una normativa que determina l'ergonomia de l'ambient tèrmic, concretament l'avaluació dels ambients tèrmics en vehicles. proporciona directrius per a l'avaluació de les condicions tèrmiques a l'interior d'un vehicle. Té com a objectiu principal determinar la temperatura equivalent, entenent com a temperatura equivalent a la temperatura d'un espai homogeni, amb temperatura radiant mitja igual a la temperatura de l'aire i amb velocitat radiant nul·la, en el que una persona intercanvia la mateixa quantitat de calor per convecció i radiació que en les condicions reals a avaluar. La determinació de la temperatura equivalent es basa en les equacions de la transferència de calor per convecció i radiació per a persones vestides. L'intercanvi de calor per conducció és tant petit que es pot negligir i incloure en l'intercanvi de calor per convecció i radiació: {5}

$$R = h_r(t_{sk} - \bar{t}_r) [6]$$

$$C = h_c(t_{sk} - \bar{t}_a) [7]$$

On:

$$t_{sk} = 35.7 - 0.0275 * (M - W) [8]$$

On:

R = Calor intercanviat per radiació (W/m²)

C = Calor intercanviat per convecció (W/m²)

h_c = Coeficient de transferència de calor convectiva (W/m²°C)

h_r = Coeficient de transferència de calor per radiació (W/m²°C)

t_a = Temperatura Ambient (°C)

\bar{t}_r = Temperatura radiant (°C)

t_{sk} = Temperatura a la superfície de la pell (°C)

M = Metabolisme (W/m²)

W = Treball Extern (W/m²)

A partir d'aquestes equacions, la temperatura equivalent ve donada per:

$$t_{eq} = t_s - \frac{Q}{h_{cal}} [9]$$

On:

t_s = Temperatura de la superfície (°C), quan el maniquí està nu $t_s = t_{sk}$

t_{eq} = Temperatura equivalent normalitzada

Q = Pèrdua de calor per convecció i radiació mesurada en condicions reals

$$Q = R + C [10]$$

h_{cal} = Coeficient de transmissió de calor combinat

$$h_{cal} = h_c + h_r [11]$$

h_r = Coeficient de transferència de calor per radiació (W/m²°C)

h_c = Coeficient de transferència de calor convectiva (W/m²°C)

5. Elaboració del mòdul

Primerament cada sensor es va testejar de forma individual, per comprovar el seu funcionament i veure que el que retornava per pantalla era coherent. Un cop fet això es van anar realitzant diferents fases amb tots els sensors.

El primer de tot va ser integrar el sensor de temperatura ambient ja que és un termistor NTC senzill d'implementar.

Seguidament es van acoplar els 2 sensors que utilitzen el protocol de comunicació I2C. Aquests sensors són:

- Sensor D6T d'Omron (Temperatura radiant)
- Sensor HDC1080 de Texas Instruments (Humitat relativa)

Finalment, es van incorporar els sensors que es comuniquen amb el protocol SPI i mitjançant el mòdul MAX31856. Aquests sensors són el sensor de flux radiant de CAPTEC i el sensor de flux de calor (Hukseflux FHF04SC).

El mòdul va quedar integrat en una protoboard tal com mostra la Figura 8.

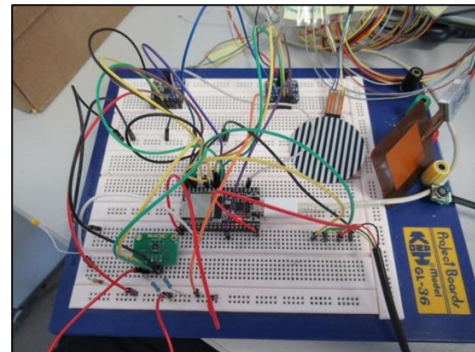


Figura 8. Mòdul implementat

Les Figures 9 i 10 mostren l'esquema dels components integrats a la placa. La placa s'alimenta mitjançant un cable al port USB de l'ordinador.

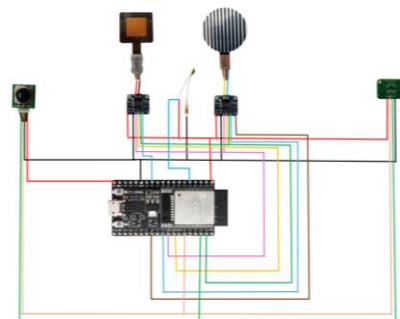


Figura 9. Esquema final del mòdul

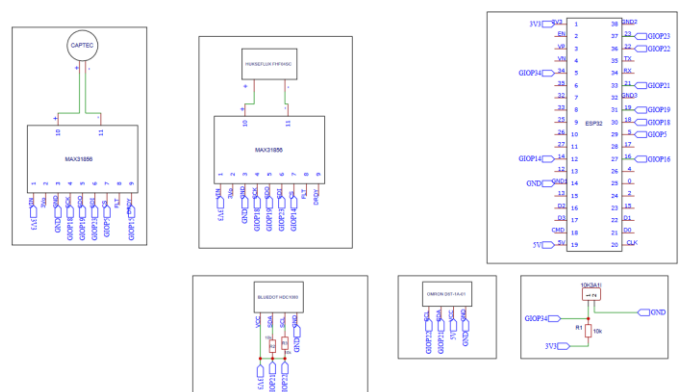


Figura 10. Esquema simplificat del mòdul

6. Conclusions

Aquest treball volia desenvolupar, dins les possibilitats, un mòdul que simulés la sensació tèrmica d'una persona humana en condicions meteorològiques determinades. Gràcies a l'ús de la placa ESP32 i de les equacions de Fanger, s'ha pogut desenvolupar un mòdul força fidel a la realitat.

Els sensors s'han pogut integrar mitjançant els protocols de comunicació I2C i SPI. A l'inici del treball no tenia cap mena de coneixement sobre aquests dos protocols, un fet que dificultava molt la feina i que s'ha dedicat moltes hores a comprendre, de forma gairebé autodidacta, com funcionaven. També s'han integrat sensors més senzills, com el termistor NTC per a la lectura de la temperatura ambient.

L'entorn emprat per a la programació del mòdul ha estat Arduino, un entorn que molta gent considera poc professional, per la seva senzillesa de llenguatge i de components, però que realment té molta flexibilitat i es pot aplicar en àmbits molt diversos dins de la indústria.

Les llibreries desenvolupades pels propis fabricants per poder treballar en Arduino han estat un factor bastant important a l'hora de la programació del mòdul, facilitant molt la programació dels sensors i la comunicació amb els busos I2C i SPI.

Amb l'ús que s'ha fet de la placa i l'entorn de programació, s'ha demostrat que aquest tipus de microprocessador tenen molt potencial dins de la indústria i que són ideals per desenvolupar i dissenyar les primeres fases de prototips basats en l'electrònica.

Les següents fases a seguir d'aquest projecte són la de desenvolupar, mitjançant la connectivitat Wi-Fi, un sistema que permeti emmagatzemar les dades obtingudes en un document Excel, semblant a com ho fa el maniquí. També s'hauria de fer un assaig a temperatura determinada dins d'un vehicle i amb el sistema HVAC encès, per després comparar i analitzar els resultats amb els del maniquí. Finalment, s'hauria de construir una placa PCB amb tots els sensors, per compactar encara més el mòdul i que sigui més fàcil de transportar.

7. Agraïments

L'autor vol agrair la col·laboració de tots els companys del departament de Thermal Management d'Applus IDIADA, al tutor de la UPC i a la seva família i amics.

Referencias

- {1} NORREFELDT, V. DressMAN 3.2 comfort measurement system, Fraunhofer Institute for Building Physics IBP.
- {2} THERMETICS, Automotive HVAC Manikin, Instruments for Textile & Biophysical Testing.
- {3} NILSSON, H. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models, KTH Royal Institute of Technology, 2003.
- {4} INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO, Calculador de Resistencia Térmica del vestido.

{5} INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO14505-2:2006, International Organization for Standardization, 2006.