



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un dispositivo para la monitorización de las
condiciones de confort utilizando técnicas de prototipado rápido e
impresión 3D*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Allan Douglas Moreno García

DIRECTOR: Francisco Manuel Troncoso Pastoriza

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un dispositivo para la monitorización de las
condiciones de confort utilizando técnicas de prototipado rápido e
impresión 3D*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el diseño de un dispositivo compacto y de bajo consumo para la monitorización de las condiciones de confort en un espacio concreto de un edificio. Para ello, en primer lugar, se ha realizado un estudio del estado del arte para la selección de las métricas más apropiadas para el cálculo de confort, así como los parámetros ambientales necesarios para la obtención de estos valores y los dispositivos más adecuados para su adquisición. A continuación, se ha realizado el montaje, configuración y programación de todos los dispositivos electrónicos necesarios para el funcionamiento del sistema, tanto de medición como de procesamiento, comunicación y visualización. Se ha optado por una arquitectura cliente-servidor, en el que uno o varios nodos cliente se encargan de la recogida y el envío de los datos, y otro nodo servidor gestiona los cálculos y la monitorización final del estado de confort. Por último, se ha diseñado el soporte físico que albergará los componentes de forma adecuada para su correcto funcionamiento mediante impresión 3D.

PALABRAS CLAVE

Confort, impresión 3D, monitorización, diseño, selección de parámetros.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer el apoyo de mi tutor el Sr Troncoso y a mis familiares y amigos. Quiero agradecerles a todas las figuras afroamericanas que me han inspirado para romper barreras raciales cada día y lograr ser el primer oficial afroamericano de cuerpo general e ingeniero técnico industrial por la universidad de Vigo: Michael Jordan, Oprah Winfrey, Withney Huston, Tiger Woods, Serena Williams, Will Smith y Barack Obama.

CONTENIDO

Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Objetivos	8
2 Estado del arte	11
2.1 Confort térmico	11
2.1.1 Temperatura	11
2.1.2 Humedad relativa.....	12
2.1.3 Movimiento del aire.....	12
2.1.4 Temperatura de radiación	13
2.1.5 Factores personales.....	13
2.1.6 Ritmo metabólico basal	14
2.1.7 Modelos e índices	15
2.2 Confort acústico.....	17
2.3 Confort visual.....	18
2.3.1 Flujo luminoso.....	19
2.3.2 Intensidad luminosa	19
2.3.3 Luminancia.....	19
2.3.4 Daylight Factor.....	19
2.4 Calidad del aire.....	20
2.4.1 Humo del tabaco.....	20
2.4.2 Productos de combustión	20
2.4.3 Monóxido de carbono	21
2.4.4 Compuestos orgánicos volátiles	21
2.4.5 Modelos e índices	21
2.5 Prototipado rápido e impresión 3D.....	23
2.5.1 Estereolitografía	23
2.5.2 Sinterización por láser selectiva	24
2.5.3 Modelado por deposición fundida (FDM)	26
2.6 Dispositivos de medición en el mercado	27
3 DESAROLLO	29
3.1 Arquitectura general	29
3.2 Cliente	29

3.2.1 Microcontrolador	30
3.2.2 Sensores.	31
3.2.3 Alimentación	36
3.3 Sistema de comunicaciones.....	37
3.3.1 Wifi.....	38
3.3.2 LoRa	38
3.3.3 Bluetooth.....	39
3.3.4 Zigbee	39
3.3.5 Symphony Link	40
3.3.6 Z-Wave	40
3.3.7 RFID	41
3.3.8 Radiofrecuencia.....	41
3.4 Servidor.....	42
3.5 Soporte externo de los dispositivos	44
4 Resultados	45
4.1 Objetivos y requisitos del diseño	45
4.1.1 Primer prototipo	45
4.1.2 Segundo prototipo	46
4.1.3 Tercer prototipo	47
4.1.4 Cuarto prototipo	51
5 Conclusiones y líneas futuras	54
5.1 Conclusiones	55
5.2 Líneas Futuras	55
6 Bibliografía.....	57
Anexo I: Código del dispositivo cliente (en lenguaje C).....	62
Anexo II: Código del dispositivo servidor (en lenguaje Python)	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. PDD en función de PMV [16].....	16
Figura 2-2. Porcentaje de la población con acceso a fuentes combustibles seguros para cocinar [37].	21
Figura 2-3. Diagrama de impresión SLA.....	24
Figura 2-4. Ejemplo de inversión inversa[62].....	24
Figura 2-5. Partes de una impresora SLS.....	25
Figura 2-6. Ejemplo de impresora 3D de tecnología SLS	25
Figura 2-7. Diagrama de una impresora 3D FDM.	26
Figura 2-8. Figura de acción realizada mediante impresión 3D FDM	27
Figura 3-1. Esquema eléctrico del cliente.....	30
Figura 3-2. Microcontrolador de 8 bits[73].	30
Figura 3-3. Microcontrolador de 32 bits[73].....	31
Figura 3-4. Feather M0 Radio with RFM69[73].	31
Figura 3-5. Ejemplo de anemómetro.	32
Figura 3-6. Modelado del movimiento del aire en una oficina. [74].....	32
Figura 3-7. Sensor de calidad de aire BME680[73].	34
Figura 3-8. Comparación medidas tomadas por MH-Z19B y CCS811 [60].	35
Figura 3-9. Sensor MQ-7 [73].....	35
Figura 3-10. Sistema de alimentación del Feather [73].....	36
Figura 3-11 Bateria Lipo de 500mAh [79].	37
Figura 3-12. Dispositivo de bajo consumo, TPL5111 [73].....	37
Figura 3-13. Diagrama de red LoRaWan [82]	38
Figura 3-14. Dispositivos y empresas que guardan compatibilidad con Zigbee[88]	39
Figura 3-15. Arquitectura de la red Symphony Link.....	40
Figura 3-16. Uso de la tecnología RFID para recuento de armamento. [91].....	41
Figura 3-17. Raspberry Pi model 3 B [92].....	43
Figura 3-18. Adafruit Radio Bonnets con OLED-RFM69/LoRa [73].	43
Figura 3-19. Antena [73].....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3-20. Montaje SMA [73].....	43
Figura 4-1. Primer prototipo.	45
Figura 4-2. Visualización de la impresión en Cura del primer prototipo.	46
Figura 4-3. Adaptación para los tornillos del segundo portotipo.	47
Figura 4-4. Adaptación para los tornillos del segundo prototipo en Cura.	47

Figura 4-5. Tapa del encapsulado.....	48
Figura 4-6. Modelado 3D del tercer prototipo.	48
Figura 4-7. Esquema de distribución de componentes dentro del encapsulado.....	49
Figura 4-8. Columnas rotas del tercer prototipo.....	49
Figura 4-9. Sistema del botón.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4-10. Modelado del cuarto prototipo en Cura.	50
Figura 4-11. Ejemplo de figura articulada fabricada mediante impresión 3D.	52
Figura 4-12. Vista explosionada del tercer prototipo del encapsulado.....	51
Figura 4-13. Diseño del botón articulado	52
Figura 4-14. Diseño de la tapa con anclaje del FeatherM0 RFM69HCW.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de Icl y Rcl para prendas de ropa. [12]	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2. NOAA national weather service: heat index [18].....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3. Estándares nacionales chinos en zonas urbanas (dB) [23]	18
Tabla 4. Índices de calidad del aire	22
Tabla 5. Tabla comparativa de sensores de temperatura	33
Tabla 6. Comparación de sensores de calidad de aire.	34
Tabla 7. Índice de calidad del aire	36
Tabla 8. Tabla comparativa de modelos de Raspberry.....	42

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El término ergonomía, proviene del griego Έργον, que significa "trabajo", y Νόμος, que significa "leyes naturales", siendo la ergonomía la disciplina encargada del diseño de lugares de trabajo, herramientas y tareas, haciendo que sean compatibles con las características fisiológicas, psicológicas y las capacidades de los trabajadores que se verán involucrados [1].

El escrito de Hipócrates sobre cómo deberían ser diseñadas las herramientas y la organización del lugar de trabajo es el primer documento sobre la ergonomía en las herramientas del trabajo. Pero fue popularizada por el ingeniero americano Frederick Taylor a mediados del siglo XIX, cuando consigue triplicar la productividad de unos albañiles reduciendo el tamaño el peso y aumentando el tamaño de la pala que usaban.

Desde entonces se han hecho avances y estudios sobre factores que pueden ser fácilmente cambiados con el objetivo de mejorar el confort y la productividad de los trabajadores. *“Existe un decremento en la productividad de los trabajadores de 1,8% por °C cuando la temperatura era superior a los 25°C y llegaba hasta una reducción de productividad de un 8% para trabajos de coser cuando la temperatura estaba entre los 23,9 y los 32,2°C”* [2].

Un ambiente interior óptimo puede aumentar el confort, la productividad, la salud y el bienestar de los trabajadores de oficina [2]. Varios estudios han demostrado que una mejor evaluación del ambiente de trabajo está relacionada con la satisfacción general en el trabajo y contribuye a resultados organizacionales como menos ausencias por enfermedad y un mayor compromiso de los empleados [3]. Las condiciones de iluminación interior, como uno de los aspectos del trabajo, influyen en el estado de ánimo de los ocupantes el bienestar el rendimiento de las tareas [4]. Una mayor satisfacción con las condiciones de iluminación en el trabajo se asocia normalmente con una mayor iluminancia en el plano de trabajo, la uniformidad de la iluminación, la ausencia de deslumbramiento, la direccionalidad de la luz (relación entre la iluminación vertical), así como la presencia de una ventana[5].

El acceso a la luz del día generalmente mejora la satisfacción con la iluminación y se prefiere a la iluminación eléctrica sola [5]. Es bien sabido que la luz del día es más deseable para el confort visual, la apariencia ambiental y la amenidad [6].

La importancia del confort es bien sabida, y son muchos los estudios sobre el confort humano, pero no existe aplicación práctica de este conocimiento. Existen muchos tipos de sensores y hoy en día es común encontrar dispositivos capaces de medir varios parámetros a la vez. Pero no existe un dispositivo que sea capaz de cuantificar el confort.

1.1 Objetivos

- Escoger los parámetros necesarios para cuantificar el confort
- Realizar una selección de sensores capaces de medir dichos parámetros
- Diseñar un encapsulado capaz de alojar los sensores
- Este encapsulado tiene que ser de pequeñas dimensiones
- El sistema tiene que tener una larga duración de batería
- El sistema tiene que ser capaz de almacenar los datos tomados sobre el confort

1.2 Estructura

En este proyecto se va a describir la razón de ser de este trabajo y sus objetivos en la introducción. En el estado del arte se va a realizar una investigación sobre los estudios que se han hecho sobre el confort en interiores. Que parámetros afectan al confort y cómo lo hacen, índices ya existentes que cuantifican el confort y normativa vigente de algunas agencias gubernamentales sobre algunos parámetros de confort en espacios de trabajo. También se va a comentar los métodos de impresión 3D existentes y el prototipado rápido.

En el desarrollo se va a justificar la elección de los componentes y de los parámetros de confort y también el método de fabricación del cliente y del servidor. El protocolo de comunicación será escogido en este apartado, valorando entre las ventajas y desventajas entre los protocolos usados en sistemas similares.

En un apartado de resultados se describe el proceso de producción del encapsulado. Con una descripción del diseño de los prototipos y los fallos que se han producido en el proceso de producción y diseño y con sus respectivas mejoras y soluciones. También se comprueba que el encapsulado no altere la toma de medidas. Por último en las conclusiones y líneas futuras se cierra el trabajo valorando que objetivos se cumplieron y las posibles mejoras que tiene el proyecto.

-

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Confort térmico

Según “*Health and Safety Executive*” existen 6 “factores básicos” indicadores del estado de confort dividido en dos clases distintas [2]. Los indicadores del medio: temperatura del aire, humedad, velocidad del aire, temperatura de radiación. Los indicadores personales: calor metabólico y aislamiento de la ropa.

El confort término es el que determina el bienestar o comodidad de un material, espacio, etc. En el ámbito científico la denominación más próxima es el confort higrotérmico, que se define como la condición de la mente que expresa la satisfacción térmica con el medio [8].

Los edificios están diseñados para poder protegernos de los medios adversos de la naturaleza, pero no todos los edificios tienen el mismo objetivo ni están bajo las mismas condiciones climáticas, por lo que sus diferencias respecto a su diseño son notables. Podemos dividir el tipo de confort en 3 categorías diferentes: confort térmico, confort acústico y confort lumínico.

2.1.1 Temperatura

Una de las funciones más importantes de los edificios es mantener una temperatura agradable para el ser humano en su interior. Para que esto sea posible es necesario evitar la transmisión de calor. Existen 3 tipos distintos de transmisión de calor: la conducción, la radiación y la convección.

- Conducción: el calor necesita un medio físico para transmitirse, por ejemplos las paredes, el suelo o el techo. La cantidad de calor transmitido depende de la conductividad del material que a su vez depende la porosidad del mismo, el espesor del elemento, y la diferencia de temperaturas entre las dos caras del elemento.
- Convección: María Blender La convección es la transmisión de calor entre gases y líquidos que tienen distinta temperatura y están en contacto. Debido al movimiento de un fluido entre zonas con diferentes temperaturas y consecuentemente, con un gradiente de densidad, se produce la convección [9].
- Radiación térmica: también llamada radiación calorífica es el transporte de energía térmica que emite un cuerpo mediante radiación debido a su temperatura. Los cuerpos negros (objeto teórico que absorbe toda la luz) emiten radiación térmica, así como todos los cuerpos. Es la ley de radiación térmica de Planck la que describe la radiación de los cuerpos negros dependiendo de su temperatura sin tener en cuenta su composición [10].

La temperatura en una habitación puede influir en la productividad de una forma indirecta a través de su impacto por síntomas de SEE (Síndrome del Edificio Enfermo, SBS en inglés). Nimelä et al. (2001)

demostró un decremento de la productividad en un centro de trabajo de un 1,8% por °C cuando la temperatura era superior a los 25°C. Federspiel midió la productividad de un centro de trabajo y no encontró una correlación directa entre la temperatura y la productividad de los trabajadores cuando se encontraba en la llamada zona de confort, pero se produjo un decremento en la productividad de un 15% cuando la temperatura aumentó desde los 24,8°C a los 26°C [11]. Varios estudios apoyan la teoría de que existe un rango de temperaturas que no afecta en la productividad. Por ejemplo, Witterseh [12], evaluó la productividad entre los 22°C y los 25°C sin encontrar una diferencia significativa, quedando modelado por la ecuación (1). Para los rangos más bajos de temperaturas se hicieron estudios sobre tareas que requieren destreza manual porque las manos son una de las zonas más afectadas por el frío, un estudio de Messe reportó un decremento significativo en la fuerza de los dedos en temperaturas inferiores a los 18°C, y a pesar de que en la mayoría de trabajo de oficina se realicen con las manos no se vio una pérdida de productividad considerable debido a la pérdida de calor a través de las manos [13].

$$f(x) = \begin{cases} P(\%) = [2 \cdot T, ^\circ C] - 50, & 25 < ^\circ C < 33 \\ P(\%) = 0, & 21 < ^\circ C < 25 \end{cases} \quad (1)$$

2.1.2 Humedad relativa

La humedad relativa es la relación entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor a una temperatura determinada, es normalmente expresada como un porcentaje, siendo el 100% de humedad relativa el punto de rocío, donde se satura el aire, es un indicador indispensable en la psicometría.

Cuando la temperatura del aire está dentro de la zona de confort el efecto de la humedad sobre la sensación térmica es modesto [5]. En otros estudios [6] se demuestra que, en condiciones cálidas, existe una pérdida de calor por evaporación de la piel humana. La norma ASHRAE 55-2010 exige un límite de humedad para determinar las temperaturas operativas aceptables para los espacios sin acondicionamiento, otro ejemplo, la norma china de calidad de aire interior, (GB 18883-2002) exige que la humedad relativa esté entre un 40% y un 80% para los edificios HVAC (Heating Ventilating Air Conditioned). Pero el rango de valores óptimos de humedad relativa tiene límites difusos, tanto que la elección correcta de este parámetro puede suponer un problema. No se ha podido establecer una correlación directa entre los datos de campo y el valor de humedad relativa [14].

Las múltiples comparaciones de la respuesta fisiológica con diferentes niveles de temperatura y humedad relativa han indicado que un nivel de humedad alto puede provocar una mayor sensación de calor y una menor percepción de humedad en un ambiente cálido, por lo tanto, controlar la humedad es fundamental en los ambientes cálidos.

2.1.3 Movimiento del aire

El flujo de aire influye directamente en la cantidad de calor transmitido entre el aire y sus superficies adyacentes, a mayor velocidad de aire mayor transferencia de calor, por lo que puede ser útil para climatizar habitáculos, se mide como la distancia recorrida por unidad de tiempo, usualmente expresada en m/s, el volumen del flujo de aire se obtiene multiplicando el área atravesada por el flujo de aire que atraviesa este área.

Los sistemas HVAC están diseñados para acondicionar y ventilar el aire de los edificios. Puede afirmarse que al menos la mitad de los edificios construidos desde la mitad del siglo XX usan sistemas de HVAC [8]. La ASHRAE y otras entidades han hecho publicaciones sobre cómo debe ser este acondicionamiento del aire incluyendo en dichos documentos parámetros tan específicos como el volumen de aire por unidad de tiempo, el porcentaje de aire del exterior y el tipo y localización de los conductos de entrada y de salida [15]. En los primeros estudios se les daba más importancia a los volúmenes de aire desplazado en vez de al flujo o al movimiento del aire; sin embargo, la finalidad última de los sistemas HVAC es el confort y la salud de los humanos. Algunos ejemplos en los que el movimiento del aire tiene especial importancia son: aire estático en interiores artificialmente calentado

que se puede sentir sofocante, acumulación de olores en condiciones de calor o humedad alta, lo que puede aumentar la pérdida de calor por convección sin que cambie la temperatura del aire y pequeños movimientos de aire en ambientes frescos, lo que puede tener mucha influencia en la sensación térmica de las personas.

2.1.4 Temperatura de radiación

Todos los cuerpos intercambian energía térmica con sus alrededores, dependiendo de la diferencia de temperatura en su superficie y en su emisividad (proporción de radiación térmica emitida por una superficie debido a su temperatura). Se puede cuantificar como la relación entre la cantidad de energía radiada en una dirección y la energía que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura en la misma dirección. Se puede calcular mediante la ley de Stefan-Boltzman. Siendo (ϵ) el coeficiente de emisividad, (σ) la constante de Boltzman, (T_s) la temperatura de la superficie y (A_s) la superficie.

$$Q_{emitida} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s \quad (2)$$

El la temperatura media radiante (*Mean Radiant Temperature*, MRT) mide la temperatura media de una superficie que rodea un punto particular. El cálculo de superficies geométricas requerido para calcular la temperatura radiada media es muy complejo, sobre todo en espacios complejos. Existen softwares dedicados a realizar esta tarea, pero mucho más comunes para entornos exteriores aunque se han hecho grandes avances desarrollando métodos numéricos como el RANS-based ENVI-met y otros modelos y herramientas como Rayman, SOLWEIG y Autodesk CFD[16].

Existen varias maneras para calcular la MRT. Se puede medir mediante termómetros o sensores específicos o aplicando su definición y usando cálculos matemáticos para resolverla. Dado que la cantidad de calor radiante que pierde o recibe el cuerpo es la suma algebraica de todos los flujos intercambiados, la MRT se puede calcular a partir de la temperatura medida de las superficies (suelo, techo y paredes), además hay que medir el factor de ángulo entre la persona y dichas superficies [3].

2.1.4.1 Factores personales

2.1.4.2 Ropa

El confort térmico que experimenta una persona es muy dependiente del aislamiento que hace la ropa en su portador. Llevar demasiada ropa o un EPI (equipo de protección individual) puede ser la causa principal de estrés térmico incluso si el ambiente no se considera como cálido o caliente.

El cuerpo humano está en continua transferencia de energía calorífica con el aire que lo rodea, es la piel la más influida por la temperatura y la humedad del aire [17]. El cuerpo humano está adaptado para estar en un rango estrecho de temperaturas $37 \pm 0.5^\circ\text{C}$, el calor generado en el cuerpo humano se disipa mediante la conducción, convección, radiación, evaporación y respiración[18]. Por lo tanto la ropa es necesaria para proteger al cuerpo de las inclemencias climáticas y mantener sus propias funciones de control térmico a pesar de las diferentes condiciones ambientales y actividades físicas [19]-

2.1.4.3 Convección

El calor transmitido desde el cuerpo humano al medio se puede calcular mediante [20], [21]:

$$C = f_{cl} h_c \cdot (T_{cl} - T_a) \quad (3)$$

siendo (T_a) la temperatura del aire, (T_{cl}) la temperatura de la ropa, y (f_{cl}) el factor de aislamiento de la ropa en forma adimensional El coeficiente de transmisión de calor (h_c) depende de la velocidad del aire que rodea al cuerpo y consecuentemente de la posición de la persona y orientación a la corriente de aire[18]. Un valor aproximado de (h_c) puede ser aproximado mediante la expresión (4) Siendo V_a la velocidad del aire.

$$h_c = 12,1 \cdot V_a^{0.5} \quad (4)$$

El factor de área de ropa f_{cl} en (4) se puede expresar como (5), donde (I_{cl}) es coeficiente de aislamiento térmico de la ropa, algunos ejemplos según la prenda se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de I_{cl} y R_{cl} para prendas de ropa [19].

Prenda de ropa	I_{cl} (Clo)	R_{cl} (m ² K/W)
Hombre		
Calcetines, calzoncillos, zapatos, camisa y pantalones	0.42	0.065
Calcetines, calzoncillos, zapatos, camisa corta y pantalones	0.55	0.085
Calcetines, calzoncillos, zapatos, camisa interior, camisa y pantalones	0.51	0.079
Calcetines, calzoncillos, zapatos, camisa interior, camisa, chaqueta y pantalones	0.73	0.113
Calcetines, calzoncillos, zapatos y pantalones	0.31	0.048
Calcetines, calzoncillos, zapatos, camisa interior, camisa, chaqueta y pantalones gruesos	0.77	0.119
Mujeres		
Vestido, ropa interior y zapatos	0.21	0.032
Vestido, ropa interior, zapatos, jersey, medias y zapatos	0.30	0.046
Vestido grueso, blusa gruesa, medias, ropa interior y zapatos	0.49	0.076
Jersey grueso, falda gruesa, blusa, medias, ropa interior y zapatos	0.41	0.063
Jersey grueso, pantalones gruesos, blusa gruesa, medias, ropa interior y zapatos	0.64	0.099
Jersey grueso, pantalones gruesos, medias, ropa interior, blusa gruesa y zapatos	0.77	0.119
jersey grueso, pantalón grueso, medias, ropa interior y zapatos	0.59	0.091

Las resistencias térmicas propuestas para elementos individuales se enumeran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para combinarse por medio de las siguientes ecuaciones.

$$Clo - value(hombre) = 0,727 \sum I_{cli} + 0.0113 \quad (5)$$

El cuerpo humano intenta aislarse mediante la ropa, este aislamiento suele expresarse en unidades *clo*. Clo=0 corresponde a una persona desnuda y Clo=1 corresponde al valor de aislamiento prestado por la ropa necesario para mantener a una persona confortable en una sala sentada a 21°C con una velocidad de aire de 0,1m/s y una humedad menor a 50% con la persona vistiendo un traje corriente.[22] La relación entre Clo y las unidades del sistema internacional es (7) .En los cálculos se utilizan unidades del SI (R_{cl}). La relación entre R_{cl} y I_{cl} es

$$1Clo = 0,155m^2K/W \quad (7)$$

$$R_{cl} = 0,155I_{cl} \quad (8)$$

2.1.5 Ritmo metabólico basal

Los seres humanos necesitan energía para funcionar y producir calor para mantener la temperatura en el interior del cuerpo sobre los 37°C. En actividades exigentes se produce más temperatura, si se produce demasiado calor el cuerpo sudará y esto causará incomodidad. Si no se produce el calor necesario la sangre no circula bien hasta las manos y los pies, la temperatura de la piel disminuye y la persona se sentiría incómoda. Por lo tanto las condiciones ambientales y la ropa para sentir confort dependen directamente de la producción de calor metabólico[23].

El cuerpo utiliza oxígeno y comida para producir energía; la tasa a la que lo produce se denomina ritmo metabólico basal (M). La mayor parte de la energía producida es energía calorífica, el resto es usada por el cuerpo para hacer tareas mecánicas (W). Por lo tanto, la tasa de ritmo metabólico (H) es:

$$H = M - W \quad (9)$$

Normalmente W va desde el 0 al 20% de M y es difícil de medir empíricamente. Para tareas sedentarias o tareas con poca actividad como el trabajo de oficina, por ejemplo, W se puede asumir 0. El calor metabólico producido es una tasa de energía por el tiempo por lo que tiene unidades de potencia. Para reducir la variabilidad en la estimación de la producción de calor metabólico para una determinada actividad, el valor es relacionado al área de la superficie del cuerpo o masa corporal. Las unidades usadas entonces son $W \cdot m^{-2}$ [13].

A pesar de que estos dos últimos parámetros tienen influencia en el confort térmico, no se van a evaluar en este proyecto. Debido a su complejidad de medida y su gran variabilidad en función de la persona es de elevada complejidad intentar añadirlos al sistema de medición de confort. Por lo tanto, se van a obviar también en las escalas e índices de confort.

2.1.6 Modelos e índices

Existen varios modelos e índices que son usados para cuantificar la cantidad de confort en un edificio o espacio interior. A continuación se indican los más utilizados.

2.1.6.1 PMV y PDD

El modelo PMV/PDD fue desarrollado por P.O Fanger, usando balances energéticos y estudios empíricos sobre la temperatura de la piel para definir el confort. Las ecuaciones que usó Fanger son una combinación de temperatura del aire, temperatura de radiación, humedad relativa, velocidad del aire, ritmo metabólico y aislamiento de la ropa con el objetivo de calcular el *Predicted Mean Vote* en una escala. En su escala, el 0 representa neutralidad térmica, la zona de confort está definida por la combinación de los seis parámetros para los que el VPM está dentro de los límites recomendados ($-0.5 < PMV < +0.5$). [8] Fanger después de intentar predecir la sensación térmica, desarrolló otra ecuación para relacionar el PMV con el *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PDD). Esta relación se basó en estudios que encuestaron a los sujetos en una cámara en la que se podían controlar con precisión las condiciones interiores. [24]

El PMV es un índice que pretende predecir el valor medio de los votos de un grupo de ocupantes en una escala de sensación térmica de siete puntos. El equilibrio térmico se obtiene cuando la producción de calor interno de un ocupante es igual a su pérdida de calor. El equilibrio térmico de un individuo puede verse influido por los niveles de actividad física, el aislamiento de la ropa y los parámetros del entorno térmico. Para calcular el PMV se usan las siguientes ecuaciones:

$$PMV = [0,303 \cdot e^{(0,036 \cdot M)} + 0,028] \cdot \{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \} \quad (8)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot t_a \} \quad (9)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{si } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{si } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (10)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl}, & \text{si } I_{cl} \leq 0 \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl}, & \text{si } I_{cl} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

Donde:

M es el ritmo metabólico basal, medido en (W/m^2);

W es la potencia mecánica efectiva, medida en (W/m^2);

I_{cl} es el aislamiento de la ropa, medida en ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$);

f_{cl} es el factor de superficie de la ropa;

t_a es la temperatura del aire, medida en ($^{\circ}\text{C}$);

v_{ar} es la velocidad del aire relativa, medida en (m/s);

p_a es la presión parcial del agua, medida en (Pa);

h_c es el coeficiente de transmisión de calor por convección, medida en [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$];

t_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa, medida en ($^{\circ}\text{C}$);

1 unidad metabolica = 1 met= 58,2 W/m^2 ; 1 clo = 0,155 $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$

Mientras que el PMV predice el valor de los votos en las encuestas, el PDD establece una predicción de la cantidad de personas insatisfechas térmicamente, es decir, personas que sienten frío o calor. Se pueden relacionar usando la ecuación (13) [2]. Esta relación de forma gráfica se puede ver en Figura

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)} \quad (13)$$

2-1.PDD en función de PMV [16].

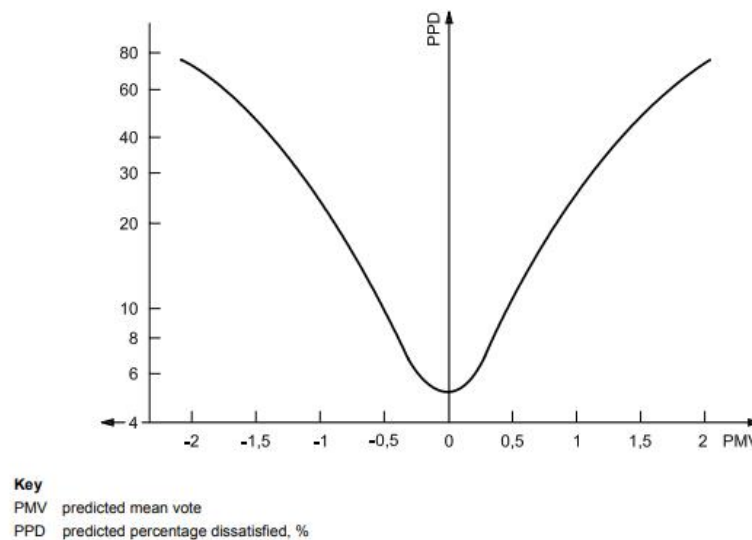


Figura 2-1.PDD en función de PMV [16].

2.1.6.2 Temperatura de bochorno

El Heat Index, o temperatura de bochorno en español es un índice que combina la temperatura del aire y la humedad relativa en zonas de sombra para aproximar la temperatura percibida por el ser humano. Este índice toma suposiciones sobre el ritmo metabólico basal, la cantidad de actividad física, la tolerancia individual al calor, la exposición a la luz solar y a la velocidad del aire. Las desviaciones significativas de estos factores darán lugar a valores del índice que no reflejarán con exactitud la temperatura percibida. [25]. Se clasifica el confort térmico en: cuidado, extremo cuidado, peligroso y extremo peligro, como se puede ver en la Tabla 2

T(°C) HR(%)	80 °F (27 °C)	82 °F (28 °C)	84 °F (29 °C)	86 °F (30 °C)	88 °F (31 °C)	90 °F (32 °C)	92 °F (33 °C)	94 °F (34 °C)	96 °F (36 °C)	98 °F (37 °C)
40%	80 °F (27 °C)	81 °F (27 °C)	83 °F (28 °C)	85 °F (29 °C)	88 °F (31 °C)	91 °F (33 °C)	94 °F (34 °C)	97 °F (36 °C)	101 °F (38 °C)	105 °F (41 °C)
45%	80 °F (27 °C)	82 °F (28 °C)	84 °F (29 °C)	87 °F (31 °C)	89 °F (32 °C)	93 °F (34 °C)	96 °F (36 °C)	100 °F (38 °C)	104 °F (40 °C)	109 °F (43 °C)
50%	81 °F (27 °C)	83 °F (28 °C)	85 °F (29 °C)	88 °F (31 °C)	91 °F (33 °C)	95 °F (35 °C)	99 °F (37 °C)	103 °F (39 °C)	108 °F (42 °C)	113 °F (45 °C)
55%	81 °F (27 °C)	84 °F (29 °C)	86 °F (30 °C)	89 °F (32 °C)	93 °F (34 °C)	97 °F (36 °C)	101 °F (38 °C)	106 °F (41 °C)	112 °F (44 °C)	117 °F (47 °C)
60%	82 °F (28 °C)	84 °F (29 °C)	88 °F (31 °C)	91 °F (33 °C)	95 °F (35 °C)	100 °F (38 °C)	105 °F (41 °C)	110 °F (43 °C)	116 °F (47 °C)	123 °F (51 °C)
65%	82 °F (28 °C)	85 °F (29 °C)	89 °F (32 °C)	93 °F (34 °C)	98 °F (37 °C)	103 °F (39 °C)	108 °F (42 °C)	114 °F (46 °C)	121 °F (49 °C)	128 °F (53 °C)
70%	83 °F (28 °C)	86 °F (30 °C)	90 °F (32 °C)	95 °F (35 °C)	100 °F (38 °C)	105 °F (41 °C)	112 °F (44 °C)	119 °F (48 °C)	126 °F (52 °C)	134 °F (57 °C)
75%	84 °F (29 °C)	88 °F (31 °C)	92 °F (33 °C)	97 °F (36 °C)	103 °F (39 °C)	109 °F (43 °C)	116 °F (47 °C)	124 °F (51 °C)	132 °F (56 °C)	
80%	84 °F (29 °C)	89 °F (32 °C)	94 °F (34 °C)	100 °F (38 °C)	106 °F (41 °C)	113 °F (45 °C)	121 °F (49 °C)	129 °F (54 °C)		
85%	85 °F (29 °C)	90 °F (32 °C)	96 °F (36 °C)	102 °F (39 °C)	110 °F (43 °C)	117 °F (47 °C)	126 °F (52 °C)	135 °F (57 °C)		
90%	86 °F (30 °C)	91 °F (33 °C)	98 °F (37 °C)	105 °F (41 °C)	113 °F (45 °C)	122 °F (50 °C)	131 °F (55 °C)			
95%	86 °F (30 °C)	93 °F (34 °C)	100 °F (38 °C)	108 °F (42 °C)	117 °F (47 °C)	127 °F (53 °C)				
100%	87 °F (31 °C)	95 °F (35 °C)	103 °F (39 °C)	112 °F (44 °C)	121 °F (49 °C)	132 °F (56 °C)				

Tabla 2.NOAA national weather service: heat index [18].

Cuidado
 Extremo cuidado
 Peligro
 Extremo peligro

2.2 Confort acústico

El sonido es una vibración que se propaga como una onda mecánica a través de un medio, puede ser fluido o sólido. En la fisiología el sonido es la recepción de dichas ondas y su precepción por el cerebro. Solo las ondas acústicas comprendidas entre los 20Hz y los 20Khz pueden ser oídas por el ser humano.

Las ondas sonoras son generadas por una fuente vibratoria, estas vibraciones se propagan hacia el medio que lo rodea, alejándose de la fuente vibradora formando así la onda acústica. Durante la propagación las ondas pueden ser reflejadas, refractadas o atenuadas por el medio [26]. Se suelen simplificar a ondas planas sinusoidales que se caracterizan por estas propiedades: frecuencia o su inversa el periodo; amplitud, presión sonora o intensidad; velocidad y dirección.

Un buen ambiente acústico es absolutamente esencial para tener un alto nivel de satisfacción y salud moral entre los residentes. El ruido y otros sonidos molestos provienen tanto de fuentes interiores como exteriores. La ventilación y el aislamiento del ruido exterior se convierten en una contradicción para los seres humanos. Muchos estudios demuestran que el ruido tiene un impacto no solo en el confort sino en la productividad [12], [27].

Para el descanso, el ambiente acústico favorable se considera aquel que no interfiere con el sueño. Para lograr una calidad acústica positiva en una sala, deben considerarse: el aislamiento acústico, los servicios HVAC del edificio y las vibraciones que producen. Aunque la mayoría de los ruidos ambientales se pueden expresar de varias formas como potencia, presión e intensidad, en la práctica todos los ruidos se denotan por el nivel de presión sonora dB. A modo de ejemplo, en la Tabla 2 se listan los estándar nacionales chinos de los niveles de sonido necesario en áreas urbanas [28].

Clases	Distrito	Día	Noche
0	Hotel	50	40
1	Residencia, educacional	55	45
2	Comercial	60	50
3	industrial	65	55
4	proximidades de carreteras y vías de tren	70	55

Tabla 3. Estándares nacionales chinos en zonas urbanas (dB) [23].

En comparación con otros tipos de contaminaciones, la contaminación ambiental se ha visto obstaculizado por el insuficiente conocimiento de sus efectos de confort en los seres humanos. Se estima que en los países de la Unión Europea alrededor del 40% de la población está expuesta al ruido del tráfico con un nivel de presión sonora superior a 55d B durante el día y 20% está expuesto al ruido con niveles superiores a 65dB. Más del 30% está expuesta por la noche a niveles de presión sonora equivalente a 55dB, que perturban el sueño.[29]

Está claro el impacto en el confort humano, pero existe conflicto al querer analizar los niveles de sonidos en interiores y las normativas sobre la protección de datos. La Ley de Protección de Datos en grabaciones de voz ha tomado importancia debido a los avances tecnológicos y el masificado uso de plataformas de virtuales.

Quedando establecido el carácter de dato personal de la voz, la Ley de Protección de Datos en grabaciones de voz rige en todos sus extremos, tanto en lo dispuesto en la Protección de Datos (RGPD) como en la Ley Orgánica de Protección de Datos (LOPDGDD). Ahora bien, las particularidades de la voz como dato personal y los medios a través de los que de ordinario se recoge, requiere de una adecuación específica, especialmente, en cuanto al deber de informar (Art. 13 RGPD) y, en su caso, de la obtención del consentimiento (Art. 6.1 y 7 RGPD) [30].

Debido a esto, se va a obviar el estudio de la contaminación acústica en este proyecto.

2.3 Confort visual

El confort visual es un término que aparece habitualmente en los estudios relacionados con la eficiencia energética en edificios. Sin embargo, la definición de confort visual en un sentido científico o profesional aún no se ha establecido. En algunos estudios se ha cuantificado el confort visual como nivel de iluminación [31], otros lo denominan como la satisfacción visual con el entorno[32] y una gran parte de estudios afirman que proporcionar confort visual es reducir el problema del deslumbramiento[33]–[35]. Existen indicios basados en el deslumbramiento como el Daylight Glare Probability (DGP)[32] y el Unified Glare Rating (UGR) [36].

Un ambiente interior óptimo puede aumentar el confort, la productividad, la salud y el bienestar de los trabajadores de oficina [37]. Varios estudios han demostrado que una mayor evaluación del ambiente de trabajo está relacionada con la satisfacción general del trabajo y contribuye a los resultados de la organización, como menos ausencias por enfermedad y un mayor compromiso de los empleados [38],[39]. Las condiciones de iluminación interior, como uno de los aspectos del entorno de trabajo, influyen en el estado de ánimo, el bienestar, el rendimiento de las tareas y el compromiso laboral de los ocupantes [4].

Una mayor satisfacción con las condiciones de iluminación en el trabajo suele asociarse con una mayor iluminancia en el plano de trabajo, la uniformidad de la iluminación, la ausencia de deslumbramiento, la direccionalidad de la luz (relación entre la iluminación horizontal y la vertical), así como la presencia de una ventana [5]. El acceso a la luz del día generalmente mejora la satisfacción con la iluminación y es preferible a la iluminación eléctrica por sí sola.

Es bien sabido que la luz del día es más deseable para las dimensiones psicológicas de confort visual. [34] Desde hace muchos años existen normas internacionales para algunos de los factores mencionados anteriormente, como el deslumbramiento, la direccionalidad de la luz, la uniformidad de la luz y la iluminancia del plano de trabajo [40]. Sin embargo, se ha informado de una amplia gama de diferencias en la iluminancia preferida; Newsham y Veitch descubrieron que poco más del 50% de los ocupantes estaban satisfechos dentro de los 100 lx de una iluminancia de plano de trabajo determinada [41]. La iluminancia preferida del plano de trabajo en un plano horizontal era mayor [42] o menor [43], que la media de 500 lx, pero no se conocen bien las razones de estas diferencias.

En la última década se ha reconocido que la luz también modula muchas funciones no visuales, como el reloj biológico que impulsa nuestros ritmos aproximados de alerta de 24 horas (circadianos), la temperatura corporal central, la secreción hormonal [44] y afecta al sueño [45]. La luz policromática durante el día aumenta el estado de alerta y el rendimiento cognitivo [46]. Además, la exposición a la luz policromática también mejora el estado de ánimo y la vitalidad de los oficinistas sanos durante el invierno en el hemisferio norte.

2.3.1 Flujo luminoso

Medida de potencia luminosa recibida, es un indicador de como de sensible es el sistema óptico humano en diferentes longitudes de onda. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el lumen (lm). Para medirla se usan los luxómetros, contienen una célula fotoeléctrica capaz de captar la luz y convertirla en impulsos eléctricos.

2.3.2 Intensidad luminosa

Es la cantidad de luz visible que se emite en una unidad de tiempo por unidad de ángulo sólido. La unidad para la cantidad de luz que fluye de una fuente en un segundo cualquiera (la potencia luminosa, o flujo luminoso) se llama lumen, este, se evalúa con referencia a la sensación visual. La unidad de intensidad luminosa es un lumen por estereorradián, que es la unidad de ángulo sólido: hay 4π estereorradianes alrededor de un punto encerrado en una superficie esférica. Esta unidad de intensidad luminosa también se denomina candela, un lumen por estereorradián, también puede ser medida mediante un luxómetro.

2.3.3 Luminancia

La luminancia es una medida fotométrica de la intensidad luminosa por unidad de superficie de la luz que viaja en una dirección determinada. Describe la cantidad de luz que atraviesa, se emite o se refleja desde una zona concreta y que cae dentro de un ángulo sólido determinado y expresa de forma objetiva el brillo o la brillantez[47]. Es medida en Nits o su equivalente en el SI cd/m^2 . Para cuantificarla es necesario el uso de un espectro radiómetro, un medidor de luminancia o un medidor de color.

2.3.4 Daylight Factor

El factor de luz de día (DF) es el porcentaje de nivel de iluminación dentro de un edificio en relación con la iluminación que existe fuera del edificio. Se puede definir como la iluminancia debida a la luz diurna

$$DF = \frac{E_i}{E_o} \cdot 100$$

Donde (E_i) es la iluminancia debida a la luz diurna en el interior del edificio y (E_o) la iluminancia exterior en un plano horizontal con el cielo nublado y sin obstáculos. [48] Para calcular E_i es necesario conocer la cantidad de luz exterior que es recibida en el interior del edificio. La luz directa procedente del cielo en el punto considerado se denomina SC. La luz reflejada en una superficie exterior y que llega al punto considerado se llama ERC. La luz que atraviesa la ventana y llega al punto, pero a través de la

reflexión de una superficie interna se denomina *IRC*. La suma de estos parámetros da la iluminancia por la luz diurna.

$$\text{Iluminancia} = SC + ERC + IRC$$

La *SC* puede aumentar colocando una ventana que esté libre de obstáculos, para mejorar la *ERC* y la *IRC* se puede pintar de color blanco o colores claros los alrededores del edificio o la habitación a medir respectivamente. [49]

2.3.5 Iluminación

La medición de la luz o fotometría se refiere generalmente a la cantidad de luz que incide sobre una superficie y a la cantidad de luz que emerge de una lámpara u otra fuente, junto con los colores que pueden ser representados por esta luz. El ojo humano responde de forma diferente a la luz de las distintas partes del espectro visible, por lo que las mediciones fotométricas deben tener en cuenta la función de luminosidad al medir la cantidad de luz útil.

La unidad básica de medida del SI es la candela (cd), que describe la intensidad luminosa, todas las demás unidades fotométricas se derivan de la candela. La luminancia, por ejemplo, es una medida de la densidad de la intensidad luminosa en una dirección determinada. Describe la cantidad de luz que atraviesa o se emite desde una zona concreta, y que cae dentro de un ángulo sólido determinado. La unidad del SI para la luminancia es la candela por metro cuadrado (cd/m²). La cantidad de luz útil emitida por una fuente o el flujo luminoso se mide en lumen (lm). La unidad SI de iluminancia y emitancia luminosa, que es la potencia luminosa por área, se mide en lux. Se utiliza en fotometría como medida de la intensidad, percibida por el ojo humano, de la luz que incide o atraviesa una superficie.

2.4 Calidad del aire

La calidad del aire en interiores o comúnmente llamada (IAQ). Es conocido por afectar a la salud, confort y bienestar de los ocupantes del edificio. Una baja calidad del aire puede producir *sick building síndrome* y reducir la productividad y aprendizaje de los seres humanos. La IAQ se ve afectada por contaminantes como el polen, polvo y compuestos orgánicos volátiles y gases como el dióxido de carbono, radón o contaminantes microbianos. La monitorización de éste parámetro implica el modelado de las corrientes de aire en interiores y toma de muestras de aire y de las superficies de los edificios.[50]

La contaminación del aire es una fuente de enfermedades, sobre todo en países en vías de desarrollo. El carbón, la madera o carbón y los residuos de realizar tareas como cocinar son los agentes contaminantes más comunes. Se estima que entre 1.5 millones y 2 millones de muertes en los años 2000 fueron provocadas por trabajar en espacios con una concentración de partículas elevadas.[51] Pero no sólo son en estos sectores donde se encuentran problemas derivados de la calidad del aire. Empleados han presentado síntomas de síndrome del edificio enfermo como picor de garganta, escozor de ojos y dolores de garganta en escuelas, hospitales y oficinas. Sin embargo estos síntomas son tan comunes y pueden ser producidos por más de una causa o por combinación de ellas, por lo tanto habría que hacer un estudio antes de afirmar que fueron causados por la calidad del aire.[52] Los contaminantes más comunes son:

2.4.1 Humo del tabaco

Las personas afectadas por el humo de tabaco de otra persona se conocen como fumadores pasivos. Este humo contiene partículas derivadas de monóxido de carbono, del orden de PM_{2,5} y PM₁₀, estas partículas son especialmente dañinas para los bronquiolos y alvéolos del pulmón.

2.4.2 Productos de combustión

Los productos de combustión debido a cocinar es uno de los principales contaminantes en interiores y puede llegar a producir problemas de salud graves e incluso muerte prematura. La combustión de hidrocarburos combinada con las emisiones de óxido de nitrógeno y óxido de sulfuro producen

alteraciones en el sistema respiratorio. [53] Como se puede ver en la Figura 2-2 es un problema de alcance global.

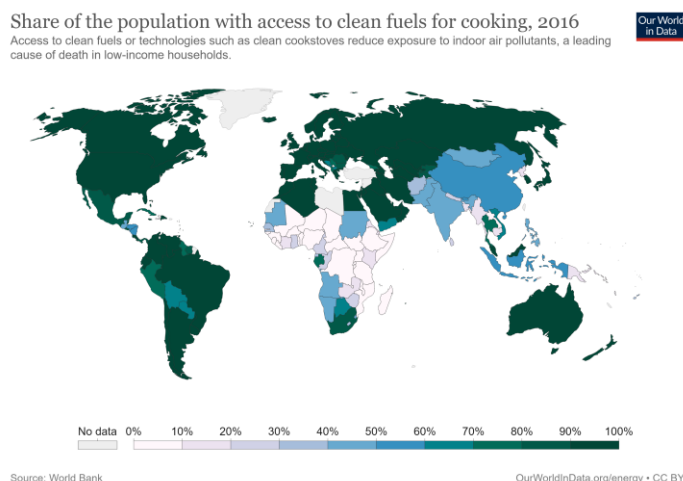


Figura 2-2. Porcentaje de la población con acceso a fuentes combustibles seguros para cocinar [37].

2.4.3 Gas radón

El radón es un gas invisible y radioactivo producido por la desintegración radioactiva del radio, que se puede encontrar en ciertos materiales de construcción y en las formaciones rocosas bajo los cimientos. El radón es probablemente el mayor peligro en cuanto calidad de aire en interiores en Europa y Estados Unidos, y se le adjudican más de diez mil muertes por cáncer de pulmón anualmente[54].

El gas radón viaja entre los poros del suelo hasta alcanzar la superficie debido a la diferencia de presiones. Las rocas ricas en uranio son las que tienen también las que producen más gas radón, pero a diferencia del uranio el radón tiene un tiempo de desintegración muy corto, 3,8 días.

El aislamiento y sellado del suelo usando losas de hormigón, el uso de sistemas de drenaje de agua y una mejor ventilación son las medidas más populares para reducir la concentración de este gas. [55]

2.4.4 Monóxido de carbono

Uno de los contaminantes del aire de interiores más tóxicos es el monóxido de carbono (CO), un gas incoloro e inodoro que es el producto de una combustión incompleta. Las fuentes más comunes del monóxido de carbono son el humo de tabaco, calentadores y sistemas de calefacción que utilizan combustibles fósiles. El monóxido de carbono puede provocar náuseas, inconsciencia e incluso, la muerte.

2.4.5 Compuestos orgánicos volátiles

Los (VOC) contienen elementos como oxígeno, cloro, bromo, hidrógeno o nitrógeno. Emitidos por una gran variedad de productos usados en el día a día (pinturas, productos de limpieza, lacas, impresoras) contribuyen a la formación del smog fotoquímico después de reaccionar con elementos presentes en la atmosfera también afectan a la salud de los seres humanos. A corto plazo pueden causar: irritación de ojos, náuseas, dolor de cabeza, vómito de sangre, mareos, y fatiga entre otros. [54].

2.4.6 Modelos e índices

Un índice de calidad de aire o AQI es un número usado por agencias gubernamentales para expresar como de contaminado es el aire. Canadá, Hong Kong, India, Corea del Sur, Reino Unido, la Unión Europea y Estados Unidos tienen sus propios índices de calidad de aire. Aunque sus estándares son ligeramente diferentes, los métodos de cálculo y representación son similares en todos los países.

Jungho Kang y Kwang-II Hwang desarrollaron en 2016 un índice de calidad de aire “completo” diseñado para la monitorización y representación a tiempo real de la calidad del aire. Además, para la supervisión de la calidad del aire basada en el IoT, deben tenerse en cuenta los siguientes requisitos:

- Mínima sobrecarga de procesamiento: Los dispositivos IoT suelen utilizar MCU de gama baja, por lo que la carga de procesamiento debe minimizarse.
- Uso reducido de la memoria: Al calcular un índice de calidad del aire global e individual, el consumo de memoria debe ser mínimo, ya que, debido a la rentabilidad, el sistema tiene una memoria pequeña.
- Capacidad de gestión de valores atípicos o ausentes: Los sensores utilizados en los sistemas de calidad del aire basados en el IoT pueden hacer frente de forma eficaz a varios valores atípicos o faltantes causados por un intervalo de detección frecuente y de detección y las operaciones concurrentes intensivas.
- Indicación que represente a todos los contaminantes: Con el fin de notificar la información actual sobre la calidad del aire en tiempo real, es necesario un método de indicación intuitivo.
- Respuesta rápida con respecto a los cambios de la calidad del aire en tiempo real: Un índice (o indicador) exhaustivo debe ser capaz de responder rápidamente a los cambios dinámicos de la calidad del aire interior.

A diferencia de AQI, el CIAQI incluye VOC, CO y PM10, que son contaminantes básicos. Las concentraciones de cada contaminante está basado en el estándar surcoreano [56].

Tabla 4. Índices de calidad del aire.

Categoría		A		B		C		D	
descripción		buena		moderada		no saludable		muy poco saludable	
Valores	I _{LO}	0		51		101		251	
	I _{HI}	50		100		250		400	
Concentración		BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}	BP _{LO}	BP _{HI}
Voc (ug/m3)		0	200	201	350	351	500	501	757
CO(ppm)		0	4,99	5	9,9	10	14,99	15	20
PM(ug/m3)		0	30	31	90	91	140	141	750

Un problema de AQI es que es un método basado en la media de la sección es demasiado lenta para representar la calidad del aire a tiempo real. Por eso se ha usado la media móvil exponencial, que muestra un buen rendimiento en el suavizado de valores atípicos y requiere poco uso de memoria.[57]. La EMA puede ser calculada mediante la ecuación (13). El coeficiente α representa el grado de la ponderación, un factor constante que suaviza y que toma valores entre 0 y 1. Un α más alto suaviza más rápidamente las observaciones más antiguas. Y_t representa el valor que tiene en el tiempo t y S_t es el valor del EMA en el tiempo t .

$$S_t = \begin{cases} Y_0 & \text{si } t = 0 \\ \alpha \cdot Y_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1} & \text{si } t > 0 \end{cases} \quad (13)$$

2.4.6.1 Índice de calidad de aire europeo

El índice de calidad de aire europeo está basado en la concentración de partículas gruesas PM10, partículas finas PM2.5, ozono O3, dióxido de nitrógeno NO2, y dióxido de azufre SO2. Este índice es

calculado horariamente en más de 3500 estaciones de monitorización de la calidad del aire, usando una combinación de datos actualizados por los países miembros de la Agencia Europa de Medio Ambiente y una previsión de la calidad de aire proporcionada por el Servicio de Vigilancia Atmosférica Copernicus.

La Unión Europea establece un estándar de calidad de aire a corto plazo (monitorización horaria o diaria) y a largo plazo (anual). Como la exposición prolongada a contaminantes puede provocar problemas severos de salud el estándar a largo plazo es mucho más estrictos.

2.5 Prototipado rápido e impresión 3D

El prototipado rápido es un grupo de técnicas que se utilizan para fabricar rápidamente un modelo a escala de una pieza física o un conjunto utilizando datos de diseño tridimensional asistido por ordenador (CAD). La construcción de la pieza o el conjunto suele realizarse mediante la tecnología de impresión 3D [58].

Los primeros métodos de creación rápida de prototipos fueron desarrollados a mediados de la década de 1980 y se utilizaron para producir modelos y prototipos. Estos prototipos se caracterizan por tener propiedades físicas que son similares a lo que se producirían usando otros métodos convencionales, como moldeo por inyección y extrusión, o moldeo por soplado, de esta manera se evita el fabricar los costosos moldes [59]. El prototipado rápido permite desarrollar el diseño reduciendo los costes totales de producción.

En la fase de producción, la impresión 3D permitirte producir piezas con costes más bajos mientras se mejora la calidad de los productos [60]. Esta tecnología es capaz de reducir costes y ahorrar tiempos en el proceso de desarrollo de un producto mediante la rápida fabricación de prototipos y modelos. También son utilizadas en la fabricación de soportes, fijaciones o piezas de uso final. Los tipos de impresión 3D de plásticos más utilizados son: el modelado por deposición fundida (FDM), el sinterizado selectivo por láser (SLS) y la estereolitografía (SLA).

2.5.1 Estereolitografía

La Estereolitografía (SLA) es una tecnología de impresión 3D usada para crear modelos, prototipos y diseños. Los fabrica capa por capa mediante procesos fotoquímicos en los que la luz hace que los monómeros y oligómeros químicos se unan para así formar polímeros [61]. Esta tecnología nació durante la década de 1970 pero no fue hasta 1984 que se le entregó la patente a Chuck Hull [61]. La estereolitografía puede utilizarse para crear prototipos de producto en desarrollo, modelos de uso médico y hardware informático, así como en muchas otras aplicaciones.

La estereolitografía es un proceso de fabricación aditiva que funciona enfocando un láser ultravioleta (UV) sobre una bandeja de resina de fotopolímero [62] con la ayuda de un software de fabricación asistida por ordenador o de diseño asistido por ordenador (CAM/CAD)[63]. El láser UV se utiliza para dibujar un diseño o una forma preprogramada en la superficie de la bandeja de fotopolímero. Los fotopolímeros son sensibles a la luz ultravioleta, por lo que la resina se solidifica fotoquímicamente y forma una sola capa del objeto 3D deseado. A continuación, la plataforma de construcción baja una capa y se vuelve a cubrir la parte superior de la cuba con resina. Este proceso se repite para cada capa del diseño hasta que el objeto 3D está completo. Las piezas terminadas deben lavarse con un disolvente para limpiar la resina húmeda de sus superficies.

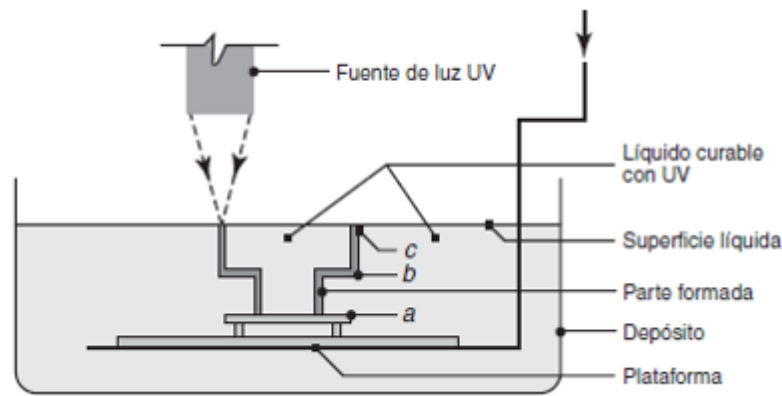


Figura 2-3. Diagrama de impresión SLA

También es posible imprimir objetos "de abajo a arriba" utilizando una bandeja con un fondo transparente y enfocando el láser UV o de polimerización azul intenso hacia arriba a través del fondo de la bandeja. Una máquina de estereolitografía invertida comienza una impresión bajando la plataforma de construcción hasta tocar el fondo de la bandeja llena de resina, y luego moviéndose hacia arriba la altura de una capa. A continuación, el láser UV graba la capa más baja de la pieza deseada a través del fondo transparente de la bandeja. A continuación, la bandeja se "sacude", flexionando y despegando el fondo de la bandeja del fotopolímero endurecido; el material endurecido se desprende del fondo de la bandeja y queda adherido a la plataforma de construcción ascendente, y el nuevo fotopolímero líquido fluye desde los bordes de la pieza parcialmente construida. A continuación, el láser UV escribe la segunda capa desde el fondo y repite el proceso. Una de las ventajas de este modo ascendente es que el volumen de construcción puede ser mucho mayor que la propia bandeja, y sólo se necesita fotopolímero suficiente para mantener el fondo de la bandeja de construcción continuamente lleno de fotopolímero. Este enfoque es típico de las impresoras SLA de sobremesa, mientras que el enfoque normal hacia arriba es más común en los sistemas industriales [64].



Figura 2-4. Ejemplo de inversión inversa[65]

2.5.2 Sinterización por láser selectiva

El sinterizado selectivo por láser (SLS) es una técnica de fabricación aditiva (AM) que utiliza un láser como fuente de energía para sinterizar material en polvo (normalmente nylon o poliamida), apuntando el láser a puntos en el espacio definidos por un modelo 3D uniendo el material para crear una estructura sólida. Es similar a la fusión selectiva por láser; las dos son instancias del mismo concepto, pero difieren en los detalles técnicos. El SLS es una tecnología relativamente nueva que hasta ahora se ha utilizado principalmente para la creación rápida de prototipos y para la producción de piezas de bajo volumen.

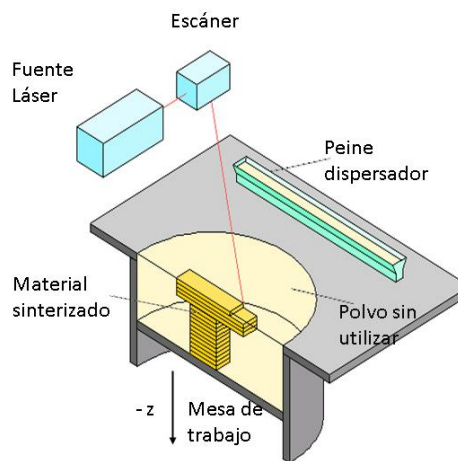


Figura 2-5. Partes de una impresora SLS

La tecnología de capas de fabricación aditiva, SLS, implica el uso de un láser de alta potencia (por ejemplo, un láser de dióxido de carbono) para fusionar pequeñas partículas de polvos de plástico, metal, cerámica o vidrio en una masa que tiene una forma tridimensional deseada. El láser fusiona selectivamente el material en polvo escaneando secciones transversales generadas a partir de una descripción digital tridimensional de la pieza (por ejemplo, a partir de un archivo CAD o de datos de escaneado) en la superficie de un lecho de polvo. Después de escanear cada sección transversal, el lecho de polvo desciende un grosor de capa, se aplica una nueva capa de material en la parte superior y se repite el proceso hasta completar la pieza [66].

Dado que la densidad de la pieza acabada depende de la potencia máxima del láser, más que de su duración, una máquina de SLS suele utilizar un láser pulsado. La máquina de SLS precalienta el material en polvo en el lecho de polvo algo por debajo de su punto de fusión, para facilitar que el láser eleve la temperatura de las regiones seleccionadas el resto del camino hasta el punto de fusión [67].

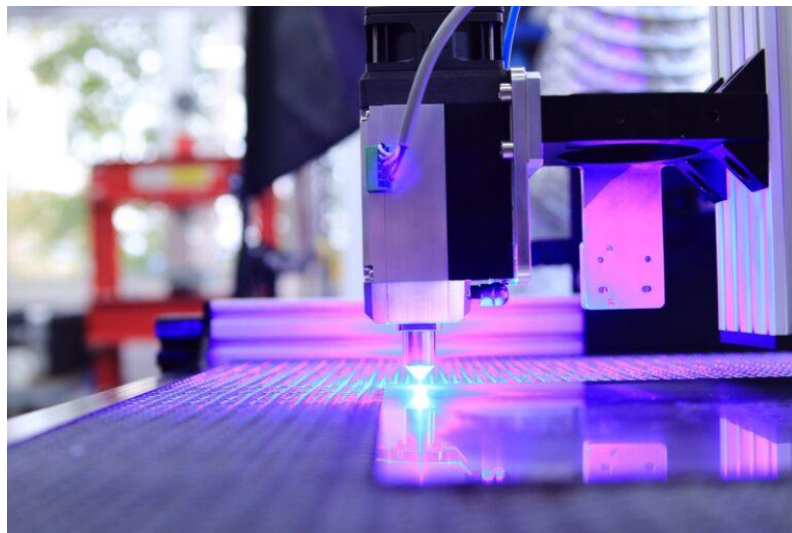


Figura 2-6. Ejemplo de impresora 3D de tecnología SLS

A diferencia de la SLA y la FDM, que suelen requerir estructuras de soporte especiales para fabricar diseños sobresalientes, la SLS no necesita un alimentador separado para el material de soporte porque la pieza que se está construyendo está rodeada de polvo no sinterizado en todo momento. Esto permite la construcción de geometrías complejas sin el uso de soportes. Además, como la cámara de la máquina está siempre llena de material en polvo, la fabricación de múltiples piezas tiene un impacto mucho menor

en la dificultad y el precio globales del diseño, se pueden colocar múltiples piezas para que encajen dentro de los límites de la máquina. Sin embargo, un aspecto del diseño que debe tenerse en cuenta es que con el SLS es "imposible" fabricar un elemento hueco pero totalmente cerrado. Esto se debe a que el polvo no sinterizado dentro del elemento no podría ser drenado.

La calidad de las estructuras impresas depende de varios factores, entre los que se incluyen las propiedades del polvo, como el tamaño y la forma de las partículas, la densidad, la rugosidad y la porosidad. Además, la distribución de las partículas y sus propiedades térmicas afectan mucho a la fluidez del polvo [68].

Los materiales comercialmente disponibles que se utilizan en el SLS vienen en forma de polvo son: las poliamidas (PA), los poliestirenos (PS), los elastómeros termoplásticos (TPE) y las poliarteretonas (PAEK) [69]. Las poliamidas son los materiales más utilizados en el SLS debido a su comportamiento ideal de sinterización como termoplástico semicristalino, lo que da lugar a piezas con propiedades mecánicas deseables [70].

2.5.3 Modelado por deposición fundida (FDM)

La fabricación con filamento fundido (FFF), también conocida como modelado por deposición fundida (con el acrónimo de marca registrada FDM), o llamada fabricación con filamento de forma libre, es un proceso de impresión en 3D que utiliza un filamento continuo de un material termoplástico[71]. El filamento se alimenta de una bobina a través de un cabezal extrusor de la impresora que se mueve y se calienta, y se deposita el filamento. El cabezal de impresión se mueve bajo control informático para definir la forma impresa. Por lo general, el cabezal se mueve en dos dimensiones para depositar una capa; a continuación, el cabezal de impresión se mueve verticalmente para comenzar una nueva capa. La velocidad del cabezal del extrusor también puede controlarse para detener e iniciar la deposición y formar un plano interrumpido sin que se produzcan hilos o goteos entre las secciones.

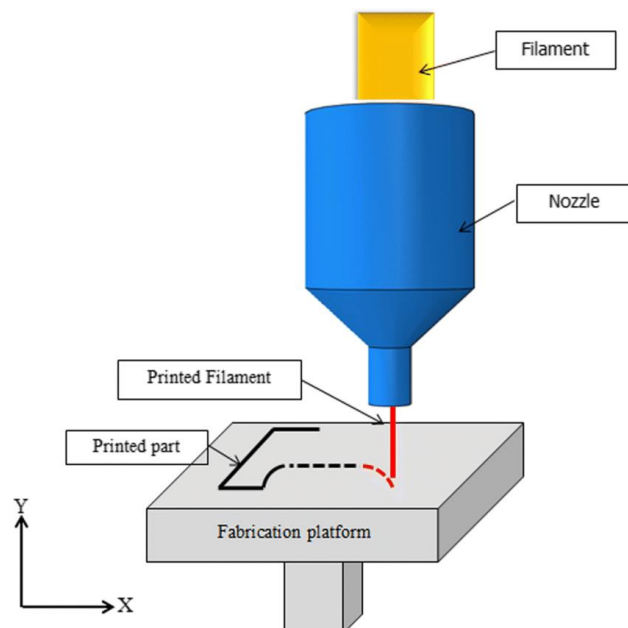


Figura 2-7. Diagrama de una impresora 3D FDM.

La impresión con filamento fundido es ahora el proceso más popular (por número de máquinas) para la impresión 3D de grado aficionado.[3] Otras técnicas como la fotopolimerización y la sinterización de polvo pueden ofrecer mejores resultados, pero son mucho más costosas.[72]

El extrusor de la impresora 3D es una pieza en la fabricación aditiva por extrusión de material es el responsable de la fusión del filamento y de su conformación en un perfil continuo. Se extruye una gran variedad de materiales de filamento, incluidos los termoplásticos como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS),[4] el ácido poliláctico (PLA), el polietileno tereftalato glicólico (PETG), el polietileno tereftalato

(PET), el poliestireno de alto impacto (HIPS), el poliuretano termoplástico (TPU) y las poliamidas alifáticas (nailon) [71].



Figura 2-8. Figura de acción realizada mediante impresión 3D FDM.

Una de las ventajas más evidentes de tener un diseño fácilmente escalable es la relación coste-tamaño. Las impresoras FDM son cada vez más grandes y menos caras, debido al bajo coste de las piezas y a la sencillez de los diseños. Otros tipos de impresoras cuestan mucho más por unidad de volumen de fabricación, simplemente porque son difíciles de escalar y los componentes clave siguen siendo bastante caros.

Otra ventaja es la flexibilidad del material. En cualquier impresora FDM, se puede imprimir una gran variedad de materiales termoplásticos y filamentos con relativamente pocas actualizaciones y modificaciones, algo que no se puede decir de otros estilos en los que el material debe ser una resina o polvo.

Una de las desventajas más mencionadas de la impresión 3D FDM es la calidad o el detalle de las piezas. Debido a que el material debe ser extruido en capas, y tiene un cierto espesor predefinido por la boquilla, las impresiones de alto detalle son difíciles de lograr y a menudo requieren mucho post-procesamiento para adquirir un aspecto profesional y acabado. Otra desventaja de las capas en la impresión FDM es que crean un punto débil inherente en la impresión donde se une cada capa, lo que hace que las impresiones sean menos resistentes e inadecuadas para ciertas aplicaciones.

2.6 Dispositivos de medición en el mercado

Hoy en día lo más básico en cuanto la monitorización de parámetros en interiores son los dispositivos digitales que miden la temperatura y humedad (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Estos dispositivos suelen tener un consumo muy bajo y suelen tener también un precio reducido. Lo que los hace una herramienta muy útil para una monitorización vaga de los parámetros de confort de una habitación.



Figura 2-9. Termómetro higrómetro digital.

Con la llegada del Covid-19, se han popularizado los medidores de calidad de aire. No porque puedan medir algún indicador de que el virus esté en el aire sino para calificar la calidad del aire. A través de otras variables (la más usada es el CO₂) se estima el nivel de ventilación de una habitación [73].



Figura 0-1. Sensor de CO₂ homologado [73].

3 DESAROLLO

3.1 Arquitectura general

Es imposible monitorizar con un único dispositivo varias habitaciones a la vez, por lo que para hacer mediciones de un área más amplia, serán necesarios varios dispositivos recogiendo datos de forma simultánea. Con el objetivo centralizar la recogida de datos de toda una planta, por ejemplo, es necesario un nodo que sea capaz de comunicarse con todos los demás. Este nodo central no contiene los sensores necesarios para la recogida de datos, así como los nodos extremos no necesitan la capacidad computacional de acumular y procesar los datos de las demás salas, por lo que una especialización es necesaria. La arquitectura a seguir será la de cliente-servidor: el cliente, tendrá la función de medir los datos en una habitación y el servidor tendría la función de recoger los datos de todo un edificio y procesar los valores finales de confort en base a los datos en bruto de los sensores individuales. A continuación, se describe el funcionamiento de cada uno de los dos tipos de nodos, además de especificar las características de la comunicación entre ambos.

3.2 Cliente

El cliente es el dispositivo que va a contener los sensores. Para ello se necesitarán un sensor para medir el confort térmico, un sensor luminosidad para medir el confort lumínico y un sensor de calidad de aire. Además de estos sensores, será necesario un microcontrolador para procesar los datos, con un módulo adicional con capacidad para bajo consumo, y un módulo de transmisión de radio y antena para poder transmitir la información al cliente. Por último, aunque siendo un componente opcional, se incluirá también una pantalla de tinta electrónica para mostrar los datos recogidos, siendo esta una opción con un gasto energético mínimo.

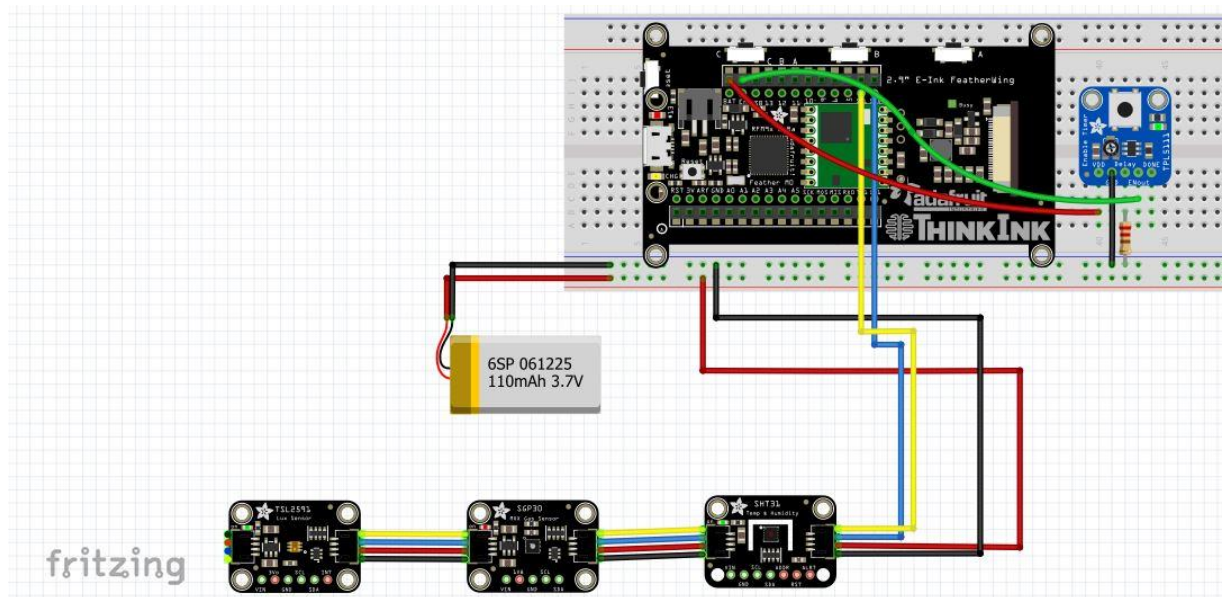


Figura 3-1. Esquema eléctrico del cliente.

3.2.1 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado digital programable compuesto por una CPU, memorias ROM y RAM, entradas y salidas. Es capaz de realizar las tres funciones principales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada y salida. Es una herramienta útil para el control de sensores, control de motores, robots etc.

Todos los microcontroladores contienen un procesador que ejecuta el código y un conjunto de periféricos como puertos USB o temporizadores. Lo que define un microcontrolador es la relación entre el procesador, los periféricos y los pines de entrada/salida.

En primer lugar, tenemos los microcontroladores de 8bits Figura 3-2. Con un diseño más simple. Existen muchos ejemplos de código sobre este tipo de controladores y son sencillos de utilizar. Suelen tener pocos periféricos y estar conectados directamente a los pines o incluso directamente al procesador.

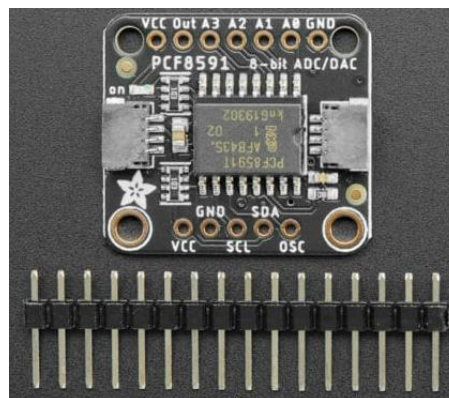


Figura 3-2. Microcontrolador de 8 bits[74].

En los microcontroladores de 32 bits Figura 3-3 el microcontrolador en sí es sólo una pequeña parte del chip. En este caso los periféricos son dispositivos conectados a un bus de datos y la mayor parte de los componentes del *Single board computer* (SBC) pueden ser clasificados como tal. La libertad de configurar los periféricos hace que este tipo de microcontroladores sean muy flexibles.

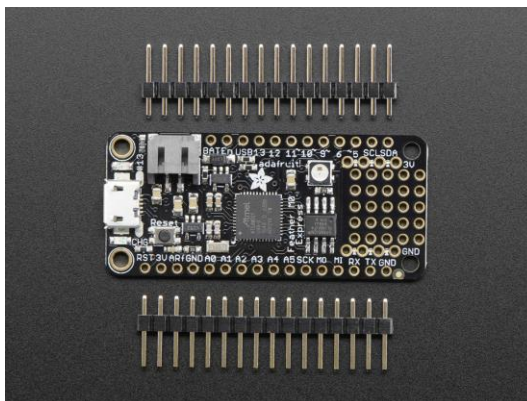


Figura 3-3. Microcontrolador de 32 bits[74].

Por último, los dispositivos System On Chip (SoC) son microcontroladores de 32 bits con la peculiaridad de que contiene diversos componentes integrados en un mismo chip y suelen estar diseñados con el objetivo de suplir una necesidad específica. Por ejemplo, el ESP8266 está diseñado para tener conectividad WiFi con un precio y tamaño reducido.

Para este proyecto se va a utilizar un microcontrolador de 32 bits y en concreto uno de la casa ARM con una placa de desarrollo fabricada por Adafruit. Las placas más sencillas de usar son las que usa interfaz de bloques, es el caso de Adafruit con CircuitPython, basado en Python3, y una amplia variedad de sensores, microcontroladores y demás periféricos sencillo de utilizar gracias a sus librerías, además también existe la opción de utilizar el software de desarrollo de arduino.

La gama Feather M0 utiliza un microcontrolador SAM21G, que tiene las características de multiplexación de bus y periférica típicas de una board de 32 bits. Además, cuenta con la memoria RAM necesaria para soportar la carga de trabajo de los sensores y es compatible con pantallas LED y pantallas de tinta electrónica, que serían especialmente útiles para mostrar los valores medidos por los sensores y el confort del habitáculo. En este proyecto se utilizará el modelo que dispone del módulo de comunicaciones RFM69 Figura 3-4.



Figura 3-4. Feather M0 Radio with RFM69[74].

3.2.2 Sensores.

3.2.2.1 Confort térmico

6 factores influyen en el confort térmico: temperatura del aire, temperatura de radiación, movimiento del aire, humedad, aislamiento de la ropa y ritmo metabólico basal.

Estos dos últimos son clasificados como factores personales. El ritmo metabólico basal depende de la actividad de la persona, pero también de otros factores más complicados de modelar como son la edad, peso, estado de forma físico y el sexo. Por otro lado, la ropa sí que puede ser más fácil de modelar teniendo en cuenta la época del año, pero los gustos personales y la gran diversidad de tipos de ropa y tejidos también dificulta este parámetro.

El movimiento del aire es un parámetro sencillo de medir. El problema en este caso radica en el sensor y en la localización del dispositivo. Los anemómetros son demasiado voluminosos. En los más comunes triplican el tamaño del objetivo del cliente.



Figura 3-5. Ejemplo de anemómetro.

Aparte de comprometer el diseño de un dispositivo compacto, también restringe su localización debido a la heterogeneidad de este parámetro en una habitación común. Lo mismo pasa con la temperatura de radiación. Ambos parámetros son de vital importancia para el confort térmico en una habitación, pero su complejidad para la medición se aleja de la sencillez buscada en el dispositivo a diseñar en este proyecto.

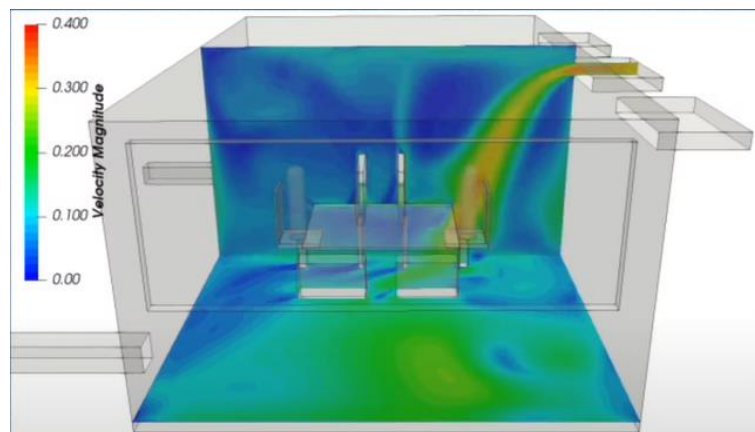


Figura 3-6. Modelado del movimiento del aire en una oficina. [75]

Teniendo esto en cuenta, los parámetros a medir para cuantificar el confort térmico serán la humedad y la temperatura. Muchos sensores suelen incorporar sistemas de medida para ambos parámetros, por lo que solo será necesario un único chip. Para este proyecto se han comparados 3 sensores fabricados por Adafruit y dos de Bosch

El AM2320 es el más barato, pero al no disponer el tipo de conexión STEMMA QT dificulta el diseño del circuito. Los sensores de Bosch son muy fiables y tienen una muy buena precisión en todos los parámetros además de poder medir la presión. Pero teniendo en cuenta que la presión no es irrelevante y que no trabajan con librerías de código abierta dificultaría enormemente la programación de los sensores. Por lo tanto, el sensor escogido para este proyecto es el AHT20, es el segundo con mejor precisión de humedad relativa siendo también el segundo más barato y con una diferencia de precio

considerable con los modelos más avanzados. Con la precisión y rango de uso que tiene es más que suficiente para este proyecto, es el sensor escogido para realizar el trabajo.

Tabla 5. Tabla comparativa de sensores de temperatura

Sensor	 AHT20	 SHT31	 BME280	 AM2320	 BME680
Precio	4,5\$	13,95\$	14.95\$	3.95\$	19.95\$
Calidad	HR±2 T±0.3°C	HR±2% T±0.3°C	HR ±3% P ±0.2Pa T±1°C	HR 5-10% T ±3°C	HR ±3% P ±0.18hPa T±0.01°C
Rango de uso	HR 20-80% T (-40)-85 °C	HR 20-80% T 20-60°C	HR 0-100% T (-40)-85 °C P 300–1100 hPa	HR 0-99% T(-40)-80°C	HR 0-100% T (-40)-85 °C P 300–1100 hPa

Para el cálculo del confort térmico se va a utilizar la fórmula de 0. Existen varias fórmulas para modelar las tablas originales Steadman Anderson (2013), Jonson y Long (2004) y Schoen (2005) [76]. Las dos primeras son funciones polinómicas y la tercera es exponencial. La fórmula aproxima el Heat Index con una precisión de ±1,3°F (0,7°C).

$$HI = C_1 + C_2 \cdot HT + C_3R + C_4T \cdot HR + C_5T^2 + C_6 \cdot HR^2 + C_7T^2 \cdot HR + C_8T \cdot HR^2 + C_9T^2 \cdot HR^3$$

HI= heat index (°F)

T=temperatura medida en bulbo seco (°F)

HR= humedad relativa (porcentaje que toma valores entre 0 y 100)

C ₁ = -42,3799	C ₂ = 2,04901523	C ₃ = 10,14333127
C ₄ = -0.0224,75541	C ₅ = -6,83783×10 ⁻³	C ₆ = -5,481717×10 ⁻²
C ₇ = 1,22874×10 ⁻³	C ₈ = 8,5282×10 ⁻⁴	C ₉ = 1,99×10 ⁻⁶

Para el cálculo en °C simplemente habría que utilizar los siguientes coeficientes

C ₁ = -8,78469475556	C ₂ = 1,61139411	C ₃ = 2,33854983889
C ₄ = -0,14611605	C ₅ = 0,012308094	C ₆ = -0,0164248277778
C ₇ = 2,211732×10 ⁻³	C ₈ = 7,2546×10 ⁻⁴	C ₉ = 3,582×10 ⁻⁶

3.2.2.2 Calidad de aire

En el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo clasifica de “contaminantes químicos característicos” al CO₂, CO, O₃ y VOC [77]. Aunque estos sean los más utilizados, existen peculiaridades dependiendo del índice y el espacio a medir. Por ejemplo, el Índice Nacional de Calidad del Aire (ICA) que mide en tiempo real la calidad de aire en estaciones repartidas por toda España miden el Dióxido de nitrógeno NO₂ y el Dióxido de azufre SO₂ [78] o el HCHO en el estándar portugués [79].

Tabla 6. Comparación de sensores de calidad de aire.

Sensor			
	CCS811	SPG30	BME680
Precio	19,95\$	17,5\$	19,95\$
CO ₂ (ppm)	400-8192	400-60000	400-5500
TVOC(ppb)	0-1187	0-60000	0-65000
H ₂ (ppm)	-	0-1000	-
Etanol (ppm)	-	0,3-30	-
Temperatura, humedad y presión	-	-	T 1°C HR3% 0,12 kPa

Para medir la calidad del aire se va a comparar entre tres sensores diferentes: CCS811, SGP30 y BM3688. Tanto el BME680 como el SGP30 relacionan sus lecturas con la temperatura, esto significa que si sube la temperatura la lectura de TVOC sube también. El BME680 es capaz de medir la temperatura, humedad y la presión, pero la temperatura ya va a ser medida con un sensor específico con una tolerancia mucho menor y la presión tiene una función irrelevante en la calidad del aire.



Figura 3-7. Sensor de calidad de aire BME680 [74].

Por un lado, tener 4 sensores en uno es una ventaja, pero en este proyecto ya vamos a tener un sensor específico para medir la temperatura y humedad con mayor precisión que el BME680 en estos parámetros. Por otro lado, el CC811 tiene el problema de mostrar mediciones muy irregulares del CO₂.
Figura 3-8.

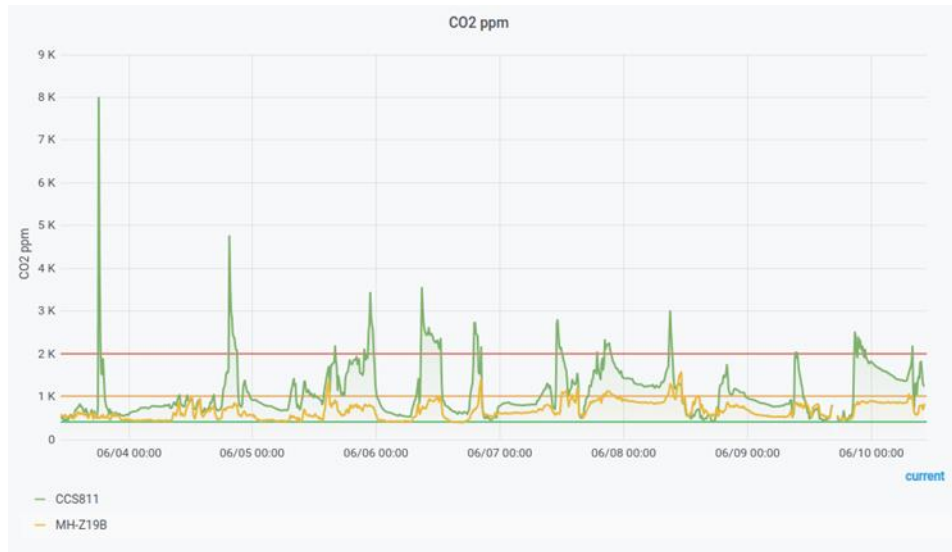


Figura 3-8. Comparación medidas tomadas por MH-Z19B y CCS811 [60].

Teniendo en cuenta que las ventajas del BME680 no se alinean con lo que se busca en un sensor de calidad de aire para este proyecto. Debido a su complejidad de uso se ha descartado. Por lo que se va a utilizar el SGP30 como sensor de calidad del aire.

Para el cálculo de la calidad del aire se ha tomado como referencia el modelo CIAIQI 2.4.5. En dicho índice se utiliza el monóxido de carbono como valor para estimar la calidad del aire. Se ha decidido no usar un sensor de monóxido de carbono porque estos suelen ser más voluminosos que la mayoría de los sensores de calidad de aire convencionales.



Figura 3-9. Sensor MQ-7 [74].

El sensor de CO más atractivo es el MQ-7, tiene un coste que suele rondar los 5€, un rango de operación de 10-500 ppm y una sensibilidad de 5 ppm son parámetros más que aceptables, pero hay que tener en cuenta que tiene un voltaje de operación de 5V y una potencia de 900 mW. Teniendo en cuenta se decide por descartar el uso de un sensor de CO y basarse en otros parámetros para estimar la calidad del aire en un habitáculo.

El SGP30 es capaz de medir más agentes aparte de TVOC y CO2 como el Etanol y el H2, pero estos valores no se tendrán en cuenta debido a que no son usados en los índices de calidad de aire más comunes [57].

Tabla 7. Índice de calidad del aire

Categoría	1		2		3		4	
descripción	excelente		buena		no saludable		tóxico	
Concentración	PC _{Inf}	PC _{Sup}	PC _{Inf}	PC _{Sup}	PC _{Inf}	PC _{Sup}	PC _{Inf}	PC _{Sup}
Voc (ug/m3)	0	200	201	350	351	500	501	757
CO2(ppm)	400	1000	1000	1500	1500	6000	6000	45000

Para que la calidad del aire se clasifique en una categoría ambos valores deben estar por debajo de los puntos críticos superiores (PC_{Sup}), en caso de disparidad de categorías debido a una diferencia notable entre los dos componentes se escogerá la categoría más peligrosa.

3.2.2.3 Confort visual

3.2.3 Alimentación

Existen dos formas de alimentar el microcontrolador. Se puede conectar el MicroUSB y la placa autorregula los 5V del USB a 3.3V o se puede conectar una batería, ya sea de polímero de litio (Lipo) o Ión de litio (Lilon) a través del puerto JST. Este esquema permite que el Feather pueda utilizar una batería recargable. Cuando se alimenta mediante el puerto MicroUSB también se empieza a cargar la batería a 100mA. El pin BAT está conectado al conector de la batería lipo, el pin USB que está conectado al USB y proporciona +5V si está conectado, el pin 3V que proporciona 3.3V y el pin GND para tierra.

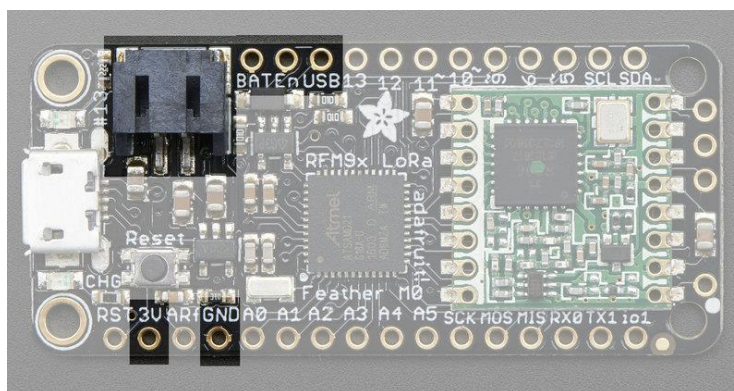


Figura 3-10. Sistema de alimentación del Feather [74].

Aparte de estas opciones, también se puede usar una batería portable con salida USB, útil para proyectos que necesiten ser móviles. A pesar de que su precio haya bajado por la masificación de su producción, sigue siendo la opción más cara para proyectos de este alcance.

Otra opción es usar un cargador común de teléfono móvil y con un cable microUSB. Esta opción por sí sola no es la más atractiva porque limita el posicionamiento del dispositivo a las cercanías de los enchufes de la habitación y a la longitud del cable. Sin embargo, es la forma más sencilla de recargar una supuesta batería.

También se puede alimentar el microcontrolador a través del pin de 5V, pero esta opción no es recomendada por el fabricante debido a que puede producir interacciones no deseadas al conectar el microUSB porque se estaría alimentando este puerto y esto podría “confundir o dañar la placa”.

Debido a la sencillez de montaje a través del conector JST, la opción escogida será la combinación de una batería Lipo como fuente de alimentación con la opción de recarga mediante el puerto microUSB. Para ser más concreto se ha escogido una batería de 500mA (Figura 3-11 Batería Lipo de 500mAh [80])

por su gran capacidad en relación con sus dimensiones y la longitud de su cable de conexión que permite alejarla lo suficiente del microcontrolador.



Figura 3-11 Batería Lipo de 500mAh [80].

Para esto se va utilizar un dispositivo TPL5111 de la casa Adafruit (Figura 3-12. Dispositivo de bajo consumo, TPL5111 [74]. Este dispositivo se conecta mediante un cable con conector STEMMA QT con salida hembra a los pines de DELAY y GND, cerrando así el circuito. El Adafruit TPL5111 es capaz de convertir cualquier circuito en un circuito de bajo consumo. Enciende y apaga el circuito utilizando un temporizador incorporado que puede variar desde 100ms hasta una vez cada dos horas. Básicamente, el TPL enciende un PIN VCC periódicamente, ajustable por potenciómetro o resistencia. Entonces esperará hasta que se reciba una señal del proyecto para decirle al TPL que puede desactivar el proyecto de forma segura apagando el pin VDD.



Figura 3-12. Dispositivo de bajo consumo, TPL5111 [74].

3.3 Sistema de comunicaciones

La idea de la comunicación es que haya varios dispositivos recogiendo datos que se comuniquen con un hub central que los reciba y los almacene o los reenvíe a un servidor externo. En este esquema, como el hub no debería estar demasiado lejos, no tenemos unos requisitos tremendamente exigentes de alcance. Este esquema se denomina cliente-servidor (los clientes son los dispositivos, el servidor es el hub). Pero para este proyecto se va a modelar solo para monitorizar en una única habitación.

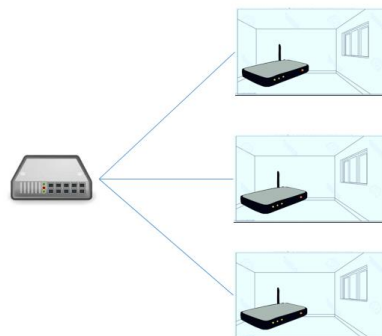


Ilustración 1. Esquema de sistema cliente servidor.

3.3.1 Wifi

Wifi es una tecnología inalámbrica que usa ondas radio para transmitir información. En comparación con las conexiones Ethernet. Una de las principales ventajas del sistema Wifi es su comodidad, permite que varios usuarios se conecten a través de la misma red en cuestión de segundos y sin necesidad de configuraciones. Esta facilidad de uso y comodidad no está presente en conexiones por cable. Es fácil de instalar y es un sistema flexible.

Por el otro lado, el sistema Wifi presenta problemas de seguridad a pesar de tener técnicas de encriptado sigue siendo vulnerable a los ciberataques. A pesar de que tiene un rango y ancho de banda limitado, este no sería un problema debido a los requisitos del dispositivo, pero su fiabilidad sí que lo es. Las redes Wifi funcionan con una frecuencia de 2,4GHz, esta frecuencia tiene muchas posibilidades de verse obstaculizada por las ondas electromagnéticas y otras formas de obstáculos. Como resultado se puede experimentar problemas de conectividad y una señal débil. [81]

3.3.2 LoRa

LoRaWAN es una especificación de redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Las redes LPWAN son tecnologías de comunicación inalámbrica que habilitan la transferencia de datos entre un Gateway y un dispositivo con un bajo consumo energético.[82]

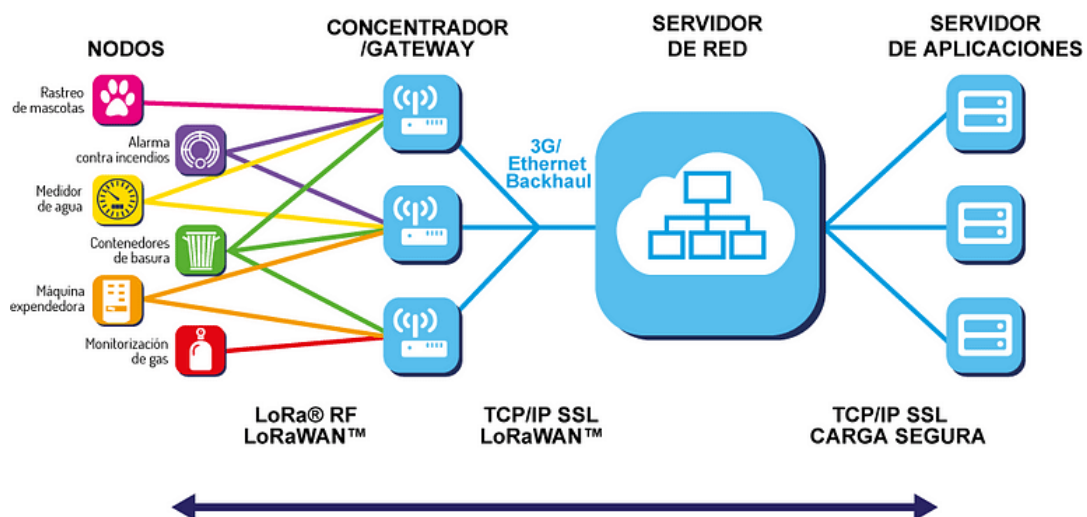


Figura 3-13. Diagrama de red LoRaWan [83]

LoRa es un control de acceso al medio (MAC), es decir, un protocolo de comunicaciones que establece un orden para que varios dispositivos en una red puedan compartir un canal común. Utiliza una técnica denominada espectro de ensanchado, que es una técnica de modulación que utiliza la redundancia, utiliza más ancho de banda del necesario, pero habilita una recepción de múltiples señales a la vez [84], [85].

Ventajas de LoRaWAN

- Gran alcance, del orden de kilómetros
- Opera en frecuencias sin licencia
- Seguridad, contiene un sistema de encriptado AES
- Comunicación bidireccional
- Costes de conexión menores
- Fácil de implementar por su estructura sencilla

Desventajas de LoRaWAN

- Posibles interferencias y problemas con la latencia por usar frecuencias sin licencia

- No es el sistema mejor sistema para aplicaciones en tiempo real por el jitter y alta latencia
- No es compatible con sistemas que requieran grandes cantidades de datos

3.3.3 Bluetooth

Bluetooth es un sistema de comunicación inalámbrico de corto alcance usado por millones de productos, portátiles, teléfonos inteligentes, auriculares, teclados y coches son unos ejemplos de uso de esta tecnología. Estos dispositivos consiguen conectarse entre sí usando ondas de radio de baja potencia entre 2.4000GHz y 2.483.5 GHz.[86]

Existen dos tipos de tecnologías Bluetooth, ambas utilizan las mismas bandas de frecuencias pero BLE (*Bluetooth Low Energy*) es la más usada porque es más eficiente y puede ser usada para *broadcast* o red inalámbrica mallada.[87]

Ventajas del *Bluetooth*:

- bajo consumo
- bajo coste
- evita interferencias con otros dispositivos *wireless*
- simplicidad de uso

Desventajas del *Bluetooth*

- velocidad de transmisión lenta, 25Mbps
- su alcance máximo es 100m
- compatibilidad, entre las distintas versiones

3.3.4 Zigbee

Zigbee es un protocolo de comunicación inalámbrica de radiodifusión digital de bajo consumo basado en el IEEE 802.15.4 y que se utiliza para crear redes que requieren una baja tasa de transferencia de datos, eficiencia energética y seguridad en la red. Se emplea en sistemas de automatización de edificios, control de la calefacción y en domótica. Fue diseñado con el objetivo de ser más sencillo y menos costoso que otras tecnologías de redes personales como Bluetooth [88].



Figura 3-14. Dispositivos y empresas que guardan compatibilidad con Zigbee[89]

Usa una topología de red inalámbrica de topología en malla, lo que le permite ofrecer una alta fiabilidad y un alcance razonable. Unas de las características que definen a Zigbee es la seguridad en las comunicaciones. Lo consigue mediante claves criptográficas de 128 bits y un sistema de claves simétricas [90].

Ventajas de *Zigbee*:

- Gran alcance
- Es compatible con sistemas de bajo consumo

Desventajas de *Zigbee*:

- Es más costoso que otros protocolos que proporcionan los mismos servicios
- Tasa de transmisión baja
- Es muy propensa a las interferencias

3.3.5 Symphony Link

Symphony Link es comúnmente utilizado en empresas e industrias que necesitan localizar y supervisar de forma segura los activos a través de la nube mediante AirFinder. Es una red LPWA (Low-Power Wide Area), es decir que se comunica de manera inalámbrica utilizando menos potencia que otro tipo de redes como Wifi y logra alcances superiores a *Bluetooth* y NFC.

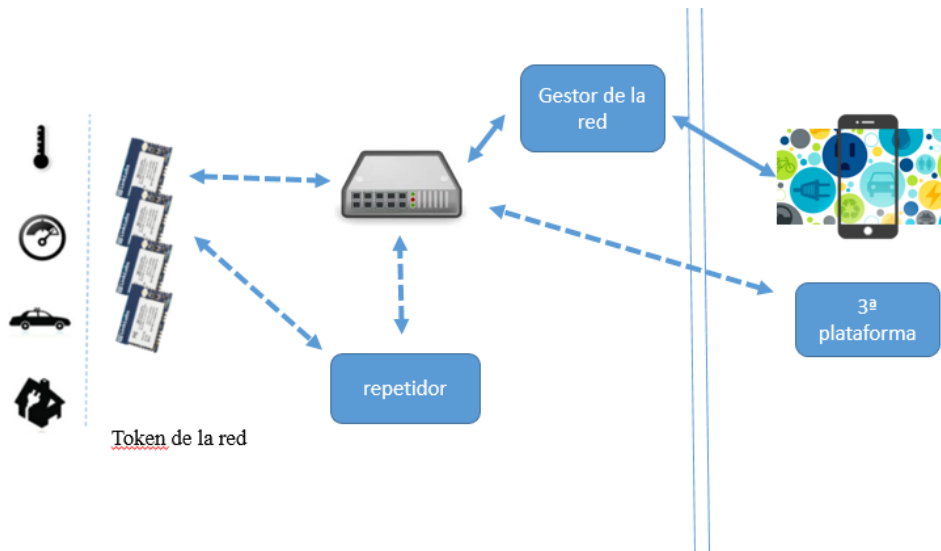


Figura 3-15. Arquitectura de la red Symphony Link

Se caracteriza por utilizar repetidores de bajo consumo que no tienen gran impacto en la latencia, por proporcionar QoS, mediante la manipulación de frecuencias, ventanas horarias (times slots) y las prioridades de nodos.

Ventajas de Symphony Link:

- Garantiza que el receptor recibe el mensaje, esto es posible porque precisa un paquete ACK en el cada sentido
- QoS permite priorizar las rutas de tráfico

Desventajas de Symphony Link:

- Bajo rendimiento
- Tecnología patentada
- Requiere de chips con modulo LoRa
- La comunidad de usuarios que usan este tipo de comunicación es pequeña

3.3.6 Z-Wave

La red Z-Wave es una red de malla basada en ondas de radio de baja energía. Esta tecnología inalámbrica es usada en domótica, sistemas de seguridad y alarmas de emergencia. Igual que otros protocolos y sistemas dirigidos al mercado de la automatización del hogar y la oficina, los sistemas Z-Wave pueden controlarse a través de Internet, desde un teléfono inteligente, Tablet, ordenador o altavoz inteligente.

Z-Wave proporciona la interoperabilidad de la capa de aplicación entre los sistemas de control del hogar de diferentes fabricantes que forman parte de su alianza. Hay un número creciente de productos Z-Wave interoperables; más de 1700 en 2017,[91] y más de 2600 en 2019.

Ventajas de Z-Wave:

- Sencilla instalación y es sencillo añadir y quitar dispositivos una vez formada la red
- Gran eficiencia energética
- Utiliza el AES-128 como sistema de encriptado, proporcionando conexiones seguras

Desventajas de Z-Wave:

- Su cobertura es limitada y por lo tanto se necesitan más dispositivos para cubrir una región amplia, esto aumenta directamente el coste
- La tecnología requiere un nivel elevado de conocimientos para mantenerla a salvo de personas no autorizadas debido a que funciona en radiofrecuencia y es inalámbrica y por su naturaleza puede ser accedida por cualquiera

3.3.7 RFID

Radio Frequency Identification o RFID utiliza campos electromagnéticos para identificar y rastrear automáticamente etiquetas adheridas a los objetos. Un sistema RFID consta de un pequeño transpondedor de radio, un receptor de radio y un transmisor. Cuando se activa por un impulso electromagnético de interrogación de un dispositivo lector de RFID cercano, la etiqueta transmite datos digitales, normalmente un número de inventario identificativo, al lector. Este número puede utilizarse para hacer un seguimiento de los bienes inventariados.



Figura 3-16. Uso de la tecnología RFID para recuento de armamento. [92]

El uso de RFID se ha popularizado en los últimos años en IoT pero en un contexto exclusivamente industrial, en el sector de transporte y en atención médica para poder clasificar a los pacientes con el fin de automatizar el control de medicamentos. Sin embargo, el RFID tiene grandes problemas de seguridad y disponibilidad. La transferencia de datos entre etiquetas y lectores es vulnerable a interferencias o por transmisiones simultáneas en el mismo canal. Existe la posibilidad de clonar etiquetas o señales, siendo una gran amenaza para la privacidad de la información personal.

3.3.8 Radiofrecuencia

Un módulo RF (abreviatura de módulo de radiofrecuencia) es un dispositivo electrónico (normalmente) pequeño que se utiliza para transmitir y/o recibir señales de radio entre dos dispositivos. En un sistema integrado, a menudo es deseable comunicarse con otro dispositivo de forma inalámbrica. Esta comunicación inalámbrica puede llevarse a cabo a través de la comunicación óptica o a través de la comunicación por radiofrecuencia (RF). Para muchas aplicaciones, el medio elegido es la RF, ya que no requiere línea de visión. Las comunicaciones por RF incorporan un transmisor y un receptor. Hay varios tipos y alcances. Algunos pueden transmitir hasta 300 metros. Los módulos de RF suelen fabricarse con tecnología RF CMOS.

La red de radiofrecuencia tiene múltiples ventajas. Puede penetrar a través de las paredes de los edificios y las casas, lo que la convierte en una opción ideal para las comunicaciones móviles y televisivas. También tiene enormes aplicaciones en el campo de la sanidad y IoT.

Esta tecnología también es muy fácil de instalar y tiene un coste de instalación muy bajo. Una de las ventajas de la tecnología de radiofrecuencia es su uso eficaz en operaciones militares. La radiofrecuencia se utiliza en los radares para detectar los movimientos del enemigo y también para la comunicación por satélite. Cuando la comunicación en la línea de visión entre los satélites se interrumpe debido a la rotación de la tierra, se comunican con la ayuda de la radiofrecuencia, evitando así cualquier corte de la comunicación.

3.4 Servidor

Para el servidor es necesaria una plataforma capaz de realizar los cálculos de confort, transmitir dichos cálculos a los clientes y mantener una base de datos con todos los datos tomados. Para este proyecto se ha escogido una Raspberry como cliente. Las principales ventajas de la Raspberry frente a sus competidores es la gran comunidad de usuarios que tiene. Al ser un dispositivo sencillo de utilizar y de precio reducido, ganó mucha popularidad en el ámbito educativo y aficionados sobre proyectos de automatización y electrónica.

La Raspberry cuenta con su propio sistema operativo llamado Raspberry Pi OS basado en GNU/Linux. En todas sus versiones incluye una memoria RAM, GPU, puertos USB, y los modelos más costosos disponen también de puerto HDMI, puerto Ethernet y un conector para cámara. Ninguna versión incluye una tarjeta SD, siendo esta utilizada para instalar el sistema operativo.

Tabla 8. Tabla comparativa de modelos de Raspberry.

Raspberry	 Raspberry Pi Zero	 Raspberry Pi 1 Model A	 Raspberry Pi 1 Model A+	 Raspberry Pi 1 Model B+	 Raspberry Pi 2 Model B	 Raspberry Pi 3 Model B
USB	1	1	1	1	4	4
Ethernet	-	-	-	10/100 Mbits/s	10/100 Mbits/s	10/100 Mbits/s
Bluetooth	-	-	-	-	-	4.1
WiFi	-	-	-	-	-	802.11n
SDRAM	512 MB	256 MB	257 MB	512 MB	1GB	1GB
Núcleos	1	1	1	1	4	4
velocidad CPU	1 Ghz	700Mhz	700Mhz	700Mhz	900Mhz	1.2Ghz
almacenamiento externo	MicroSD	SD	MicroSD	MicroSD	MicroSD	MicroSD

Para este proyecto, las propiedades que tiene la Raspberry Pi Zero son más que necesarias para cumplir los objetivos de este proyecto Tabla 8. Pero es su falta de disponibilidad hace que se tenga que usar una Raspberry Pi 3 Model B.



Figura 3-17. Raspberry Pi model 3 B [93]

Por otro lado, que este modelo tenga un puerto Ethernet facilita su uso debido a que ya no es indispensable su configuración mediante el terminal, sino que se puede visualizar e interactuar con la Raspberry mediante su puerto Ethernet y un *Virtual Network Computing* y así ver la interfaz del sistema operativo.

Los últimos modelos de Raspberry Pi tienen incorporados protocolos Bluetooth y WiFi, además se pueden ampliar sus posibilidades de comunicación con el exterior mediante la incorporación de un módulo radio con RFM69 o LoRa/LoRaWAN, logrando alcances mucho mayores. Comparados con WiFi y Bluetooth (2.4GHz) este tipo de módulos suelen funcionar con 433MHz y 900MHz. La velocidad de transmisión no aumenta, pero si su alcance, además su uso es mucho más simple. No es necesario emparejar, escanear ni asociar o preocuparse por las conexiones. Solo es necesario comprobar que todos los componentes de la red transmiten a la misma frecuencia y con el mismo código de encriptado. Estos módulos realizan el encapsulado de paquetes, retransmisiones y corrección de errores. Mejorando así la eficiencia energética del sistema debido a que no se pierde tiempo intentando establecer el enlace.

Para este proyecto se va a utilizar el Adafruit Radio Bonnets with OLED- RFM69/LoRa, que dispone de un alcance de aproximadamente 350 metros (dependiendo de obstáculos) que usa el sistema de encriptado AES-128. Su implementación es muy sencilla debido a que se encastra directamente a los pines GPIO de la Raspberry.

Para la antena existen 3 opciones. La primera, la más barata sería utilizar un simple cable de 16.5 cm para poder transmitir a 433MHz. Simplemente hay que soldarlo al ANT PAD.



Figura 3-18. Adafruit Radio Bonnets con OLED-RFM69/LoRa [74].

También se puede usar una antena uFL. Esta placa ya tiene un conector uFL soldado, por lo tanto, lo único que se necesita para utilizarlo es un adaptador de uFL a SMA. La antena es opcional.

3.5 Soporte externo de los dispositivos

Para la fabricación del soporte externo de los dispositivos electrónicos del cliente se va a utilizar la impresora 3D Ultimaker 3 Extended, con doble extrusor. Dispone de un volumen de impresión de 215 x 215 x 300 mm³ y tiene una resolución de hasta 20 micras.



El doble cabezal es una excelente característica, ya que permite trabajar con dos filamentos a la vez. Se utilizan para imprimir con material de soporte, pero se puede usar para imprimir modelos con dos colores. La Ultimaker 3 Extended puede trabajar a la vez con diversos materiales, como PLA, ABS, CPE y Nylon.

También cuenta con cabezales intercambiables, que permiten dedicar un cabezal a un único material, para poder evitar futuros atascos, con un sistema de cambio sencillo. La cama de la Ultimaker 3 Extended es calefactada, lo que permite una mejor adherencia de las primeras capas de impresión, y además dispone de un sistema de calibrado automático.

Para utilizar la Ultimaker 3 Extended se envían los modelos a imprimir via Wifi, Ethernet o por USB. El software compatible es Cura, desarrollado por Ultimaker y fácil de utilizar.

4 RESULTADOS

4.1 Objetivos y requisitos del diseño

El diseño del encapsulado se ha realizado con la premisa de que sea funcional. Se va a realizar mediante la impresión 3D FDM, esto hace que resulte sencillo implementar mejoras y cambios debido a que es un proceso de fabricación flexible. La impresora que se va a utilizar en este proyecto tiene doble extrusor, pero no se dispone de otro material distinto para hacer los soportes. Esto se ha tenido en cuenta en la fase de diseño. Se ha intentado minimizar el número de soportes.

4.2 Primer prototipo

En el primer prototipo se pensó en atornillar los sensores a las paredes de la carcasa. Luego se comprobó que la pared de la carcasa no era lo suficientemente gruesa para poder fijar con éxito el sensor. También se observó que las paredes eran demasiado gruesas. Esto aporta más rigidez estructural; sin embargo, unas paredes con menor grosor también cumplirían los requisitos y usarían menos material además de tardar menos tiempo en fabricarse.

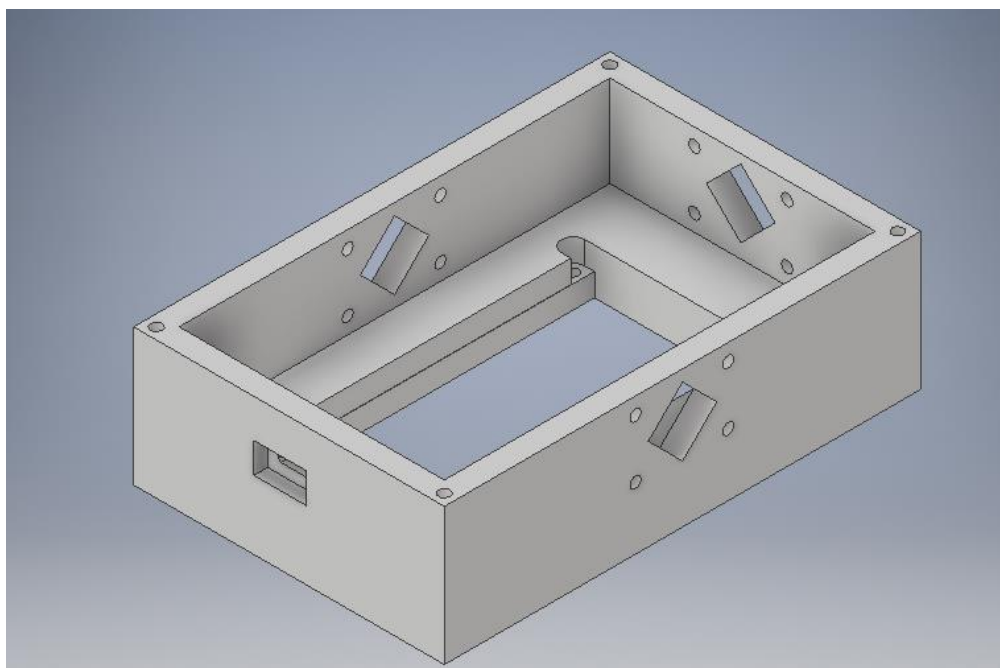


Figura 4-1. Primer prototipo.

Las ventanas son necesarias para que el sensor tenga salida al exterior, esto implica el uso de un soporte más. Para solventar esto se decidió por girar 45° dicha ventana, facilitando así su impresión porque pasaba de formar 90° con la vertical a formar 45° , prescindiendo así de los soportes. Esta modificación no influye teóricamente en el funcionamiento del sensor porque lo que necesita es una salida al exterior como tal, sin influir su forma.

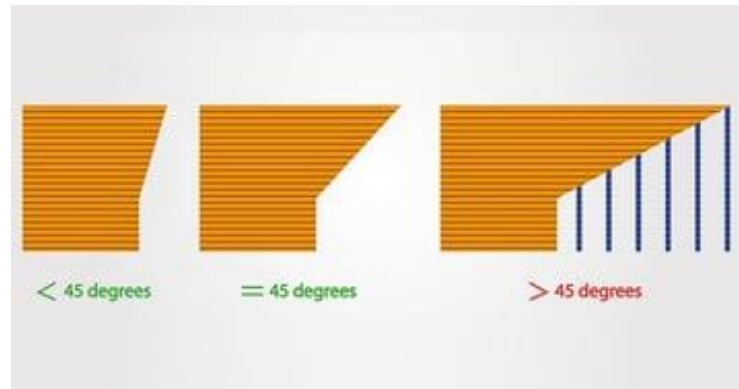


Figura 4-2. Diagrama sobre el funcionamiento de los soportes.

Como aspectos a mejorar se tuvo en cuenta disminuir el grosor de las paredes y aumentar el grosor de las paredes justo donde se van a colocar los tornillos, y cambiar la forma de las ventanas debido a que generan soportes y eran ineficientes.

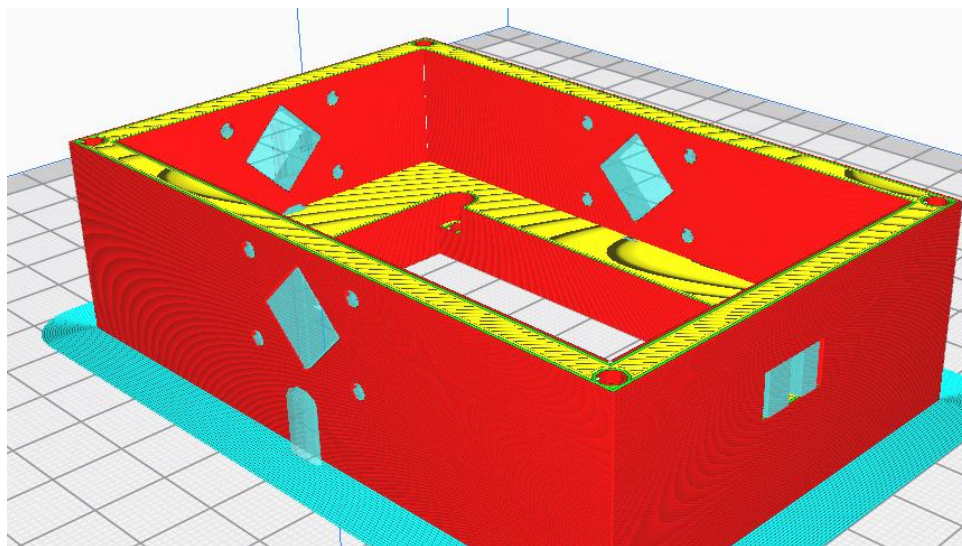


Figura 4-3. Visualización de la impresión en Cura del primer prototipo.

4.3 Segundo prototipo

Para el segundo prototipo se ha obtenido como solución de la problemática del grosor de la pared de los tornillos el hacer dos perfiles por sensor para así aumentar el espesor sin aumentar innecesariamente el grosor de toda la pared. El problema de este diseño resulta en el conector STEMMA QT. Para evitar posibles problemas de conexión se busca con el diseño que no sea el conector STEMMA QT el que haga contacto directamente con la pared, para solucionar eso se hizo una ventana para el conector, para que sea la propia placa del sensor la que haga contacto con la pared. Para esta ventana se hicieron chaflanes con el objetivo de facilitar la impresión.

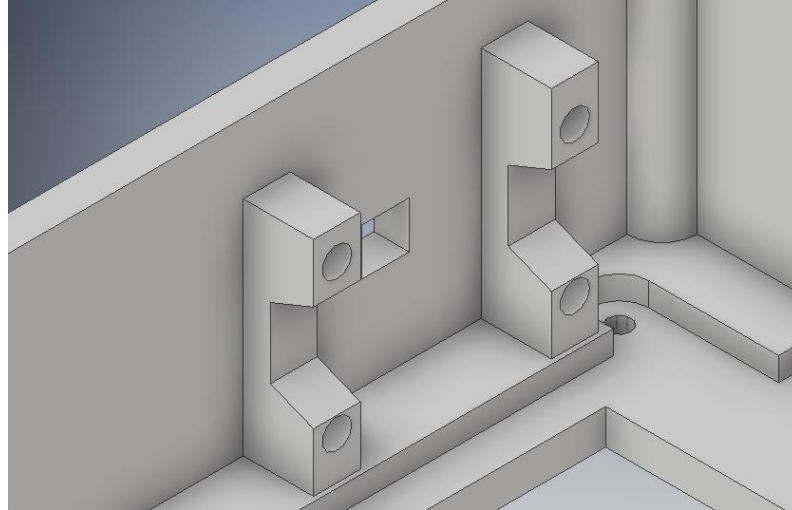


Figura 4-4. Adaptación para los tornillos del segundo prototipo.

También se movieron los sensores de temperatura y calidad del aire, dejando de estar en el eje de simetría con el fin de poder librar espacio para los botones. Se vio que había que adaptar el boceto de la pantalla para evitar que el conector STEMMA QT hiciese contacto con la base del encapsulado

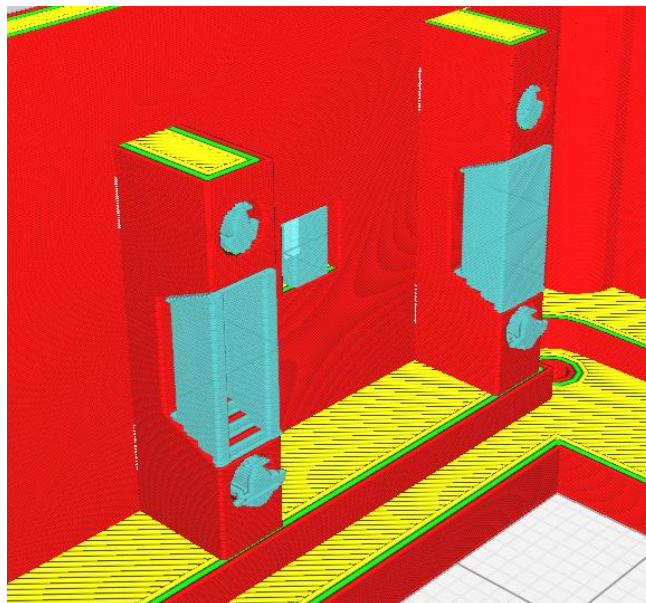


Figura 4-5. Adaptación para los tornillos del segundo prototipo en Cura.

Aunque esta solución de anclar los sensores es válida se optó por una tercera forma de anclar los sensores sin precisar de un soporte extra.

4.3.1 Tercer prototipo

En este tercer prototipo se estableció el uso de dos perfiles verticales para fijar los sensores en los ejes X e Y, con un perfil inverso en la tapa, se fija en el eje Z para así limitar cualquier posible movimiento del sensor. Además, como es un perfil vertical en la dirección de impresión no presenta ninguna dificultad para fabricarse.

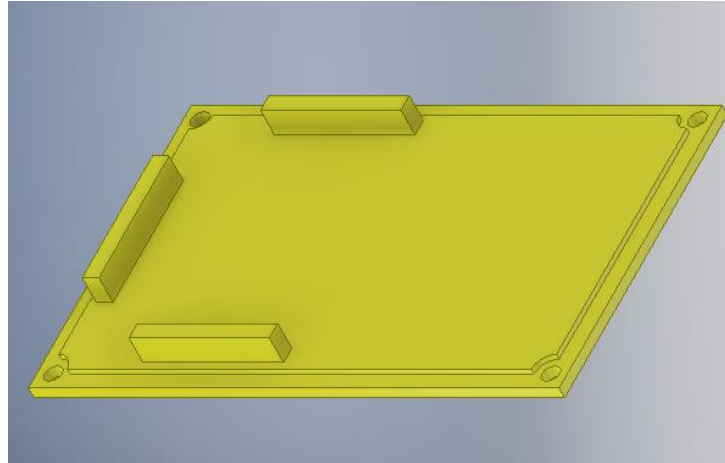


Figura 4-6. Tapa del encapsulado.

Un punto en contra es que necesita más material para fabricarse y por lo tanto tarda más tiempo, no es la solución óptima, pero si la más sencilla. Además, también sirve para anclar otros componentes del circuito que no disponen de tornillos como la batería, o para el TPL5111. Para los botones se optó por utilizar el propio muelle que tiene el botón del FeatherM0RFM69. Se hizo una cavidad en la pared y que a la vez fijasen los botones en el eje Z, para fijarlo en el eje Y se hizo otra pieza que hiciese de tope con la cavidad, dejando así el botón con un único grado de libertad en el eje X.

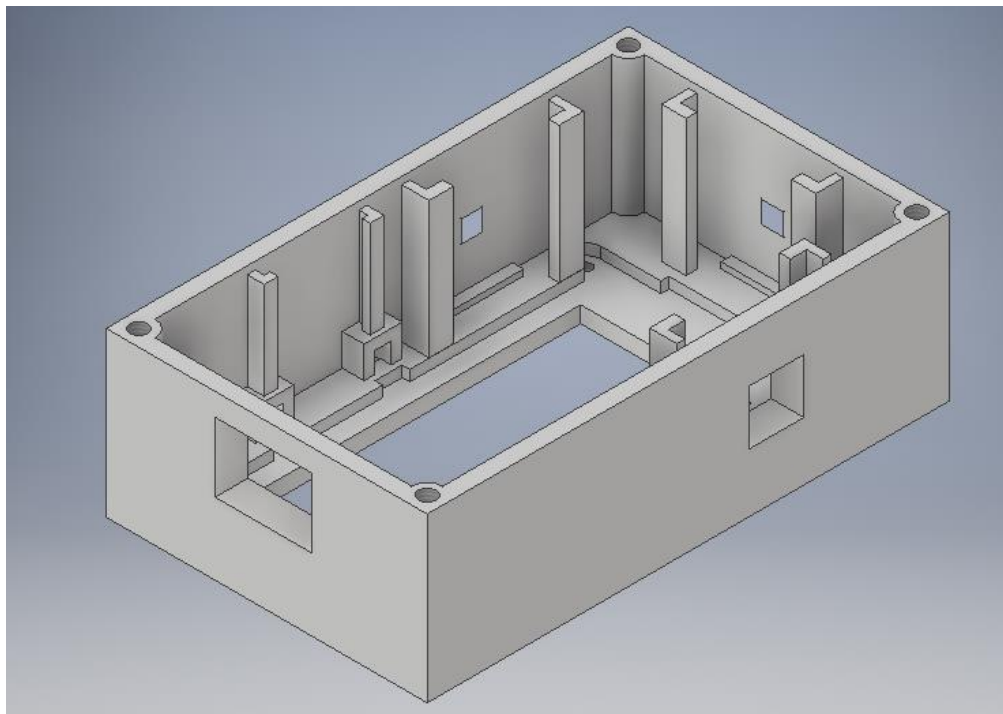


Figura 4-7. Modelado 3D del tercer prototipo.

El encapsulado así se puede dividir en dos, zona de control/alimentación y zona de monitorización. En la zona de control/alimentación están: el microcontrolador, el TPL5111 y la batería. En la zona de monitorización están los 3 sensores. La ventaja de la antena de cable es que no requiere una adaptación del encapsulado para que funcione.

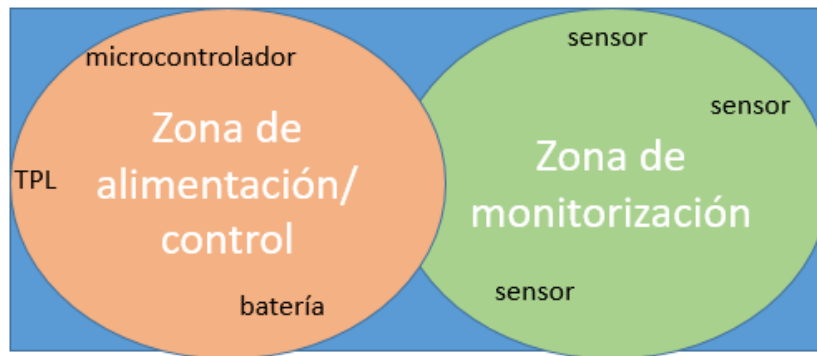


Figura 4-8. Esquema de distribución de componentes dentro del encapsulado.

Después de imprimir el segundo prototipo se comprobó que había que cambiar los pilares porque estos eran demasiado endeble al ser una estructura totalmente vertical libre de apoyos. Viendo que los pilares del TPL son incluso más finos, pero si tienen más rigidez estructural se optó por conectar los dos pilares.

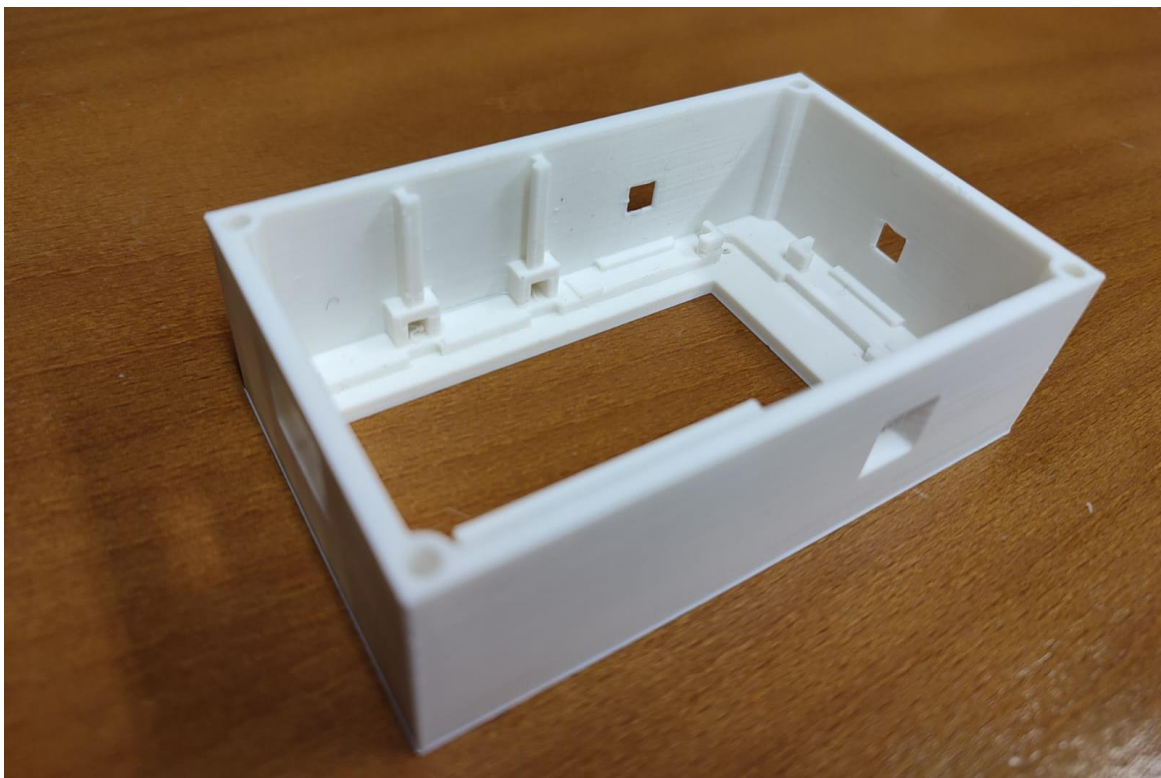


Figura 4-9. Columnas rotas del tercer prototipo.

También hubo que cambiar los agujeros. Al poner directamente la rosca ISO M3, el tornillo tenía juego y no cumplía su función. Por eso se optó por hacer un agujero con el diámetro interior de la rosca ISO M3 y que fuese el propio tornillo al atornillarse por primera vez el que arrancase el material y formase la rosca.

Para poder activar los botones del FeatherM0 RFM69HCW se pensó en utilizar un botón de accionamiento mecánico. Esta opción se descartó porque estos botones suelen tener poco recorrido y habría que acercar la pared y con ella todos los sensores, o romper la continuidad de la pared.

Se optó por el diseño propio del sistema de botones porque la propia placa tiene un botón del cual se podría aprovechar su muelle y así solo fabricar un conjunto que tenga un grado de libertad y sea capaz de activarlo.

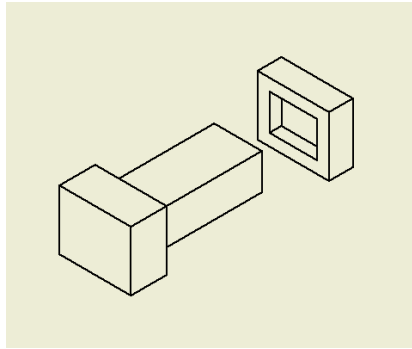


Figura 4-10. Sistema del botón.

Se pensó en hacer el botón en dos piezas diferentes. Que posteriormente serían ensambladas por apriete. Luego se observó que esta opción no era viable porque era necesario ampliar el grosor del tope para que el perfil del botón pudiese encajar bien, esto no era posible debido al espacio reducido que había entre la cavidad del botón y el propio botón del FeatherM0.

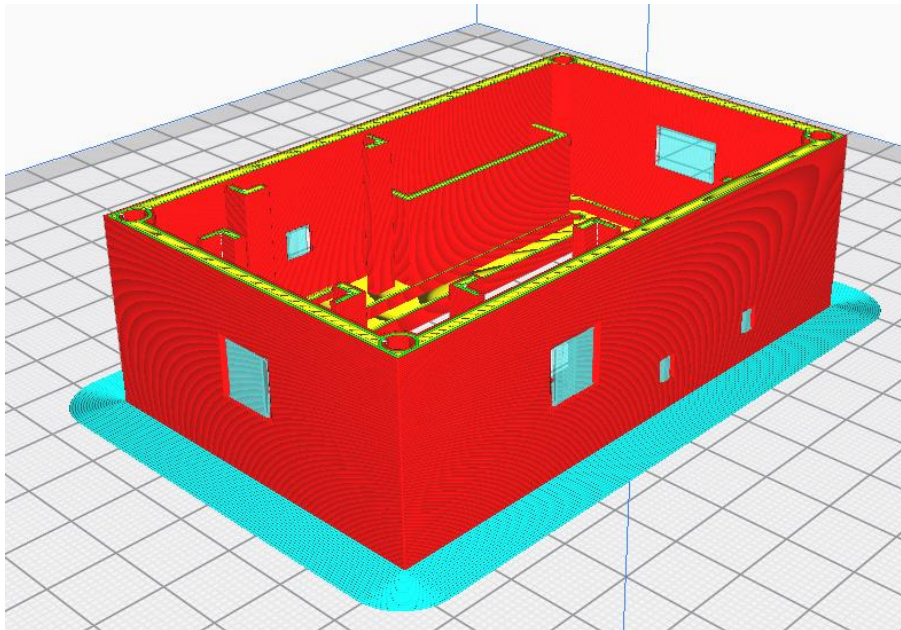


Figura 4-11. Modelado del cuarto prototipo en Cura.

Se tuvo que ampliar la cavidad del TPL porque la parte posterior de la soldadura hacía tope con la pared del encapsulado y ampliar también la cavidad de la batería para prevenir futuros errores de alimentación debido a que el cable entraba a presión.

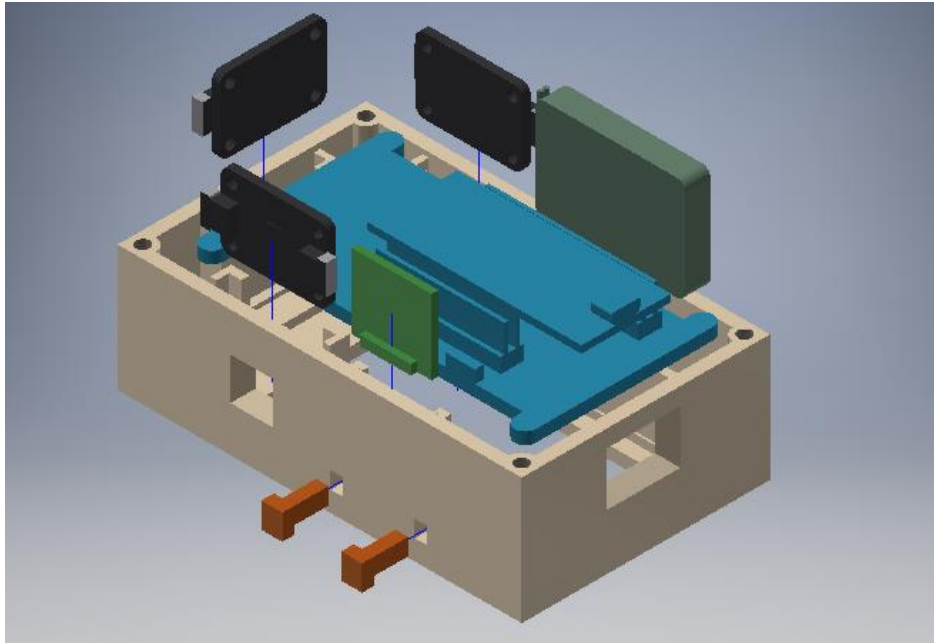


Figura 4-12. Vista explosionada del tercer prototipo del encapsulado.

4.3.2 Cuarto prototipo

El cambio más notorio de este prototipo es el sistema de anclaje de los sensores. Pasa de ser dos columnas por sensor a ser una única superficie que hace contacto con la parte posterior del sensor. También se aumentó la distancia en el diseño entre el sensor y la pared del encapsulado para poder manipular los cables de forma más holgada.

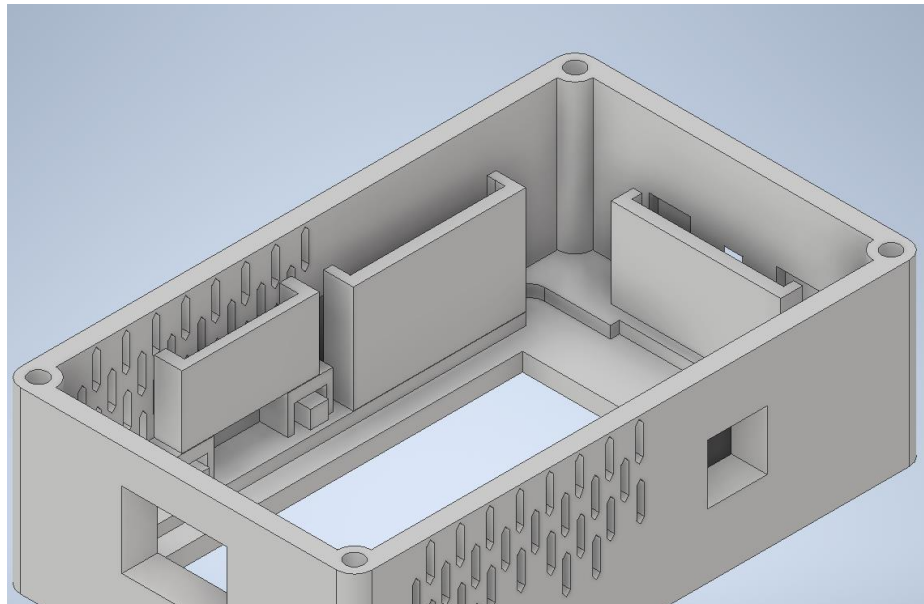


Figura 4-13. Nuevo sistema de anclaje de los componentes del cliente.

También se amplió la distancia entre el sistema de anclaje del TPL5111 y la pared para que esta no hiciese contacto con la pared del encapsulado y se hicieron redondeados en las esquinas del encapsulado por motivos estéticos.

Se cambió el sistema de los botones. La pieza que hacía de tope era demasiado fina como para que el botón pudiese encajar, por lo tanto, había que aumentar el espesor de esta, el problema está en que

entre la cavidad del botón y el botón existe un espacio reducido y para ampliarlo habría que hacer la cavidad del botón (que disminuiría su rigidez estructural) o aumentar el espacio total de la caja.

Se intentó en el cuarto prototipo hacer una articulación en el botón. Muchos aficionados de la impresión 3D han creado y compartido modelos 3D de diferentes figuras decorativas con articulaciones. Para hacerlas es necesario hacer una prueba de la tolerancia de la impresora. Teniendo en cuenta que con la configuración de la impresora que se va a utilizar es de 0.1mm se van a realizar distintas pruebas para probar con soporte tipo árbol y XXXX y para distintos grados de soporte.



Figura 4-14. Ejemplo de figura articulada fabricada mediante impresión 3D.

Para el diseño de los botones lo que se hizo es dejar una distancia de 0,75mm entre el perfil del botón y las paredes de la cavidad que lo alojan. Para evitar que se pueda salir hacia fuera del encapsulado se hicieron dos perfiles verticales de 1mm de espesor. Estos perfiles en el diseño están a una distancia de 0.75mm de la pared con la que se busca que hagan tope y 1mm con el suelo del encapsulado, es decir, que la única superficie de contacto que tienen es el perfil del botón.

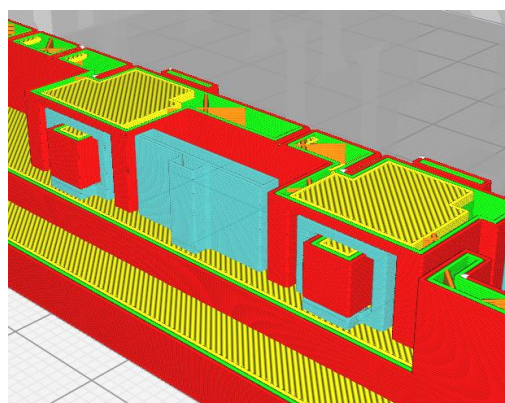
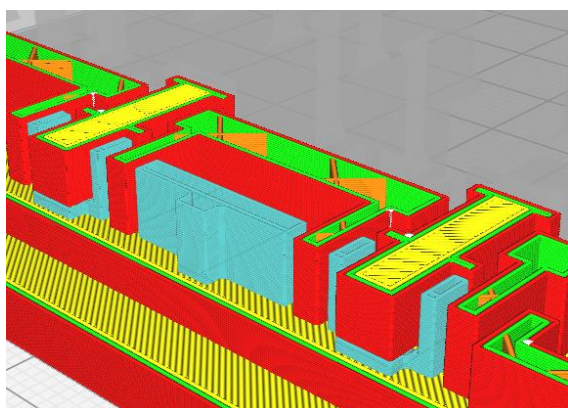


Figura 4-15. Diseño del botón articulado.

En este prototipo también cambió el sistema de anclado del FeatherM0 RFM69HCW. Si se querían usar tornillos para anclarlos se debería aumentar todavía más el espesor del suelo para que pudiesen afirmarse bien. Aparte habría que hacer algún saliente para proteger la cabeza del tornillo o atornillarlo desde dentro y luego tener que cortar el sobrante.

Por lo que se decidió utilizar el mismo sistema de anclaje que se usó para el resto de los componentes. En este caso se optó por un único punto de apoyo. Esto es debido a que en los agujeros roscados no existe espacio suficiente para hacer unos perfiles gruesos que tengan la suficiente rigidez para anclar bien el microprocesador.

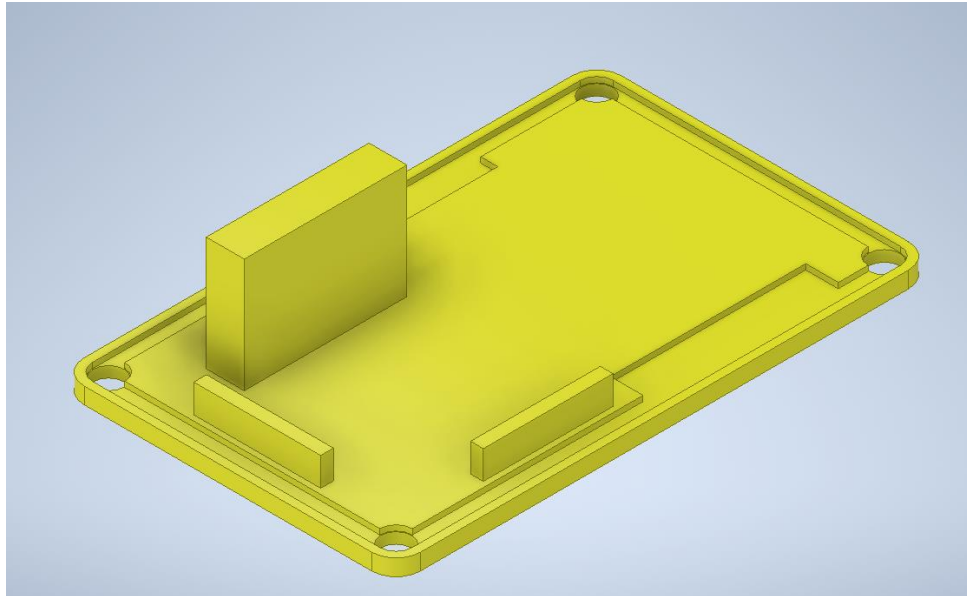
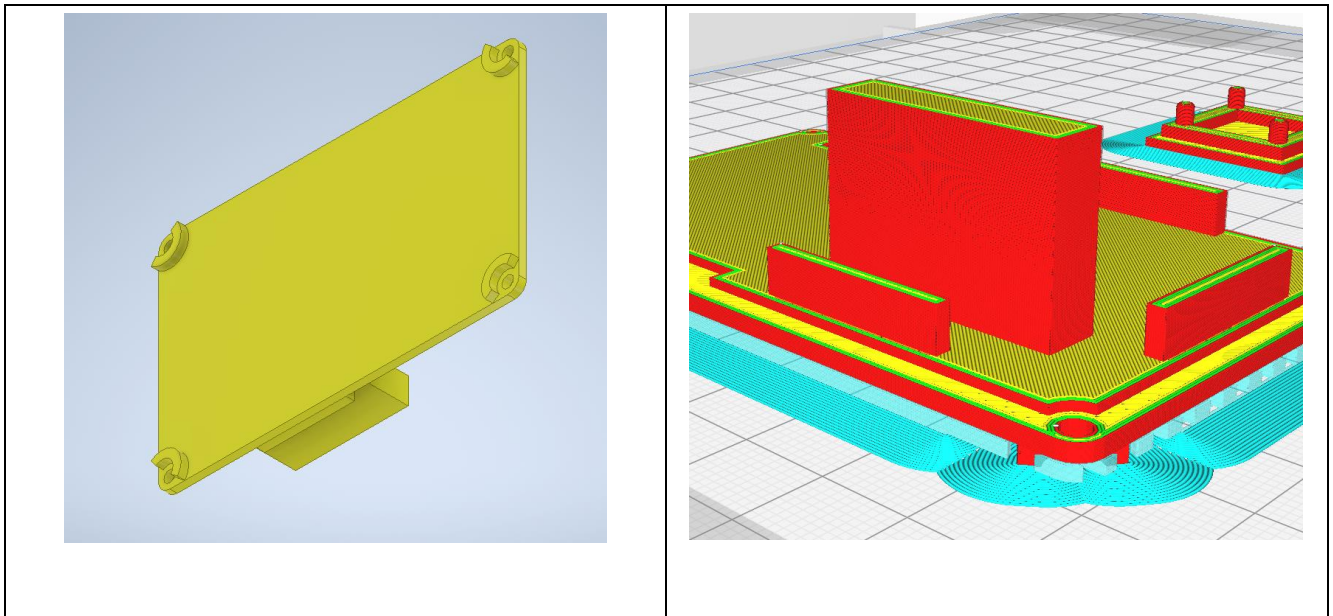


Figura 4-16. Diseño de la tapa con anclaje del FeatherM0 RFM69HCW.

Para proteger la cabeza del tornillo se pensó en un diseño como el mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** porque era la forma más sencilla y que usaba menos material. Luego se comprobó que hacer esta opción no era viable porque se generaría un soporte muy grande para soportar el peso de toda la tapa. Por lo que se llegó a un diseño como el de Figura 4-16. La cabeza del tornillo entraría por completo en la tapa y así no habría que aumentar notoriamente el grosor para hacer un asiento resistente.



Figuras 4-16 y 4-17. Sistema de protección de las cabezas de los tornillos.

4.4 Comprobación de efectividad del encapsulado

Para comprobar que el encapsulado no afecta a la toma de datos se realizó un experimento. El montaje de dicho experimento está formado por el cliente y el servidor del proyecto y otra Raspberry Pi model 3 con la que se van a tomar medidas.

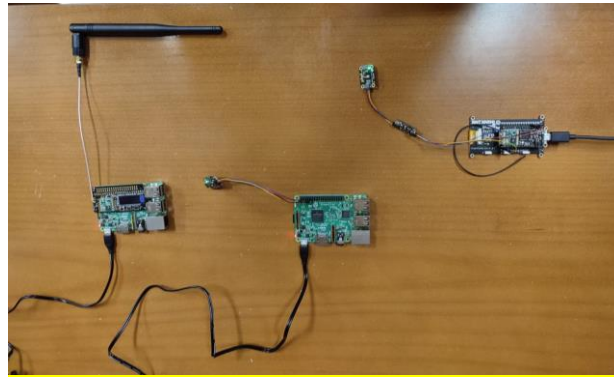


Figura 4-18

El experimento consta de dos partes. En la primera se van a tomar valores con la Raspberry y un sensor de temperatura que no se utilizó en el proyecto (AHT31-D) y con el sensor de temperatura escogido AHT20 a la vez en un estudio del cuartel Franciso Moreno durante 3 horas en intervalos de 5 minutos. Esto se hace porque no se disponen de dos sensores iguales y es necesario ver la diferencia en la toma de valores de estos dos sensores en igualdad de condiciones antes de valorar si el encapsulado afecta a la toma de dichos valores.

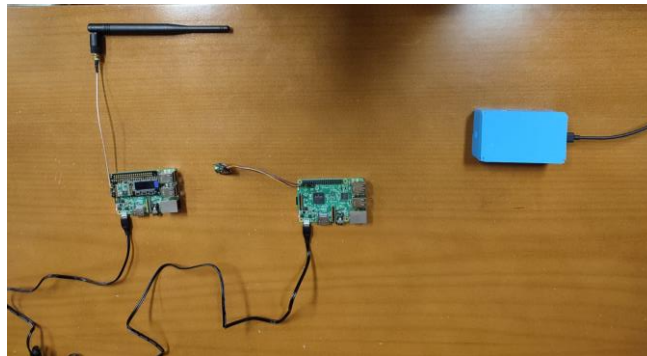


Figura 4-19

En la segunda parte se utilizan los mismos elementos pero esta vez el AHT20 será introducido dentro del encapsulado, también se realizará la toma de datos en un estudio del cuartel Franciso Moreno durante 3 horas en intervalos de 5 minutos.

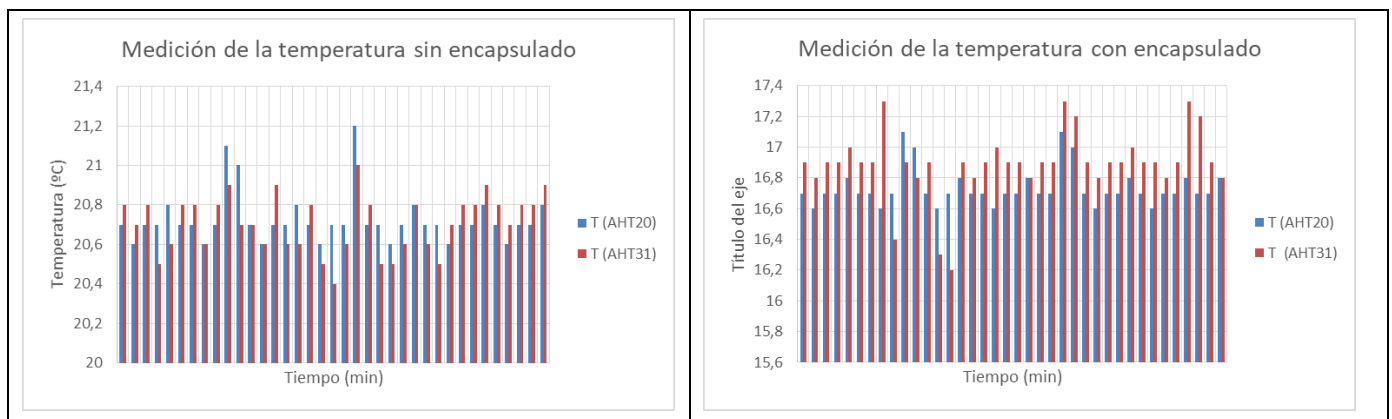


Figura 4-20. Comparación de toma de medición de temperaturas con y sin encapsulado.

Como se puede comprobar no existe una diferencia significativa. La diferencia de medidas entre ambos sensores sin el encapsulado tiene un valor de $-0,1892$, frente al $-0,15676$ lleva a que exista una diferencia total de medida con y sin el encapsulado de $0,13788$. Teniendo en cuenta que una diferencia el orden de la temperatura se puede declarar como despreciable.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.5 Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un sistema plenamente funcional para la adquisición y procesamiento de los parámetros de confort de un habitáculo. En primer lugar, se han analizado el estado del arte en parámetros y métricas asociadas al confort, junto con los dispositivos de adquisición más adecuados, llegando a una selección que permite obtener valores para confort térmico, lumínico y de calidad de aire con una fiabilidad y precisión adecuadas, tratando de reducir los costes y el volumen del dispositivo de adquisición.

El sistema, basado en una arquitectura cliente-servidor, se ha probado para un solo habitáculo, pero está diseñado para poder utilizarse con múltiples dispositivos de adquisición, permitiendo la monitorización de una amplia zona compuesta por varias habitaciones. Esto permitiría extender el proceso de medición a un edificio completo sin más que añadir más dispositivos clientes al sistema.

Este diseño también ha permitido diferenciar y aislar los requisitos entre los dos tipos de nodos, permitiendo minimizar el procesamiento en el cliente para tratar de reducir el consumo. Por otro lado, el nodo servidor se ha centrado en la recogida de todos los datos y la obtención de los parámetros finales de confort. En este caso, el consumo no es un requisito tan importante, ya que este dispositivo no tiene por qué situarse en la zona de medida y puede estar conectado a la corriente en todo momento.

Respecto al diseño, se ha logrado hacer un diseño funcional y sencillo de producir. La impresión 3D ha facilitado el proceso de desarrollo del encapsulado mediante las constantes iteraciones entre el modelo diseñado y el resultado de la impresión.

4.6 Líneas Futuras

Se ha llegado al principal objetivo que era diseñar un dispositivo capaz de monitorizar parámetros confort. Además, este dispositivo tiene un tamaño reducido que era otra premisa del diseño. Sin embargo, no se ha llegado a cuantificar el confort en su totalidad. Existen muchas variables que tienen un gran impacto en el confort de una persona en una habitación que no se han tenido en cuenta. Se ha logrado llegar a tener un registro del confort térmico, confort visual y calidad del aire de una habitación.

Pero no se consiguió realizar la mejora del bajo consumo.

Aunque se pueden programar los sensores para que tomen medidas en un intervalo de tiempo mayor y también aumentar la ventana entre envíos del cliente al servidor, el dispositivo tal y como está diseñado está despierto todo el tiempo y esto aumenta el consumo de batería. El consumo de los componentes del cliente es bajo, pero si se hubiese conseguido realizar esta mejora se podría conseguir una relación de consumo muy buena.

Respecto a las comunicaciones, el módulo RFM69HCW, es sencillo de utilizar y obtiene unos alcances considerables. Pero con la tecnología LoRa se pueden alcanzar unos alcances algo mayores y también tiene un sistema de cifrado más robusto. Por otro lado establecer la red es más complejo que en radiofrecuencia pero las ventajas de uso son mayores.

El poder conectar el sistema de monitorización con un sistema de domótica sería el siguiente paso para lograr la retroalimentación automática entre HVAC y la monitorización del confort. Los sistemas HVAC se pueden configurar para que se mantengan a cierta temperatura, pero solo se tiene en cuenta la temperatura. Se pueden conseguir niveles de confort excelentes si se tiene en cuenta la humedad para calcular la temperatura equivalente y así reducir el consumo total de energía o tener en cuenta la calidad del aire para aumentar el caudal de aire desplazado.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Vern, Putz-anderson (1992). Cumulative trauma disorders: A manual for musculoskeletal diseases of the upper limbs. London: Taylor & Francis».
- [2] «International Standard ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment», BSI British Standards. doi: 10.3403/30046382.
- [3] «ISO 7726. Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities».
- [4] J. Veitch, M. Stokkermans, y G. Newsham, «Linking Lighting Appraisals to Work Behaviors», *Environ. Behav.*, vol. 45, pp. 198-214, feb. 2013, doi: 10.1177/0013916511420560.
- [5] J. Veitch, J. Geerts, K. Charles, G. Newsham, y C. Marquardt, «Satisfaction with lighting in open-plan offices: COPE field findings», ene. 2005.
- [6] J. A. Veitch, D. W. Hine, y R. Gifford, «END USERS' KNOWLEDGE, BELIEFS, and PREFERENCES FOR LIGHTING», *J. Inter. Des.*, vol. 19, n.º 2, pp. 15-26, sep. 1993, doi: 10.1111/j.1939-1668.1993.tb00159.x.
- [7] «HSE - Thermal comfort: The six basic factors». <https://www.hse.gov.uk/temperature/thermal/factors.htm> (accedido 24 de febrero de 2022).
- [8] «ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy».
- [9] Administración, «La transmisión del calor en edificios.», *Arquitectura y Energía*, 10 de marzo de 2015. <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/la-transmision-del-calor/> (accedido 15 de febrero de 2022).
- [10] W.-C. Hsu, J. K. Tong, B. Liao, Y. Huang, S. V. Boriskina, y G. Chen, «Entropic and Near-Field Improvements of Thermoradiative Cells», *Sci. Rep.*, vol. 6, n.º 1, Art. n.º 1, oct. 2016, doi: 10.1038/srep34837.
- [11] «Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering, by P. O. Fanger. 244 pp. DANISH TECHNICAL PRESS. Copenhagen, Denmark, 1970. Danish Kr. 76, 50 - E.W. Shaw, 1972». Accedido: 3 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/146642407209200337>
- [12] C. J. Philpott y J. R. Singh, «Health, Comfort and Productivity in Buildings», *Indoor Built Environ.*, vol. 8, n.º 4, pp. 269-271, 1999, doi: 10.1159/000024650.
- [13] G. Havenith, I. Holmér, y K. Parsons, «Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production», *Spec. Issue Therm. Conf. Stand.*, vol. 34, n.º 6, pp. 581-591, jul. 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00008-7.
- [14] «Ambient Temperature Effects on Paired Associate Learning*: Ergonomics: Vol 21, No 2». <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140137808931700> (accedido 14 de marzo de 2022).
- [15] M. Fountain y E. A. Arens, «Air movement and thermal comfort», *ASHRAE J.*, vol. 35, n.º 8, pp. 26-30, ago. 1993.
- [16] E. Naboni, M. Meloni, S. Coccolo, J. Kaempf, y J.-L. Scartezzini, «An overview of simulation tools for predicting the mean radiant temperature in an outdoor space», *CISBAT 2017 Int. Conf. Build. Dist. – Energy Effic. Nano Urban Scale*, vol. 122, pp. 1111-1116, sep. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.471.
- [17] «Threlkeld J.L., 1970. Thermal environmental engineering, Prentice-Hall, Inc., 2nd edition, New Jersey».
- [18] «Stoecker W.F. and Jones J.W., 1982. Refrigeration and air conditioning, McGraw-Hill Book Company, 2nd edition, Singapore».
- [19] «Layton J.M., 2001. 'The science of clothing comfort', The textile institute, Textile progress, 31 (1/2). UK».
- [20] «Butera F.M., 1988. Chapter 3: 'Principles of thermal comfort', Renewable & Sustainable energy reviews, 2, p. 39-66.».

- [21] «English M.J.M., 2001. ‘Physical principles of heat transfer’, *Current anaesthesia & critical care* 12, p. 66-71.»
- [22] T. Ogulata, «The Effect of Thermal Insulation of Clothing on Human Thermal Comfort», *Fibres Text. East. Eur.*, vol. 15, pp. 67-72, abr. 2007.
- [23] M. Luo, X. Zhou, Y. Zhu, y J. Sundell, «Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate», *Energy Build.*, vol. 118, pp. 152-159, abr. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.02.041.
- [24] «Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering, by P. O. Fanger. 244 pp. DANISH TECHNICAL PRESS. Copenhagen, Denmark, 1970. Danish Kr. 76, 50 - E.W. Shaw, 1972». <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/146642407209200337> (accedido 3 de febrero de 2022).
- [25] R. G. Steadman, «The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science», *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 18, n.º 7, pp. 861-873, jul. 1979, doi: 10.1175/1520-0450(1979)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2.
- [26] «ANSI S1.1-1994. American National Standard: Acoustic Terminology. Sec 3.03.»
- [27] D. Int-Hout, «Avoiding Sick Buildings while Assuring Occupant Productivity and Building Optimization», 2002, Accedido: 28 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/4600>
- [28] «Technical specifications for environmental noise monitoring. Routine monitoring for urban environmental noise. Industry standard of the People’s Republic of China. HJ 640-2012.»
- [29] B. Berglund, T. Lindvall, D. H. Schwela, y World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team, «Guidelines for community noise», 1999, [En línea]. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/66217>
- [30] «Ley de Protección de Datos en grabaciones de vo, Grupo Adaptalia <https://www.grupoadaptalia.es/blog/ley-de-proteccion-de-datos-en-grabaciones-de-voz/>».
- [31] Y. Huang, J. Niu, y T. Chung, «Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates», *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 215-228, dic. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.07.100.
- [32] K. Konis, «Evaluating daylighting effectiveness and occupant visual comfort in a side-lit open-plan office building in San Francisco, California», *Build. Environ.*, vol. 59, pp. 662-677, ene. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.09.017.
- [33] G. Yun, K. C. Yoon, y K. S. Kim, «The influence of shading control strategies on the visual comfort and energy demand of office buildings», *Energy Build.*, vol. 84, pp. 70-85, dic. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.040.
- [34] Y. Hua, A. Oswald, y X. Yang, «Effectiveness of daylighting design and occupant visual satisfaction in a LEED Gold laboratory building», *Build. Environ.*, vol. 46, n.º 1, pp. 54-64, ene. 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.06.016.
- [35] E. Shen, J. Hu, y M. Patel, «Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies», *Build. Environ.*, vol. 78, pp. 155-170, ago. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.04.028.
- [36] «DYNAMIC SIMULATION OF BLIND CONTROL STRATEGIES FOR VISUAL COMFORT AND ENERGY BALANCE ANALYSIS Jan Wienold 2007».
- [37] C.-A. Roulet *et al.*, «Perceived health and comfort in relation to energy use and building characteristics», *Build. Res. Amp Inf.*, vol. 34, n.º 5, p. 467, 2006.
- [38] J. A. Veitch, K. E. Charles, K. M. J. Farley, y G. R. Newsham, «A model of satisfaction with open-plan office conditions: COPE field findings», *J. Environ. Psychol.*, vol. 27, n.º 3, pp. 177-189, 2007, doi: 10.1016/j.jenvp.2007.04.002.
- [39] J. R. Carlopio, «Construct validity of a physical work environment satisfaction questionnaire», *J. Occup. Health Psychol.*, vol. 1, n.º 3, pp. 330-344, 1996, doi: 10.1037/1076-8998.1.3.330.
- [40] S. G. Colaco, C. P. Kurian, V. I. George, y A. M. Colaco, «The Implications of Fluorescent Lamp Electronic Ballast Dimming —An Experimental Study», *Energy Power Eng.*, vol. 2, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2010, doi: 10.4236/epe.2010.21009.

- [41] G. Newsham y J. Veitch, «Lighting quality recommendations for VDT offices: A new method of derivation», *Light. Res. Technol.*, vol. 33, jun. 2001, doi: 10.1177/136578280103300205.
- [42] S. H. A. Begemann, G. J. van den Beld, y A. D. Tenner, «Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses», *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 20, n.º 3, pp. 231-239, sep. 1997, doi: 10.1016/S0169-8141(96)00053-4.
- [43] T. Moore *et al.*, «Long-term patterns of use of occupant controlled of ce lighting». 2002.
- [44] «Light and diurnal cycle affect human heart rate: possible role for the circadian pacemaker - PubMed». <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10452332/> (accedido 7 de marzo de 2022).
- [45] M. Münch, S. Kobialka, R. Steiner, P. Oelhafen, A. Wirz-Justice, y C. Cajochen, «Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men», *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, vol. 290, n.º 5, pp. R1421-1428, may 2006, doi: 10.1152/ajpregu.00478.2005.
- [46] J. Phipps-Nelson, J. R. Redman, D.-J. Dijk, y S. M. W. Rajaratnam, «Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance», *Sleep*, vol. 26, n.º 6, pp. 695-700, sep. 2003, doi: 10.1093/sleep/26.6.695.
- [47] «Schiffman, Harvey (2011). La Percepción Sensorial. Limusa Wiley. p».
- [48] S. Simm y D. Coley, «The relationship between wall reflectance and daylight factor in real rooms», *Archit. Sci. Rev.*, vol. 54, pp. 329-334, nov. 2011, doi: 10.1080/00038628.2011.613642.
- [49] Chartered Institution of Building Services Engineers, Ed., *Daylighting and window design*. London: CIBSE, 1999.
- [50] «What's Your IQ on IAQ & IEQ? | Building Geniuses | KMC Controls», 24 de septiembre de 2015. <https://www.kmccontrols.com/blog/whats-your-iq-on-iaq-ieq/> (accedido 2 de febrero de 2022).
- [51] M. Ezzati y D. M. Kammen, «The health impacts of exposure to indoor air pollution from solid fuels in developing countries: knowledge, gaps, and data needs.», *Environ. Health Perspect.*, vol. 110, n.º 11, pp. 1057-1068, nov. 2002.
- [52] D. G. U. e.V, «IFA - Practical aids: Indoor workplaces». <https://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/innenraumarbeitsplaetze/index-2.jsp> (accedido 2 de febrero de 2022).
- [53] K. Apte y S. Salvi, «Household air pollution and its effects on health», *F1000Research*, vol. 5, p. F1000 Faculty Rev-2593, oct. 2016, doi: 10.12688/f1000research.7552.1.
- [54] O. US EPA, «Indoor Air Quality (IAQ)», 3 de julio de 2014. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq> (accedido 2 de febrero de 2022).
- [55] «Radon Mitigation Methods - Radon Gas Mitigation Solutions», 15 de diciembre de 2008. https://web.archive.org/web/20081215190050/http://radon-solution.com/pg_mitigation_methods.php (accedido 2 de febrero de 2022).
- [56] The Ministry of Environment, «The Ministry of Environment. Indoor Air-Quality Maintenance Level.», 2014.
- [57] J. Kang y K.-I. Hwang, «A Comprehensive Real-Time Indoor Air-Quality Level Indicator», *Sustainability*, vol. 8, n.º 9, p. 881, sep. 2016, doi: 10.3390/su8090881.
- [58] K. Petar, *3D Printing and Its Impact on the Production of Fully Functional Components: Emerging Research and Opportunities: Emerging Research and Opportunities*. IGI Global, 2017.
- [59] K. G. Cooper, *Rapid prototyping technology: selection and application*. New York: Marcel Dekker, 2001.
- [60] K.-H. Chang, *Product Performance Evaluation using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series*. Academic Press, 2013.
- [61] C. W. Hull, «Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography», US4575330A, 11 de marzo de 1986 Accedido: 13 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/US4575330A/en>
- [62] «Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies | Chemistry of Materials». <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cm402262g> (accedido 13 de marzo de 2022).

- [63] K. Štekels y A. Martinovs, «3D DLP PRINTER», *Hum. Environ. Technol. Proc. Stud. Int. Sci. Pract. Conf.*, n.º 21, Art. n.º 21, abr. 2017, doi: 10.17770/het2017.21.3562.
- [64] «Stereolithography (SLA) 3D Printing Guide», *Formlabs*. <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#sla-systems> (accedido 13 de marzo de 2022).
- [65] «Impresoras 3D de Resina: SLA, DLP y LED-LCD». https://filament2print.com/es/blog/99_impresoras-3d-resina-SLA-DLP-LED-LCD.html (accedido 13 de marzo de 2022).
- [66] «Gcmm 2004: 1st International Conference on Manufacturing and Management - Prasad K. D. V. Yarlagadda, S. Narayanan - Google Libros». https://books.google.es/books?id=v4Tm1of3UEcC&pg=PA73&redir_esc=y (accedido 14 de marzo de 2022).
- [67] «Lou, A. and Grosvenor, C. (2012) Selective Laser Sintering, Birth of an Industry. University of Austin Cockrell School of Engineering. - References - Scientific Research Publishing». [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1260607](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1260607) (accedido 14 de marzo de 2022).
- [68] «Investigation of laser sintering for freeform fabrication of zirconium diboride parts: In this paper it is presented a study to determine LS process parameters (laser power, scan speed, energy density, line spacing, and layer thickness) that can be used to improve building of ZrB2 parts: Virtual and Physical Prototyping: Vol 7, No 1». <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2012.666119> (accedido 14 de marzo de 2022).
- [69] «Plastic 3D Printing Materials | EOS GmbH». <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer-materials> (accedido 14 de marzo de 2022).
- [70] «Production of spherical semi-crystalline polycarbonate microparticles for Additive Manufacturing by liquid-liquid phase separation | Zenodo». <https://zenodo.org/record/4633734#.YicGeejP3IU> (accedido 8 de marzo de 2022).
- [71] «3D printable conductive materials for the fabrication of electrochemical sensors: A mini review — The University of Brighton». <https://research.brighton.ac.uk/en/publications/3d-printable-conductive-materials-for-the-fabrication-of-electroc> (accedido 14 de marzo de 2022).
- [72] «Best 3D Printers of 2022 – Buyer’s Guide | All3DP». <https://all3dp.com/1/best-3d-printer-reviews-top-3d-printers-home-3-d-printer-3d/> (accedido 15 de marzo de 2022).
- [73] L. Pajuelo, «Los mejores medidores de CO₂ homologados para analizar la calidad del aire en espacios cerrados», *El País*, 8 de octubre de 2021. <https://elpais.com/escaparate/2021-10-08/los-mejores-medidores-de-co-homologados-para-analizar-la-calidad-del-aire-en-espacios-cerrados.html> (accedido 16 de marzo de 2022).
- [74] «Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits». <https://www.adafruit.com/> (accedido 10 de marzo de 2022).
- [75] P. Evans, «Thermal Comfort», *The Engineering Mindset*, 21 de agosto de 2019. <https://theengineeringmindset.com/thermal-comfort-in-buildings/> (accedido 24 de febrero de 2022).
- [76] G. B. Anderson, M. L. Bell, y R. D. Peng, «Methods to Calculate the Heat Index as an Exposure Metric in Environmental Health Research», *Environ. Health Perspect.*, vol. 121, n.º 10, pp. 1111-1119, oct. 2013, doi: 10.1289/ehp.1206273.
- [77] X. G. Solá, «Calidad del aire interior», *Inst. Nac. Segur. Salud En El Trab.*, p. 34.
- [78] «Índice Nacional de Calidad del Aire». <http://www.ica.miteco.es/> (accedido 27 de febrero de 2022).
- [79] «DL No. 40/90, DR I, 6/2/1990 (Portuguese Decree)».
- [80] «ZZBAT 602535 3.7v 500mah Li Polymer Battery with Wires Pl602535 [amazon_B0924G94BT] - \$15.50 : Flash sale!», https://beeglove.shop/index.php?main_page=product_info&products_id=341902 (accedido 10 de marzo de 2022).

- [81] «What is Wi-Fi? Explained in simple terms, <https://3g.co.uk/guides/what-is-wi-fi-explained-in-simple-terms>».
- [82] «¿Qué es la tecnología LoRa y por qué es importante para IoT?, <https://www.thethingsnetwork.org/community/santa-rosa/post/que-es-la-tecnologia-lora-y-por-que-es-importante-para-iot>».
- [83] «Dispositivos LoraWan», *Minkafab*. <https://minkafab.com/tecnologia-lora-lorawan/dispositivos-para-lorawan/> (accedido 13 de marzo de 2022).
- [84] «LoRaWan, <https://lorawan.es/>».
- [85] «LoRa | Advantages of LoRaWAN | Disadvantages of LoRaWAN, <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Lora-or-LoRaWAN.html>».
- [86] «Learn About Bluetooth, <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/range/>».
- [87] «What is the range of Bluetooth® technology? ,<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/range/>».
- [88] «Zigbee: El nuevo estándar global para la domótica e inmótica, <https://www.monografias.com/trabajos61/zigbee-estandar-domotico-inmotica/zigbee-estandar-domotico-inmotica>».
- [89] «Todo sobre ZigBee, la tecnología ultrabarata para comunicación inalámbrica». https://www.elespanol.com/elandroidelibre/otros-dispositivos/otros/20150810/zigbee-tecnologia-ultrabarata-comunicacion-inalambrica/55244514_0.html (accedido 13 de marzo de 2022).
- [90] «Busy as a ZigBee By Jon Adams and Bob Heile, spectrum, <https://web.archive.org/web/20070106215540/http://www.spectrum.ieee.org/oct06/4666>».
- [91] «ZigBee vs Z-Wave for the IoT | Electronics360». <https://electronics360.globalspec.com/article/8625/zigbee-vs-z-wave-for-the-iot> (accedido 27 de febrero de 2022).
- [92] «RFID | RFID Defense Sector». http://ukcorp.org/defense_Sector.html (accedido 27 de febrero de 2022).
- [93] R. P. Ltd, «Buy a Raspberry Pi 3 Model B+», *Raspberry Pi*. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/> (accedido 10 de marzo de 2022).
- [94] «Soportes en Cura: cómo configurar los soportes», *All3DP*, 21 de febrero de 2022. <https://all3dp.com/es/2/optimizar-ajustes-soportes-cura/> (accedido 13 de marzo de 2022).

ANEXO I: CÓDIGO DEL DISPOSITIVO CLIENTE (EN LENGUAJE C)

```
#include <Adafruit_AHTX0.h>
#include <SPI.h>
#include <RH_RF69.h>
#include <RHReliableDatagram.h>
#include <Wire.h>
#include "Adafruit_SGP30.h"
#include "Adafruit_TSL2591.h"

char radiopacket[20] = "Hello World #";
#define RF69_FREQ 433.0

#define MY_ADDRESS      1
#define DEST_ADDRESS    2

#if defined ( __AVR_ATmega32U4__ ) // Feather 32u4 w/Radio
#define RFM69_CS        8
#define RFM69_INT       7
#define RFM69_RST       4
#define LED             13
#endif

#if defined(ADAFRUIT_FEATHER_M0) // Feather M0 w/Radio
#define RFM69_CS        8
#define RFM69_INT       3
#define RFM69_RST       4
#define LED             13
#endif

#if defined ( __AVR_ATmega328P__ ) // Feather 328P w/wing
#define RFM69_INT       3 //
#define RFM69_CS        4 //
#define RFM69_RST       2 // "A"
#define LED             13
#endif

#if defined(ESP8266) // ESP8266 feather w/wing
#define RFM69_CS        2 // "E"
#define RFM69_IRQ      15 // "B"
#define RFM69_RST       16 // "D"
#define LED             0
#endif

#if defined(ESP32) // ESP32 feather w/wing
#define RFM69_RST       13 // same as LED
#define RFM69_CS        33 // "B"
#define RFM69_INT      27 // "A"
#define LED             13
#endif
```

```
RH_RF69 rf69(RFM69_CS, RFM69_INT);

RHReliableDatagram rf69_manager(rf69, MY_ADDRESS);
Adafruit_AHTX0 aht;

int16_t packetnum = 0;

Adafruit_SGP30 sgp;
Adafruit_TSL2591 tsl = Adafruit_TSL2591(2591);
void configureSensorTSL(void)
{
    tsl.setGain(TSL2591_GAIN_MED);          // 25x gain

    tsl.setTiming(TSL2591_INTEGRATIONTIME_300MS);

    Serial.println(F("-----"));
    Serial.print(F("Gain: "));
    tsl2591Gain_t gain = tsl.getGain();
    switch(gain)
    {
        case TSL2591_GAIN_LOW:
            Serial.println(F("1x (Low)"));
            break;
        case TSL2591_GAIN_MED:
            Serial.println(F("25x (Medium)"));
            break;
        case TSL2591_GAIN_HIGH:
            Serial.println(F("428x (High)"));
            break;
        case TSL2591_GAIN_MAX:
            Serial.println(F("9876x (Max)"));
            break;
    }
    Serial.print(F("Timing: "));
    Serial.print((tsl.getTiming() + 1) * 100, DEC);
    Serial.println(F(" ms"));
    Serial.println(F("-----"));
    Serial.println(F(""));
}

float ReadTSL(void)
{
    uint32_t lum = tsl.getFullLuminosity();
    uint16_t ir, full;
    ir = lum >> 16;
    full = lum & 0xFFFF;

    return (tsl.calculateLux(full, ir));
}

void setup()
{
    Serial.begin(115200);
    while (!Serial) { delay(1); }
```

```
Serial.println("Comport initilized!!!");
if (! aht.begin()) {
    Serial.println("Could not find AHT? Check wiring");
    while (1) delay(10);
}
if (! sgp.begin()){
    Serial.println("Sensor not found :(");
    while (1);
}

pinMode(LED, OUTPUT);
pinMode(RFM69_RST, OUTPUT);
digitalWrite(RFM69_RST, LOW);

Serial.println("Feather Addressed RFM69 RX Test!");
Serial.println();

digitalWrite(RFM69_RST, HIGH);
delay(10);
digitalWrite(RFM69_RST, LOW);
delay(10);

if (!rf69_manager.init()) {
    Serial.println("RFM69 radio init failed");
    while (1);
}
Serial.println("RFM69 radio init OK!");

if (!rf69.setFrequency(RF69_FREQ)) {
    Serial.println("setFrequency failed");
}

rf69.setTxPower(20, true);

uint8_t key[] = { 0x01, 0x02, 0x03, 0x04, 0x05, 0x06, 0x07, 0x08,
                  0x01, 0x02, 0x03, 0x04, 0x05, 0x06, 0x07, 0x08};
rf69.setEncryptionKey(key);

pinMode(LED, OUTPUT);

Serial.print("RFM69 radio @"); Serial.print((int)RF69_FREQ); Serial.println("
MHz");
configureSensorTSL();
}

uint8_t data[] = "And hello back to you";
uint8_t data1[] = "And hello u";

sensors_event_t humidity, temp;
int16_t sendthis[6]={20,60,20,144,255,125};
uint8_t sendbuf[12];
uint8_t recvbuf[30];
uint8_t len = sizeof(recvbuf);
String strr;
```

```
void loop() {

    aht.getEvent(&humidity, &temp);
    if (! sgp.IAQmeasure()) {
        Serial.println("Measurement failed");
    }

    sendthis[0] = temp.temperature*100;
    sendthis[1] = humidity.relative_humidity*100;
    if(sgp.TVOC>5)
        sendthis[2] = sgp.TVOC;
    else
        sendthis[2] = 9;
    sendthis[3] = sgp.eCO2;
    sendthis[4] = ReadTSL();

    sendbuf[1] = sendthis[0]&0xFF;
    sendbuf[0] = (sendthis[0]>>8)&0xFF;

    sendbuf[3] = sendthis[1]&0xFF;
    sendbuf[2] = (sendthis[1]>>8)&0xFF;

    sendbuf[5] = sendthis[2]&0xFF;
    sendbuf[4] = (sendthis[2]>>8)&0xFF;

    sendbuf[7] = sendthis[3]&0xFF;
    sendbuf[6] = (sendthis[3]>>8)&0xFF;

    sendbuf[9] = sendthis[4]&0xFF;
    sendbuf[8] = (sendthis[4]>>8)&0xFF;

    rf69.send(sendbuf,10 );
    rf69.waitPacketSent();

    if (rf69_manager.available())
    {

        if (rf69.recv(recvbuf, &len))
        {
            if (!len)
            {
                recvbuf[len] = 0;
            }
            else
            {
                Serial.print("Received [");
                Serial.print(len);
                Serial.print("]: ");
                Serial.print((char*)recvbuf);
                //Serial.print("RSSI: ");
                //Serial.println(rf69.lastRssi(), DEC);

                strr = (char *)recvbuf;
                Serial.print("\r\nHeat Index calculated is ");
            }
        }
    }
}
```

```
Serial.print(strr[0]);Serial.print(strr[1]);Serial.print(strr[2]);Serial.print(str
r[3]);
    Serial.print("\r\nAir Quality Index is ");
    Serial.print(strr[5]);
    Serial.print("\r\nLux Calculated is ");
    Serial.print(strr[7]);
    Serial.print("\r\n");
}

}
else
    Serial.println("nothing recieved!!");

}

delay(1000);
}

void Blink(byte PIN, byte DELAY_MS, byte loops) {
    for (byte i=0; i<loops; i++) {
        digitalWrite(PIN,HIGH);
        delay(DELAY_MS);
        digitalWrite(PIN,LOW);
        delay(DELAY_MS);
    }
}
```

ANEXO II: CÓDIGO DEL DISPOSITIVO SERVIDOR (EN LENGUAJE PYTHON)

```
SPDX-FileCopyrightText: 2018 Brent Rubell for Adafruit Industries
# Import Python System Libraries
import time
# Import Blinka Libraries
import busio
from digitalio import DigitalInOut, Direction, Pull
import board
# Import the SSD1306 module.
import adafruit_ssd1306
# Import the RFM69 radio module.
import adafruit_rfm69
##import pandas as pd
##import numpy as np
import csv
from datetime import datetime

co = dict.fromkeys(list(range(0,200)), 1)
co.update(dict.fromkeys(list(range(200,350)), 2))
co.update(dict.fromkeys(list(range(350,500)), 3))
co.update(dict.fromkeys(list(range(500,700)), 4))
VOC = dict.fromkeys(list(range(4,5)), 1)
VOC.update(dict.fromkeys(list(range(5,10)), 2))
VOC.update(dict.fromkeys(list(range(10,15)), 3))
VOC.update(dict.fromkeys(list(range(15,200)), 4))

def resultado(x):
    if x==1:
        print('A')
    elif x==2:
        print('B')
    elif x==3:
        print('C')
    elif x==4:
        print('D')
    return (x)

def airquality(v,c):
    #c=0
    #v=0
    #c=input('Enter CO:')
    #if c>2:
    c=float(c)
    #else:
    #    c=4
    #v=input('Enter VOC:')
    v=float(v)
    monox=co[c]
    monox=int(monox)
    vox=VOC[v]
    vox =int(vox)
```

```
# print(monox)
#print(vox)
if monox>vox:
    resul=monox
elif vox>monox:
    resul=vox
elif vox==monox:
    resul=monox
X=resultado(resul)
print("Result of air quality is ",X)
return X

def heatindex(temp,hum):
    # temp = int(input("Temperature(*C): "))
    #hum = int(input("Humidity(%): "))
    #°C INTO EN FAHRENHEIT
    fahrenheit = ((temp * 9/5) + 32)
    T2 = pow(fahrenheit, 2)
    T3 = pow(fahrenheit, 3)
    H2 = pow(hum, 2)
    H3 = pow(hum, 3)
    #COEF
    C1 = [ -42.379, 2.04901523, 10.14333127, -0.22475541, -6.83783e-03, -
5.481717e-02, 1.22874e-03, 8.5282e-04, -1.99e-06]
    C2 = [ 0.363445176, 0.988622465, 4.777114035, -0.114037667, -0.000850208, -
0.020716198, 0.000687678, 0.000274954, 0]
    C3 = [ 16.923, 0.185212, 5.37941, -0.100254, 0.00941695, 0.00728898,
0.000345372, -0.000814971, 0.0000102102, -0.000038646, 0.0000291583,
0.00000142721, 0.000000197483, -0.0000000218429, 0.00000000843296, -
0.0000000000481975]
    heatindex1 = C1[0] + (C1[1] * fahrenheit) + (C1[2] * hum) + (C1[3] *
fahrenheit * hum) + (C1[4] * T2) + (C1[5] * H2) + (C1[6] * T2 * hum) + (C1[7] *
fahrenheit * H2) + (C1[8] * T2 * H2)
    print("\nThe Heat index or the feels-like temperature is:")

    print(round(((heatindex1 - 32) * 5/9), 0), "C")
    return round(((heatindex1 - 32) * 5/9), 0)

def Luxhome(lux):
    if (150<lux<=170) or (60>lux>=40) :
        return 0
    elif (130<lux<=150) or (80>lux>=60):
        return 0
    elif (110<lux<=130) or (90>lux>=80):
        return 0
    elif (90<=lux<=110):
        return 0
#33
    return 4

def LuxOF(lux):
    if (150<lux<=170) or (60>lux>=40) :
        return 4
    elif (130<lux<=150) or (80>lux>=60):
        return 4
    elif (110<lux<=130) or (90>lux>=80):
```

```
        return 4
    elif (90<=lux<=110):
        return 4
#33
    return 4

# Button A
btnA = DigitalInOut(board.D5)
btnA.direction = Direction.INPUT
btnA.pull = Pull.UP

# Button B
btnB = DigitalInOut(board.D6)
btnB.direction = Direction.INPUT
btnB.pull = Pull.UP

# Button C
btnC = DigitalInOut(board.D12)
btnC.direction = Direction.INPUT
btnC.pull = Pull.UP

# Create the I2C interface.
i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)

# 128x32 OLED Display
reset_pin = DigitalInOut(board.D4)
display = adafruit_ssd1306.SSD1306_I2C(128, 32, i2c, reset=reset_pin)
# Clear the display.
display.fill(0)
display.show()
width = display.width
height = display.height

# Configure Packet Radio
CS = DigitalInOut(board.CE1)
RESET = DigitalInOut(board.D25)
spi = busio.SPI(board.SCK, MOSI=board.MOSI, MISO=board.MISO)
rfm69 = adafruit_rfm69.RFM69(spi, CS, RESET, 433.0)
prev_packet = None
# Optionally set an encryption key (16 byte AES key). MUST match both
# on the transmitter and receiver (or be set to None to disable/the default).
rfm69.encryption_key =
b'\x01\x02\x03\x04\x05\x06\x07\x08\x01\x02\x03\x04\x05\x06\x07\x08'
aqi = 0
hti = 0
luxi = 0
sendarr = [1,2,3,4,5]

while True:
    packet = None
    # draw a box to clear the image
    display.fill(0)
    display.text('CONFORT', 35, 0, 1)

    # check for packet rx
```

```
packet = rfm69.receive()
if packet is None:
    display.show()
    display.text('espere por favor', 20, 20, 1)

else :
    if button_a.value:
        display.text('CONFORT HOME', 35, 0, 1)
        now = datetime.now()
        current_time = now.strftime('%d/%m/%Y, %H:%M:%S')
        monoxi = (packet[7] | packet[6] << 8)
        temperatura = (packet[1] | packet[0] << 8) / 100.0
        humedad = (packet[3] | packet[2] << 8) / 100.0
        vocs = (packet[5] | packet[4] << 8)
        luzi = (packet[9] | packet[8] << 8)
        datilla = [current_time, temperatura, humedad, vocs, monoxi, luzi]
        print("TEMPERATURA", temperatura)
        print("HUMEDAD", humedad)
        print("VOC", vocs)
        print("MONOX", monoxi)
        print("LUZ", luzi)
        hti =
heatindex((packet[1] | packet[0] << 8) / 100.0, (packet[3] | packet[2] << 8) /
100.0)
        aqi = airquality(packet[5] | packet[4] << 8, packet[7] | packet[6] << 8)
        luxi = Luxhome(packet[9] | packet[8] << 8)
        display.show()
        display.text('T', 0, 10, 1)
        display.text(str(temperatura), 7, 10, 1)
        display.text('hum', 30, 10, 1)
        display.text(str(humedad), 50, 10, 1)
        display.text('CT', 70, 10, 1)
        display.text(str(hti), 85, 10, 1)
        #2NDLINE
        display.text('Lux', 0, 20, 1)
        display.text(str(luzi), 21, 20, 1)
        display.text('AQI', 37, 20, 1)
        display.text(str(aqi), 60, 20, 1)
        print("Result of Lux is ->", Luxhome(packet[9] | packet[8] << 8))
        with open('example.csv', 'a') as file:
            writer = csv.writer(file)
            writer.writerow(datilla)
    else:
        display.text('CONFORT OFFICE', 35, 0, 1)
        now = datetime.now()
        current_time = now.strftime('%d/%m/%Y, %H:%M:%S')
        monoxi = (packet[7] | packet[6] << 8)
        temperatura = (packet[1] | packet[0] << 8) / 100.0
        humedad = (packet[3] | packet[2] << 8) / 100.0
        vocs = (packet[5] | packet[4] << 8)
        luzi = (packet[9] | packet[8] << 8)
        datilla = [current_time, temperatura, humedad, vocs, monoxi, luzi]
        print("TEMPERATURA", temperatura)
        print("HUMEDAD", humedad)
        print("VOC", vocs)
        print("MONOX", monoxi)
        print("LUZ", luzi)
```

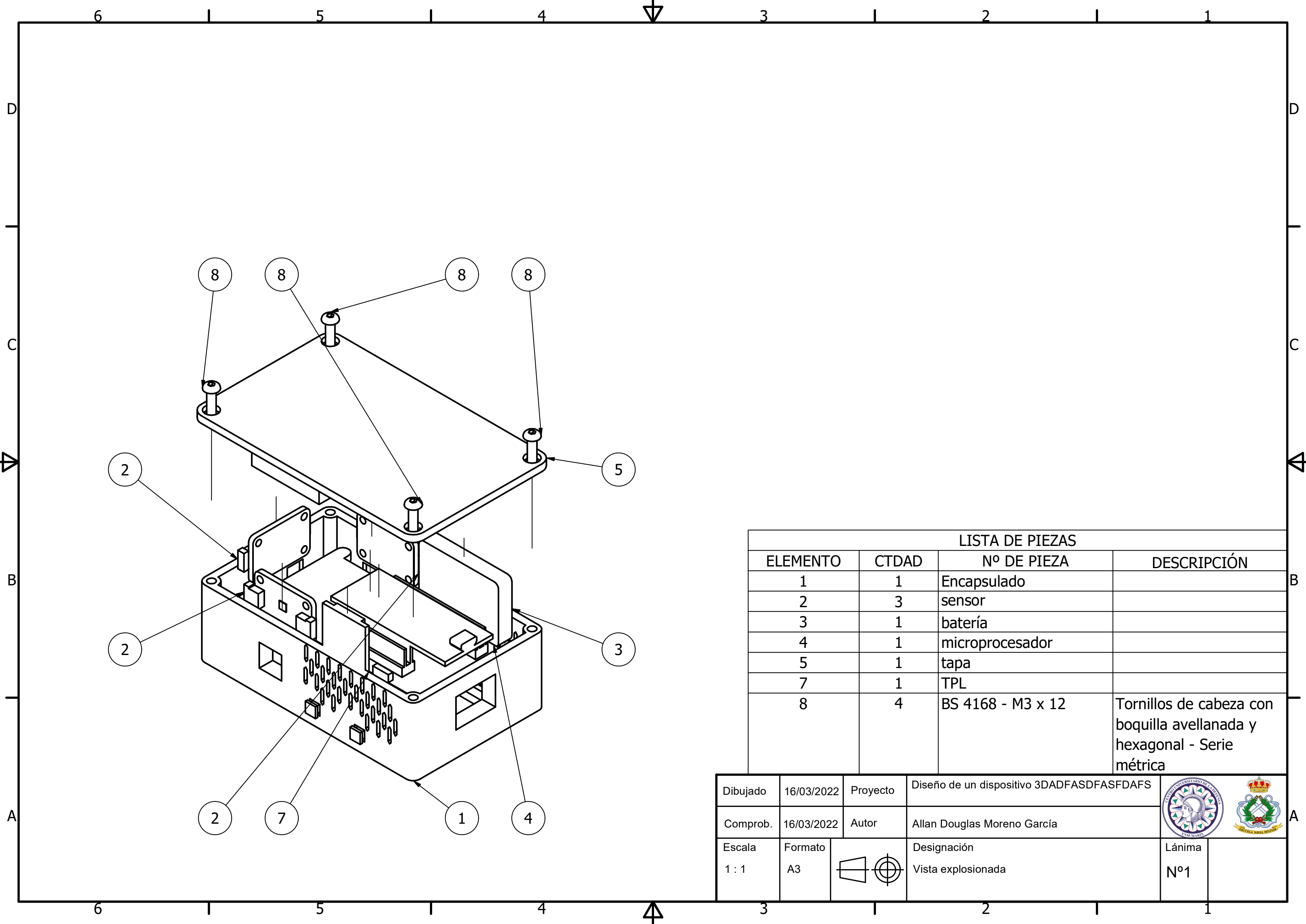
```
        hti =
heatindex((packet[1] | packet[0] << 8) / 100.0, (packet[3] | packet[2] << 8) /
100.0)

        aqi = airquality(packet[5] | packet[4] << 8, packet[7] | packet[6] << 8)
        luxi = LuxOF(packet[9] | packet[8] << 8)
        display.show()
        display.text('T', 0, 10, 1)
        display.text(str(temperatura), 7, 10, 1)
        display.text('hum', 30, 10, 1)
        display.text(str(humedad), 50, 10, 1)
        display.text('CT', 70, 10, 1)
        display.text(str(hti), 85, 10, 1)
        #2NDLINE
        display.text('Lux', 0, 20, 1)
        display.text(str(luxi), 21, 20, 1)
        display.text('AQI', 37, 20, 1)
        display.text(str(aqi), 60, 20, 1)
        print("Result of Lux is ->", LuxOF(packet[9] | packet[8] << 8))
        with open('example.csv', 'a') as file:
            writer = csv.writer(file)
            writer.writerow(datilla)

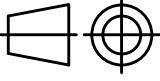
    # Send Button A
#    display.fill(0)
    sendarr[0] = hti
    sendarr[1] = aqi
    sendarr[2] = luxi
    #dataa = [hti, aqi, luxi]
    button_a_data = bytes(str(hti) + " " + str(aqi) + " " + str(luxi), "utf-8")
    #with open('example.csv', 'a') as file:
        #writer = csv.writer(file)
        #writer.writerow(dataa)
    #print(button_a_data)
    #button_a_data = bytes(sendarr[0].to_bytes(2, 'big'))
    rfm69.send(button_a_data)
    rfm69.send("3")
    #display.text('Sent Button A!', 25, 15, 1)

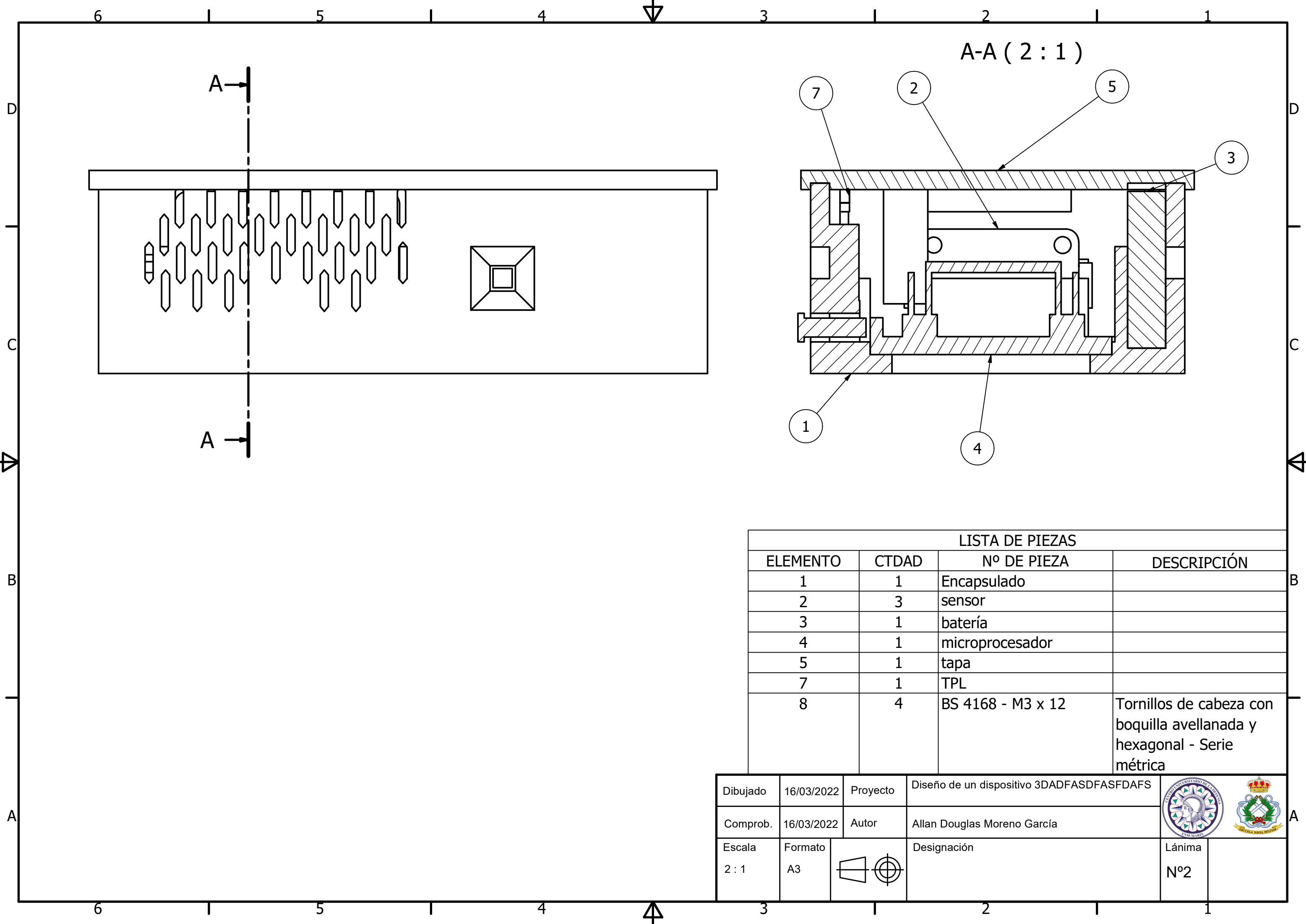
    #print("Printing data")
    display.show()
    time.sleep(0.5)
```

ANEXO III: PLANOS

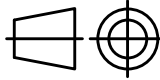


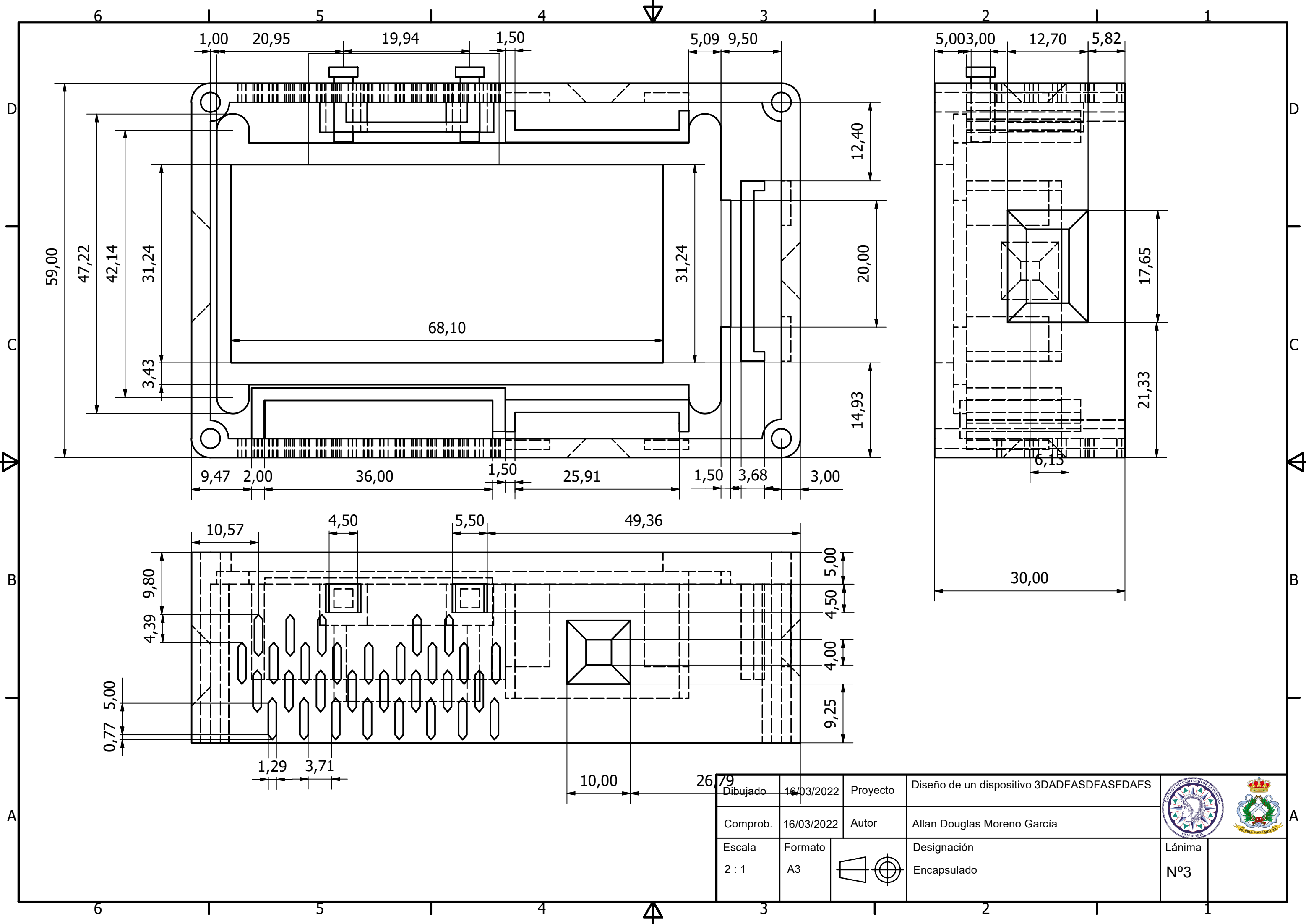
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Encapsulado	
2	3	sensor	
3	1	batería	
4	1	microprocesador	
5	1	tapa	
7	1	TPL	
8	4	BS 4168 - M3 x 12	Tornillos de cabeza con boquilla avellanada y hexagonal - Serie métrica

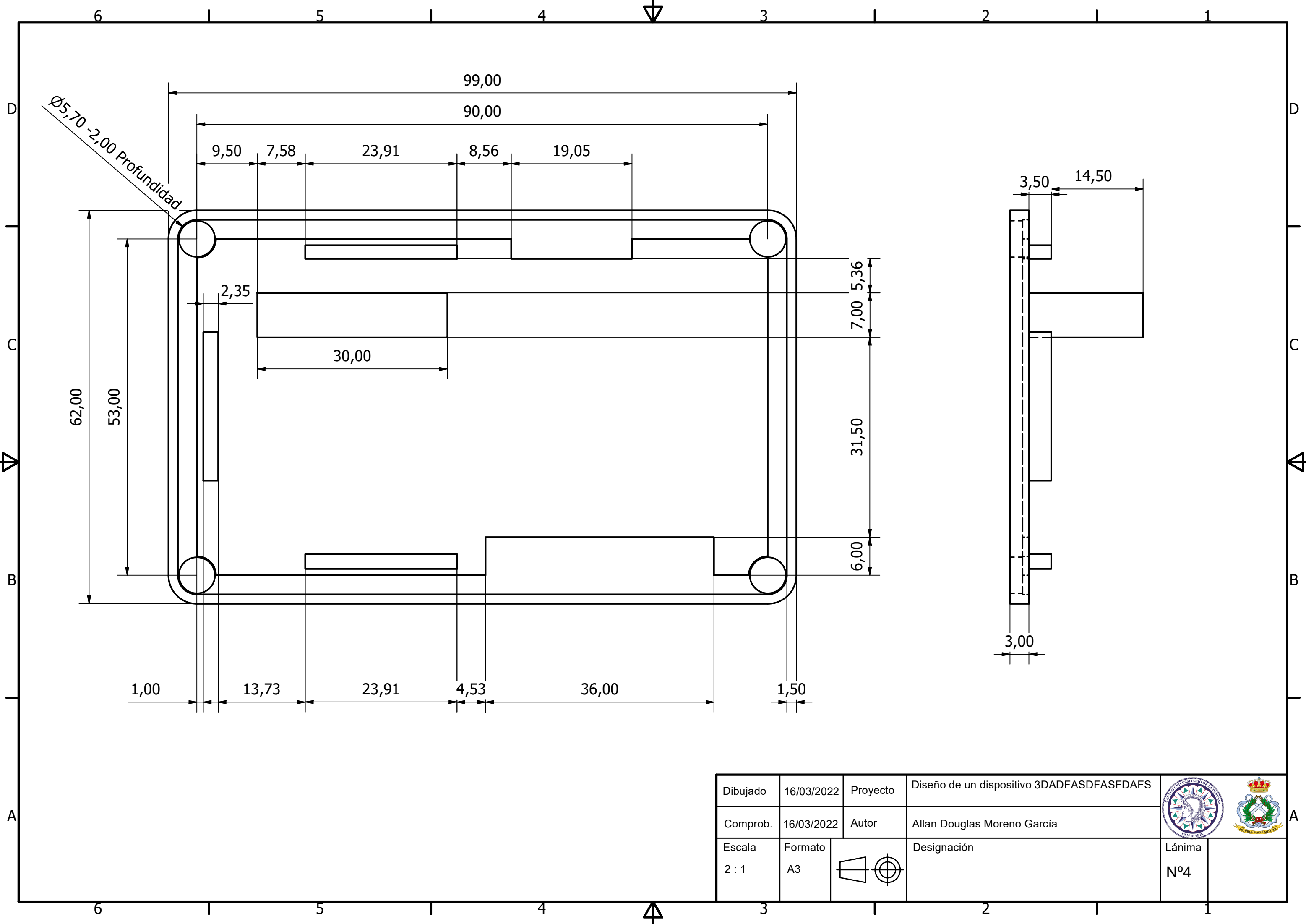
Dibujado	16/03/2022	Proyecto	Diseño de un dispositivo 3DADFASDFASDFAFS	 
Comprob.	16/03/2022	Autor	Allan Douglas Moreno García	
Escala	Formato		Designación	Lánima
1 : 1	A3		Vista explosionada	Nº1

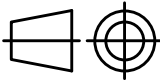


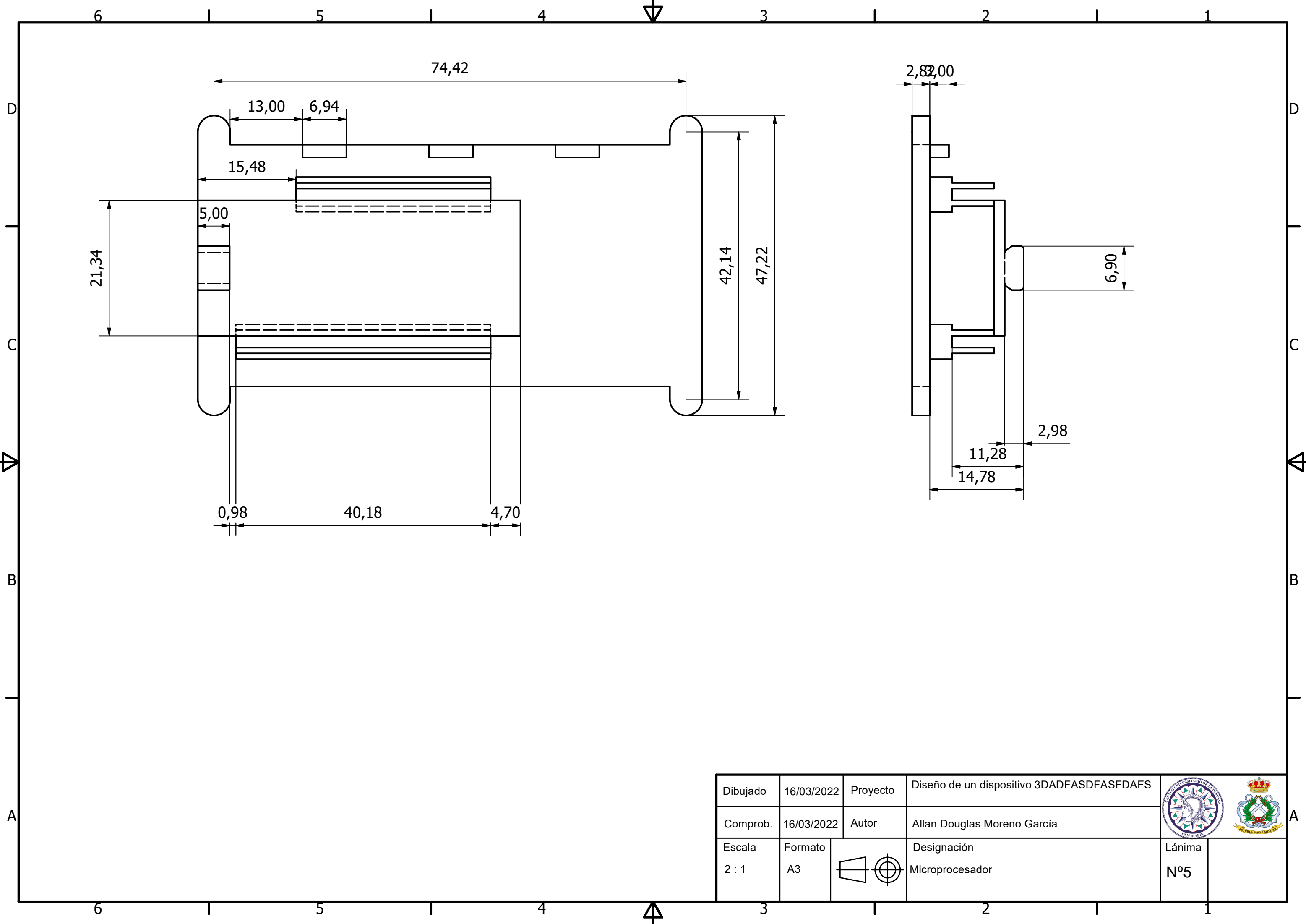
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Encapsulado	
2	3	sensor	
3	1	batería	
4	1	microprocesador	
5	1	tapa	
7	1	TPL	
8	4	BS 4168 - M3 x 12	Tornillos de cabeza con boquilla avellanada y hexagonal - Serie métrica

Dibujado	16/03/2022	Proyecto	Diseño de un dispositivo 3DADFASDFASDFAFS	 
Comprob.	16/03/2022	Autor	Allan Douglas Moreno García	
Escala	Formato		Designación	Lánima
2 : 1	A3			Nº2





Dibujado	16/03/2022	Proyecto	Diseño de un dispositivo 3DADFASDFASDFAFS			
Comprob.	16/03/2022	Autor	Allan Douglas Moreno García			
Escala	Formato		Designación		Lánima	
2 : 1	A3				Nº4	



Dibujado	16/03/2022	Proyecto	Diseño de un dispositivo 3DADFASDFASFDAFS	 
Comprob.	16/03/2022	Autor	Allan Douglas Moreno García	
Escala 2 : 1	Formato A3		Designación Microprocesador	Lánima Nº5

