

# Sistema de prevencion de muerte de cuna

Ingenieria en Diseño Electronico y Sistemas Inteligentes

Juan Daniel Polanco Avalos

Christopher Adan Madrigal Renteria

Daniel Rodriguez Contreras

**Resumen**—Presentar una introducción y justificación a los propósitos del proyecto de titulación “*Prevención de muerte por asfixia accidental*”, enfocado a reducir el riesgo de muerte por asfixia monitoreando al lactante durante el periodo de siesta.

**Index Terms**—Muerte súbita del lactante, muerte infantil, posición del sueño, monitoreo de lactantes, prevención de SIDS.

## ÍNDICE

<b>I. Justificación</b>	1
I-A. Antecedentes . . . . .	2
I-A1. Pulsera Liip . . . . .	2
I-A2. Sense U . . . . .	2
I-A3. Babysense 7 . . . . .	2
I-B. Objetivos . . . . .	2
I-B1. Generales . . . . .	2
I-B2. Específicos . . . . .	2
I-C. Limitaciones . . . . .	2
I-C1. Tamaño del sistema . . . . .	2
I-C2. Precisión del dispositivo . . . . .	2
I-C3. Duración de la batería . . . . .	2
I-C4. Medición de temperatura . . . . .	2
I-C5. Medición de la respiración . . . . .	2
I-D. Interés técnico y/o científico . . . . .	2
I-E. Utilidad . . . . .	3
<b>II. Diseño (Desarrollo Teórico )</b>	3
II-A. Diagrama a bloques del sistema . . . . .	3
II-B. ESP32 . . . . .	3
II-B1. Características . . . . .	3
II-B2. Uso . . . . .	3
II-C. Sensores . . . . .	4
II-C1. MPU-9250 . . . . .	4
II-C2. Sensor de temperatura infrarrojo MLX90614 . . . . .	4
II-D. Comunicación . . . . .	4
II-D1. Bluetooth Low Energy . . . . .	4
II-E. WI-FI . . . . .	5
<b>III. Orientacion</b>	5
III-A. Cuaternión . . . . .	5
III-B. Filtro de Mahony . . . . .	5
III-C. Angulos de Tait-Bryan . . . . .	6
<b>IV. Experimentación</b>	7
IV-A. Pruebas con filtro de Mahony y MPU-9250 . . . . .	7
IV-B. Pruebas con sensor de temperatura MLX90614 . . . . .	9
IV-C. Duración de batería Li-Po . . . . .	9

<b>V. Sistema Operativo</b>	10
<b>VI. Aplicación</b>	10
<b>VII. Construcción</b>	10
VII-A. Modulo de carga y alimentación . . . . .	10
VII-B. Diseño PCB . . . . .	10
VII-B1. Esquematicos . . . . .	10
VII-B2. Layout . . . . .	11
VII-B3. PCB 3D . . . . .	11
VII-C. Diseño de Carcasa . . . . .	11

<b>Referencias</b>	12
--------------------	----

## I. JUSTIFICACIÓN

El Síndrome de muerte subita del lactante (SMSL) se define como la muerte súbita de un bebé menor de un año que permanece sin explicación. El Síndrome de muerte subita inesperada del lactante (SMSIL), también conocido como muerte repentina inesperada en la infancia, es un término utilizado para describir cualquier muerte súbita e inesperada, ya sea explicada o no, que ocurre durante la infancia.

Según ciertos estudios [1] solo en Estados Unidos mueren cerca de 1 bebe por cada 2000 habitantes. Existen muchas razones por las cuales puede suceder esto, según un estudio realizado en el 2009 por Kinney, Hannah C [2], se pueden clasificar de la siguiente manera.

Factores de riesgo extrínsecos:

- Dormir en una posición prona o de lado.
- Ropa de cama suave.
- Colecho (Compartir la cama con el infante).
- Infecciones leves como resfriados.

Factores de riesgo intrínsecos:

- Prematuridad.
- Exposición perinatal al fumado.
- Consumo de alcohol o drogas por parte de los padres

Actualmente es aceptado que los bebés que duermen boca abajo tienen un riesgo de entre 3.5 y 9.3 veces mayor de muerte súbita e inesperada.

Por lo que se propone disminuir este riesgo utilizando la tecnología como pilar, esto desarrollando un dispositivo que sea portátil, lo menos invasivo posible y que nos permita monitorear diferentes aspectos del bebe durante el sueño y determinar si existe un riesgo a la vida del infante.

## I-A. Antecedentes

Cuidar a un bebé nunca ha sido tarea fácil, los padres tienen que estar al pendiente de sus hijos todo el tiempo, sobre todo cuando estos están en su cuna. La mayoría de las recomendaciones que se dan para que un bebé pueda dormir seguro en su cuna tienen que ver con la posición y acomodo en la que debe de estar acostado el bebé además de la ubicación de su cuna.

A día de hoy hay dispositivos que tratan de ayudar a los padres con estas cuestiones, donde principalmente se tratan de monitores, pulseras o alfombrillas, a continuación, se muestran unos ejemplos:

*I-A1. Pulsera Liip:* Este dispositivo es una pulsera con bluetooth, la cual manda información en tiempo real toda la información de las constantes vitales de un bebé a través de la app Liip Care en smartphones para hacer seguimiento de su bienestar. Ritmo cardíaco (lpm), niveles de oxígeno en sangre (%) y temperatura (°C).

La conexión entre pulsera y smartphone es por medio bluetooth al aire libre la distancia de conexión es de 30 metros, pero en una vivienda se reduce por los materiales y tiene una duración de la batería aproximada de 12-13 horas.

La manera en que notifica de algún suceso extraño es por medio de alertas, la aplicación puede ser modificada en dos modos: el modo tendencias genera las alertas solo cuando se detectan cambios que pueden suponer un problema para el bebé, reduciendo las falsas alarmas. El modo personalizado alerta en el momento de que se superen los umbrales definidos por el usuario.

*I-A2. Sense U:* Este dispositivo es un monitor con cámara para bebés, el cual permite mediante la aplicación interactuar tanto con la cámara como con el micrófono y la bocina del monitor.

Permite al usuario mediante la aplicación móvil poder ver en video lo captado por la cámara, el sonido mediante el micrófono y la reproducción de audio mediante la bocina, además de recibir alertas cuando el bebé se mueva.

*I-A3. Babysense 7:* Este dispositivo similar a un tapete, se colocan dos debajo del colchón y estos se centran en medir los movimientos del bebé de manera constante, enfocándose principalmente en su respiración, cuenta con un dispositivo aparte (conocido como unidad de control) que funciona como una alarma, este va agarrado a la cuna y utiliza 4 baterías AA.

Tanto el tapete como la alarma se comunican de forma inalámbrica. La manera en que notifica de alguna situación del peligro es mediante una alarma tanto sonora como visual se activa cuando no se haya detectado ninguna clase de movimiento en los últimos 20 segundos, o si los movimientos del bebé se vuelven extremadamente lentos (menos de 10 micro movimientos por minuto)

## I-B. Objetivos

*I-B1. Generales:* Ayudar en la prevención del Síndrome de muerte súbita del lactante detectando un 80 % de posibles asfixias.

*I-B2. Específicos:* - Realizar mediciones de la posición, respiración y temperatura del bebé para determinar un posible riesgo. - Lanzar un aviso en caso de detectarse posibles riesgos al bebé. - Diseñar el sistema con las dimensiones adecuadas al tamaño de un infante. - Diseñar el sistema para ser ergonómico para el bebé.

## I-C. Limitaciones

Este proyecto cuenta con varias limitaciones durante su etapa de experimentación y prototipado.

*I-C1. Tamaño del sistema:* El tamaño es una limitación ya que debe ser pequeño y liviano de forma que no moleste el sueño del bebé.

*I-C2. Precisión del dispositivo:* Debido a la naturaleza experimental del proyecto, la precisión para determinar correctamente la posición del bebé y su colocación se vuelve un reto, por lo que es necesario limitar la cantidad de movimientos y posiciones distintas que el sistema pueda detectar. Esto representa enfocarnos a lograr la medición correcta de ciertos movimientos y posiciones, y posterior a esto, pasar a una etapa donde el sistema pueda ser más general.

*I-C3. Duración de la batería:* Esta limitación está relacionada y es directa al tamaño del dispositivo, ya que, al ser portátil y suficientemente liviana para colocarse en la ropa del bebé, el manejo y duración de la batería se vuelve una tarea crítica, por lo que el objetivo principal es que esta dura dos ciclos de sueño del bebé, dando un aproximado de 16 horas.

*I-C4. Medición de temperatura:* Como parte de la propuesta para mejorar la calidad de nuestra predicción de riesgo se encuentra la medición de la temperatura del bebé, esto puede ser una limitación debido a que el dispositivo no entra en contacto con la piel del bebé, así que el método de medición puede resultar no fiable o no tener la velocidad de respuesta adecuada.

*I-C5. Medición de la respiración:* Igual que la medición de temperatura, detectar la respiración es parte de las variables planteada para mejorar la calidad del dispositivo.

Por lo que la selección sensores y el diseño de un algoritmo adecuado para determinar la respiración puede volverse una limitante, debido a que los movimientos de la respiración de un bebé son difíciles de captar.

## I-D. Interés técnico y/o científico

El interés principal de este producto surge del hecho de que se quiere abordar la problemática desde otra perspectiva como lo es con un dispositivo portátil que pueda pegarse de alguna manera a la ropa del bebé, dicho dispositivo incorporara elementos electrónicos y se relaciona con la tendencia del IoT, donde al abordarlo de esta forma nos toparemos con cuestiones como las siguientes:

- ¿Qué algoritmos podemos usar o desarrollar para calcular posiciones por medio de histórico de aceleraciones?
- ¿Es necesario el desarrollo de la aplicación en tiempo real a IoT?
- ¿De qué manera podríamos medir la respiración mediante acelerómetros?

- ¿De que forma podemos medir la temperatura sin tocar la piel directamente?

A final de cuentas, se busca que el producto sea versátil y de suma utilidad.

#### I-E. Utilidad

Este dispositivo permite reducir la posibilidad de una muerte por asfixia en lactantes de entre 28 días a 1 año.

Esto se logra mediante un monitoreo del lactante durante los períodos de sueño detectando malas posturas que puedan derivar a riesgos para su salud, alertando a los tutores para que puedan reaccionar y evitar estos riesgos.

Otra clave del proyecto, es diseñarlo para ser de un costo mas accesible a los productos ya existentes y ser portatil, ayudando así a reducir el esfuerzo para cuidar a un bebe y reduciendo la incetidumbre que existe durante su primer año de vida.

## II. DISEÑO (DESARROLLO TEÓRICO )

#### II-A. Diagrama a bloques del sistema

En la siguiente figura, se muestra el diagrama a bloques del sistema, donde se destaca que es lo que conforma cada una de las partes de potencia, microprocesador, comunicación y perifericos.

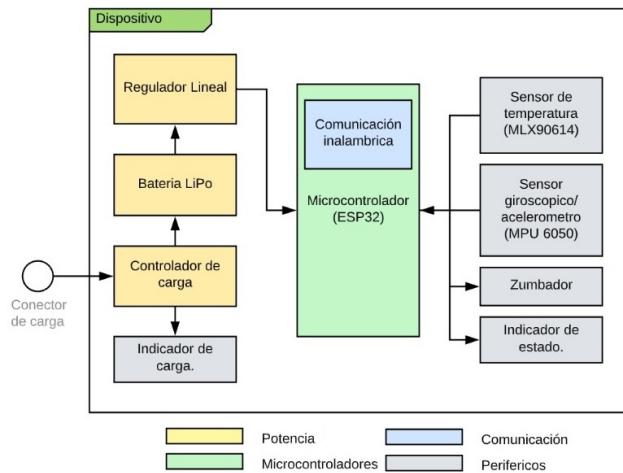


Figura 1: Diagrama a bloques del sistema

#### II-B. ESP32

ESP32 es la denominación de una familia de chips SoC de bajo costo y consumo de energía, con tecnología Wi-Fi y Bluetooth de modo dual integrada. El ESP32 emplea un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 en sus variantes de simple y doble núcleo e incluye interruptores de antena, balun de radiofrecuencia, amplificador de potencia, amplificador receptor de bajo ruido, filtros, y módulos de administración de energía. El ESP32 fue creado y desarrollado por Espressif Systems y es fabricado por TSMC utilizando su proceso de 40 nm.

#### II-B1. Características:

- Procesador:
  - CPU: microprocesador de 32-bit Xtensa LX6 de doble núcleo (o de un solo núcleo), operando a 160 o 240 MHz y rindiendo hasta 600 DMIPS.
  - Co-procesador de ultra baja energía (ULP).
- Memoria: 520 KiB SRAM
- Conectividad inalámbrica:
  - Wi-Fi: 802.11 b/g/n
  - Bluetooth: v4.2 BR/EDR y BLE
- Interfaces periféricas:
  - 12-bit SAR ADC de hasta 18 canales
  - 2 × 8-bit DACs
  - 10 × sensores de tacto (sensores capacitivos GPIOs)
  - 4 × SPI
  - 2 × interfaces I<sup>2</sup>S
  - 2 × interfaces I<sup>2</sup>C
  - 3 × UART
  - Controlador host SD/SDIO/CE-ATA/MMC/eMMC
  - Controlador esclavo SDIO/SPI
  - Interfaz Ethernet MAC con DMA dedicado y soporte para el protocolo IEEE 1588 Precision Time Protocol
  - Bus CAN 2.0
  - Controlador remoto infrarrojo (TX/RX, hasta 8 canales)
  - Motor PWM
  - LED PWM (hasta 16 canales)
  - Sensor de efecto Hall
  - Pre-amplificador analógico de ultra baja potencia
- Administración de energía:
  - Regulador interno de baja caída
  - Dominio de poder individual para RTC
  - Corriente de 5microA en modo de suspensión profundo
  - Despierta por interrupción de GPIO, temporizador, medidas de ADC, interrupción por sensor de tacto capacitivo

II-B2. Uso: El monitoreo en el Sistema de Prevención para la muerte de lactantes es crítico y es necesario de un MPU que sea capaz de realizar operaciones aritméticas lo más eficiente posible y al tener un procesador operando a 160 o 240 MHz y rindiendo hasta 600 DMIPS.

Así mismo El ESP32 cuenta módulos de comunicación tanto de bluetooth y wifi, lo que hace nuestro sistema más compacto y así no sea evasivo con el lactante porque utilizamos menos componentes.

Las interfaces I<sup>2</sup>C facilitan la comunicación entre los sensores al ser la transferencia de datos es siempre inicializada por un maestro; el esclavo reacciona. Esto hace posible tener varios maestros mediante un modo multimaestro, en el que se pueden comunicar dos maestros entre sí, de modo que uno de ellos trabaja como esclavo.

El bajo consumo de energía hace que la batería de litio de 3.6v que se implementa en el sistema duré un promedio de

16hrs lo cual es un tiempo razonable para el monitoreo del sueño del lactante.



**Figura 2:** ESP32 WROOM

### II-C. Sensores

**II-C1. MPU-9250:** El MPU-9250 de InvenSense, es un dispositivo de medición inercial (IMU) de 9 ejes, que combina un giroscopio de 3 ejes, un acelerómetro de 3 ejes, y un magnetómetro de 3 ejes, donde cada uno de estos cuenta con:

- Tres convertidores analógico-digitales (ADC) de 16 bits para digitalizar sus salidas.
- Registros individuales de configuración, ya sea para rangos, frecuencia de muestreo, habilitación, etc.

La unión de estos tres sensores y sus posibles configuraciones permiten el desarrollo de sistemas de detección/medición de movimientos con una buena fiabilidad.



**Figura 3:** MPU-9250

#### II-C1a. Características:

- Giroscopio de tres ejes de salida digital con un rango de escala completa programable de  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$  y  $\pm 2000^{\circ}/\text{seg}$ .
- Acelerómetro de tres ejes de salida digital con un rango de escala completa programable de  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  y  $\pm 16g$ .
- Sensor magnético monolítico de efecto Hall de 3 ejes con concentrador magnético con resolución de 0,6T/LSB.
- Cuenta con interfaz para comunicación por SPI y I2C.

#### II-C1b. uso:

**II-C2. Sensor de temperatura infrarrojo MLX90614:** El Sensor de temperatura infrarrojo permite medir la temperatura de un objeto a distancia (sin contacto). El Sensor MLX90614 es un chip de silicio con una fina membrana micro mecanizada, diseñada para ser sensible a la radiación infrarroja emitida por un objeto a distancia. El sensor posee internamente una etapa de amplificación y digitalización (ADC) de la señal procedente de la membrana. La salida del sensor es lineal y se compensa de acuerdo con las variaciones de la temperatura ambiente.

El sensor MLX90614 integra un circuito de filtrado de ruido, un conversor A/D(ADC) de 17 bits de resolución y un procesador digital de señales, entregando un amplio rango de trabajo para objetos desde  $-70^{\circ}\text{C}$  hasta  $380^{\circ}\text{C}$ , con una precisión de  $0.5^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4:** Sensor MLX90614

#### II-C2a. Características:

- Voltaje de operación: 3.3V-5V DC
- Protocolo de comunicación SMBUS (subconjunto del I2C)
- Precisión:  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
- ADC interno de 17 bits
- Procesador digital de señal interno
- Regulador de voltaje 3.3V en placa
- Resistencias Pull-up a VIN en placa

#### II-C2b. uso:

### II-D. Comunicación

**II-D1. Bluetooth Low Energy:** Es una tecnología de red de área personal inalámbrica, diseñada y comercializada por Bluetooth SIG destinada a aplicaciones en el cuidado de la salud, fitness y beacons,1 seguridad y las industrias de entretenimiento en el hogar Comparado con Bluetooth clásico, Bluetooth Low Energy está diseñado para proporcionar un bajo consumo de energía, manteniendo un rango de alcance de comunicación similar.

Los sistemas operativos móviles, incluidos iOS, Android, Windows Phone y BlackBerry, así como macOS, Linux, Windows 8 y Windows 10, son compatibles con Bluetooth Low Energy. Bluetooth SIG predice que el 100 % de los dispositivos con Bluetooth comercializados hasta 2024 soportaran Bluetooth Low Energy.

#### II-D1a. Características:

- Permite la comunicación entre dispositivos de pila de botón y dispositivos.

- Bluetooth, que opera en 2.4 GHz (una de las bandas ISM), con una tasa de transferencia de 1 Mbps en la capa física.
- Los chips de BLE tienen amplias opciones de empleo en la industria.
- Tienen el mismo tamaño de los dispositivos Bluetooth clásicos.
- Tiene soporte para seguridad, ya que emplean el sistema de cifrado AES y esquemas de seguridad configurables.



**Figura 5:** Bluetooth BLE

## II-E. WI-FI

## III. ORIENTACION

### III-A. Cuaternión

Los cuaterniones son números hipercomplejos, siendo una extensión de los números reales, similar a la de los números complejos convencionales.

Mientras que los números complejos son una extensión de los reales por la adición de la unidad imaginaria  $i$ , tal que  $i^2 = -1$ , los cuaterniones son una extensión generada de manera análoga, añadiendo las unidades imaginarias:  $i, j$  y  $k$  a los números reales y tal que  $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ .

x	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	-j
j	j	-k	-1	i
k	k	j	-i	-1

**Cuadro I:** Tabla de Cayley

La tabla I no describe como es la operación de las componentes entre si para un cuaternion.

Un cuaternion tiene la siguiente forma y estructura:

$$q = [a, b, c, d]$$

$$q = a + bi + cj + dk$$

Donde  $a, b, c$  y  $d$  son números reales únicamente determinados por cada cuaternion y  $1, i, j$  y  $k$ , son entonces las componentes "base" de un cuaternion.

Con los cuaterniones podemos realizar las 4 operaciones básicas con sus respectivas propiedades, estas operaciones son suma, resta, producto y cociente, solo hay que tener en cuenta que el producto no es comunitativo, el orden de los operandos si afecta.

$$q_{a+b} = q_a + q_b$$

$$q_{a-b} = q_a - q_b$$

$$q_{a \otimes b} = q_a \otimes q_b$$

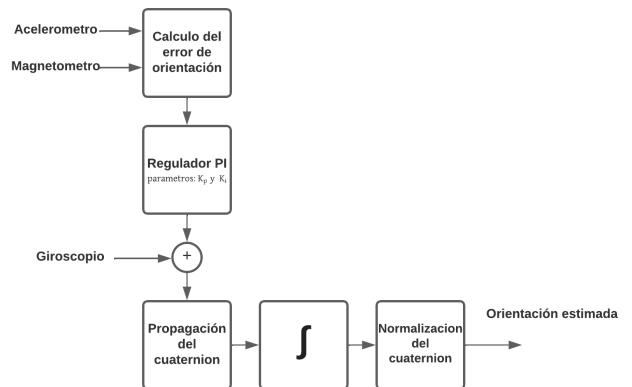
$$q_{a \otimes b} \neq q_{b \otimes a}$$

$$\frac{q_a}{q_b} = \frac{q_{ab}}{(\|q_b\|)^2}$$

### III-B. Filtro de Mahony

Es un filtro del tipo complementario, su principal objetivo es el mejorar la estimación de la orientación, aplicando un filtro pasa bajas a las estimaciones obtenidas del acelerómetro y magnetómetro, paralelamente aplicando un filtro pasa altas a las estimaciones obtenidas del giroscopio, para al final fusionar estas dos estimaciones y así obtener una estimación más precisa de la orientación.

Este filtro tiene dos parámetros modificables, los cuales son  $K_p$  y  $K_i$ , los cuales son el control integral y el control proporcional respectivamente. De igual forma que con otro tipo de filtros de la misma índole, este se basa en una representación en forma de cuaterniones.



**Figura 6:** Diagrama a bloques del filtro de Mahony

### Implementación

Para este proyecto, el filtro se aplicó para obtener una mejor estimación sobre la orientación del lactante, el filtro fue implementado de la siguiente manera:

1. Se normalizan los vectores con las estimaciones del acelerómetro y magnetómetro obtenidas en la iteración actual:

$$\vec{a}_k = [a_{x,k}, a_{y,k}, a_{z,k}] \quad (1)$$

$$\hat{\vec{a}}_k = \frac{\vec{a}_k}{\|\vec{a}_k\|} \quad (2)$$

$$\vec{m}_k = [m_{x,k}, m_{y,k}, m_{z,k}] \quad (3)$$

$$\hat{\vec{m}}_k = \frac{\vec{m}_k}{\|\vec{m}_k\|} \quad (4)$$

2. Se establece la referencia a la dirección del campo magnético terrestre, utilizando las estimaciones del magnetómetro y los valores del cuaternion calculado en la iteración anterior:

$$\vec{h} = \begin{bmatrix} 2[(m_x, k)(\frac{1}{2} - q_3^2 - q_4^2) + (m_y, k)(q_2q_3 - q_1q_4) + (m_z, k)(q_2q_3 + q_1q_4)] \\ 2[(m_x, k)(q_2q_3 + q_1q_4) + (m_y, k)(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_4^2) + (m_z, k)(q_3q_4 - q_1q_2)] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} \sqrt{(h_x)^2 + (h_y)^2} \\ 0 \\ 2[(m_x, k)(q_2q_4 - q_1q_3) + (m_y, k)(q_3q_4 - q_1q_2) + (m_z, k)(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2)] \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. Se estima la dirección del campo gravitacional  $\vec{v}$  y campo magnético  $\vec{w}$  con referencia al IMU, utilizando la referencia calculada en el paso anterior y los valores del cuaternion calculados en la iteración anterior:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} 2(q_2q_4 - q_1q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_3q_4) \\ q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\vec{w} = \begin{bmatrix} 2[(b_x)(\frac{1}{2} - q_3^2 - q_4^2) + (b_z)(q_2q_4 - q_1q_3)] \\ 2[(b_x)(q_2q_3 - q_1q_4) + (b_z)(q_1q_2 + q_3q_4)] \\ 2[(b_x)(q_1q_3 + q_2q_4) + (b_z)(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2)] \end{bmatrix} \quad (8)$$

4. Se calcula el error  $\vec{e}$ , como la suma de los productos cruz entre las direcciones de referencia y las medidas, tanto del campo gravitatorio como del magnético:

$$\vec{e} = (\vec{a}_k \times \vec{v}) + (\vec{m}_k \times \vec{w}) \quad (9)$$

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} (a_{y,k}v_z - a_{z,k}v_y) + (m_{y,k}w_z - m_{x,k}v_y) \\ (a_{z,k}v_x - a_{x,k}v_z) + (m_{z,k}w_x - m_{z,k}v_z) \\ (a_{x,k}v_y - a_{y,k}v_x) + (m_{x,k}w_y - m_{y,k}v_x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

5. Se calcula el error de la iteración actual con el valor de error calculado en el paso anterior multiplicado por un diferencial del tiempo más lo ya acumulado de iteraciones pasadas:

$$E_k = E_{k-1} + e\Delta t \quad (11)$$

6. Se calcula el vector de velocidad angular corregido con las mediciones recabadas por el giroscopio, el error calculado en los dos pasos anteriores y los valores de las ganancias tanto proporcional  $K_p$  como integral  $K_i$ :

$$\vec{w}_k = \vec{w}_{k-1} + K_p e + K_i E_k \quad (12)$$

7. El vector de velocidad angular corregido es utilizado en conjunto con el cuaternion de la iteración anterior para

calcular la tasa de cambio o derivada del cuaternion de orientación actual:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q_{k-1} \otimes \vec{w}_k \quad (13)$$

$$\dot{q} = \frac{1}{2} [q_1, q_2, q_3, q_4] \otimes [0, w_{x,k}, w_{y,k}, w_{z,k}] \quad (14)$$

Donde el carácter  $\otimes$  indica una multiplicación entre cuaterniones, quedando de la siguiente forma:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-q_2w_{x,k} - q_3w_{y,k} - q_4w_{z,k}) \\ \frac{1}{2}(q_1w_{x,k} + q_3w_{z,k} - q_4w_{y,k}) \\ \frac{1}{2}(q_1w_{y,k} - q_2w_{z,k} + q_4w_{x,k}) \\ \frac{1}{2}(q_1w_{z,k} + q_2w_{y,k} - q_3w_{x,k}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

8. El resultado del paso anterior se integra de la siguiente manera para así obtener el cuaternion de orientación de la iteración actual:

$$q_k = q_{k-1} + \dot{q}\Delta t \quad (16)$$

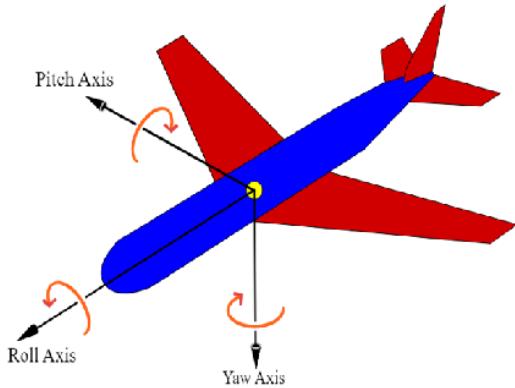
9. Finalmente, se normaliza (este se normaliza como si se tratase de un vector) y obtenemos la estimación de la orientación en términos de cuaterniones:

$$\hat{q}_k = \frac{q_k}{\|q_k\|} \quad (17)$$

$$\hat{q}_k = \frac{q_1, q_2, q_3, q_4}{\sqrt{(q_1)^2 + (q_2)^2 + (q_3)^2 + (q_4)^2}} \quad (18)$$

### III-C. Ángulos de Tait-Bryan

Además de la representación por cuaterniones, se tiene como alternativa los ángulos de Tait-Bryan para poder representar la orientación, mediante funciones trigonométricas y utilizando el resultado entregado por la ecuación 18 se puede obtener la inclinación en los ejes x, y, z, los cuales se conocen como **Roll** ( $\phi$ ), **Pitch** ( $\theta$ ), y **Yaw** ( $\psi$ ) respectivamente.



**Figura 7:** Representación de la orientación de un objeto mediante los ángulos de Tait-Bryan

Las formulas para calcular estos ángulos son las siguientes:

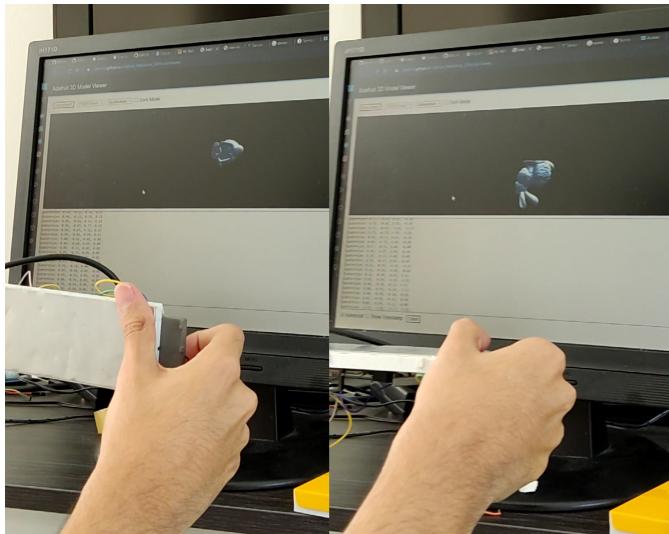
$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{q_1 q_2 + q_3 q_4}{\frac{1}{2} - (q_2^2 + q_3^2)}\right) \\ \arcsin(2(q_1 q_3 - q_2 q_4)) \\ \arctan\left(\frac{q_1 q_4 + q_2 q_3}{\frac{1}{2} - (q_3^2 + q_4^2)}\right) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Para el presente proyecto, se hicieron pruebas con ambos tipos de representación para la orientación, donde se optó por la del cuaternión, debido a que tiene menos limitantes que la de angulos de Tait-Bryan.

#### IV. EXPERIMENTACIÓN

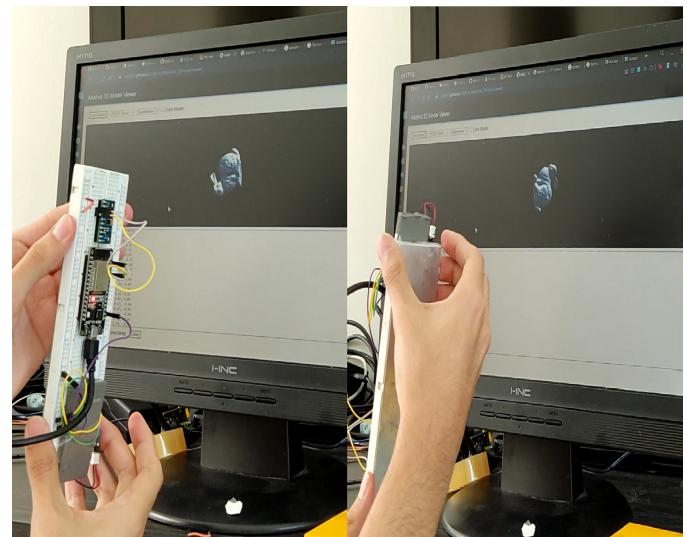
##### IV-A. Pruebas con filtro de Mahony y MPU-9250

A continuación se muestran algunas de las pruebas que se hicieron usando en conjunto el MPU-9250 y el filtro de Mahony. Donde con el MPU-9250 obtendremos mediciones de sus 3 sensores internos, acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, las fusionaremos y usaremos el filtro de Mahony que implementamos para así poder obtener la orientación actual del bebé.



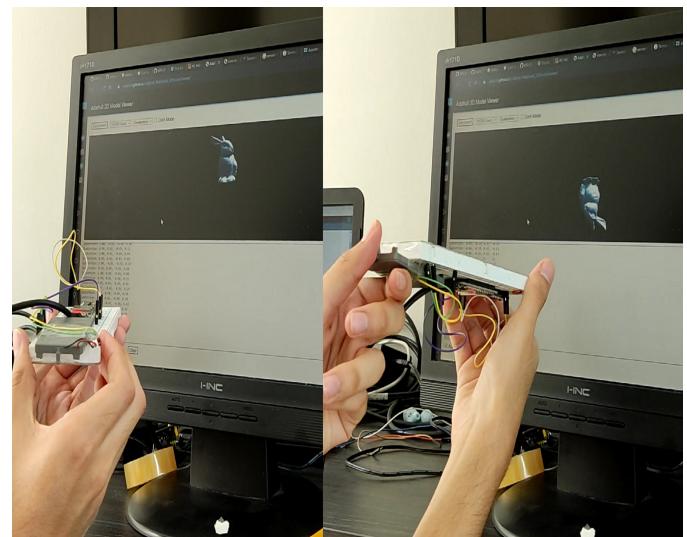
**Figura 8:** Prueba de orientación en el eje-Y utilizando el MPU-9250 y el filtro Mahony

En la figura 8 se muestra el circuito en un ángulo de 90 y 180 grados en el eje Y, simulando que el bebé está acostado de lado y boca abajo respectivamente, las cuales son posiciones peligrosas para el bebé, especialmente la segunda.



**Figura 9:** Prueba de orientación en el eje-X utilizando el MPU-9250 y el filtro Mahony

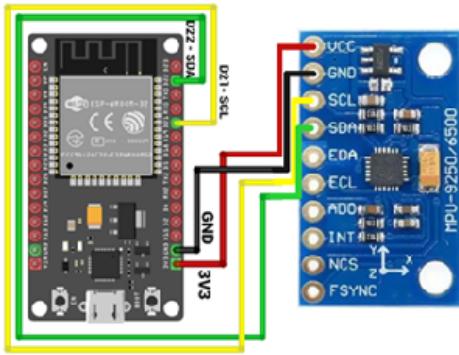
En la figura 9 se muestra el circuito en un ángulo de 90 y -90 grados en el eje X, simulando que el bebé está sentado.



**Figura 10:** Prueba de orientación en el eje-Z utilizando el MPU-9250 y el filtro Mahony

En la figura 10 se muestra el circuito viendo hacia arriba y hacia abajo, con diferentes rotaciones en el eje y, simulando que el bebé ha girado sobre su propio eje estando boca arriba (posición supina) y boca abajo (posición prona), donde estas dos situaciones son peligrosas, especialmente la segunda.

#### Diagrama de conexión para el circuito



**Figura 11:** Representacion de la orientación de un objeto mediante los ángulos de Tait-Bryan

### Código prueba

```
#include "Wire.h"
#include "libs/Mahony.cpp"
#include "libs/I2Cdev.cpp"
#include "libs/MPU9250.cpp"

#define KP 32.5
#define KI 3.0
#define gscale (250.0/32768.0)*(PI/180.0) //Escala
    para el giroscopio
//#define QUATERNIONS 1

MPU9250 accelgyro;
Mahony mahony(KP, KI);
I2Cdev I2C_M;

//Offsets y matrices de corrección
float A_B[3] { 150.42, 94.82, -725.65};
float A_Ainv[3][3] {
{ 0.06220, -0.00141, -0.00018},
{ -0.00141, 0.06138, -0.00048},
{ -0.00018, -0.00048, 0.05994}
};

float M_B[3] { 6.36, 25.27, -69.48};
float M_Ainv[3][3] {
{ 1.75453, -0.09176, 0.03732},
{ -0.09176, 1.85748, 0.09509},
{ 0.03732, 0.09509, 1.94828}
};

float G_off[3] = { -42.3, -2.1, 23.6};

int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;
int16_t mx, my, mz;
float Axyz[3];
float Gxyz[3];
float Mxyz[3];

unsigned long now = 0, last = 0;
float dT = 0;
unsigned long now_ms, last_ms = 0;
unsigned long print_ms = 70;

bool initial = true;
float initialYaw;
int count = 0;

void setup() {
Wire.begin();
Wire.setClock(400000);

Serial.begin(115200);
while (!Serial);

accelgyro.initialize();
Serial.println(accelgyro.testConnection() ? "MPU9250 OK" : "MPU9250 ??");

void loop() {
float rollPitchYaw[3];
float q[4];

getMPUScaled();
now = micros();
dT = (now - last) * 1.0e-6;
last = now;

//Los ejes x & y del magnetómetro están invertidos
//con respecto al acelerómetro y giroscopio
mahony.MahonyQuaternionUpdate(Axyz[1], Axyz[0],
Axyz[2], Gxyz[1], Gxyz[0], Gxyz[2],
Mxyz[0], Mxyz[1], -
Mxyz[2], dT);

//Obtenemos los valores de los ángulos
mahony.getRollPitchYaw(rollPitchYaw);

//Conversion de radianes a grados
rollPitchYaw[2] *= 180.0 / PI;
rollPitchYaw[1] *= 180.0 / PI;
rollPitchYaw[0] *= 180.0 / PI;

rollPitchYaw[2] = -rollPitchYaw[2] - 5.8;
if (rollPitchYaw[2] < 0) rollPitchYaw[2] += 360.0;
if (rollPitchYaw[2] > 360.0) rollPitchYaw[2] -=
360.0;

now_ms = millis();
if (now_ms - last_ms >= print_ms) {
last_ms = now_ms;
count++;

#ifdef QUATERNIONS
//Imprimir salida en formato de cuaternion
mahony.getQuaternion(q);
Serial.print("Quaternion: ");
Serial.print(q[0]);
Serial.print(", ");
Serial.print(q[1]);
Serial.print(", ");
Serial.print(q[2]);
Serial.print(", ");
Serial.println(q[3]);
#else
//Imprimir salida en formato de ángulos Tait-
Bryan
Serial.println(initialYaw);
Serial.print("Orientation: ");
Serial.print(rollPitchYaw[2]);
Serial.print(", ");
Serial.print(rollPitchYaw[1]);
Serial.print(", ");
Serial.print(rollPitchYaw[0]);
#endif
}

void getMPUScaled(void) {
//Aquí se aplican los offsets y valores de la
//matriz de corrección obtenidos
float temp[3];

accelgyro.getMotion9(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz,
```

```

&mx, &my, &mz);

Gxyz[0] = ((float) gx - G_off[0]) * gscale;
Gxyz[1] = ((float) gy - G_off[1]) * gscale;
Gxyz[2] = ((float) gz - G_off[2]) * gscale;

Axyz[0] = (float) ax;
Axyz[1] = (float) ay;
Axyz[2] = (float) az;

for (int i = 0; i < 3; i++) temp[i] = (Axyz[i] -
    A_B[i]);
Axyz[0] = A_Ainv[0][0] * temp[0] + A_Ainv[0][1] *
    temp[1] + A_Ainv[0][2] * temp[2];
Axyz[1] = A_Ainv[1][0] * temp[0] + A_Ainv[1][1] *
    temp[1] + A_Ainv[1][2] * temp[2];
Axyz[2] = A_Ainv[2][0] * temp[0] + A_Ainv[2][1] *
    temp[1] + A_Ainv[2][2] * temp[2];
vectorNormalize(Axyz);

Mxyz[0] = (float) mx;
Mxyz[1] = (float) my;
Mxyz[2] = (float) mz;

for (int i = 0; i < 3; i++) temp[i] = (Mxyz[i] -
    M_B[i]);
Mxyz[0] = M_Ainv[0][0] * temp[0] + M_Ainv[0][1] *
    temp[1] + M_Ainv[0][2] * temp[2];
Mxyz[1] = M_Ainv[1][0] * temp[0] + M_Ainv[1][1] *
    temp[1] + M_Ainv[1][2] * temp[2];
Mxyz[2] = M_Ainv[2][0] * temp[0] + M_Ainv[2][1] *
    temp[1] + M_Ainv[2][2] * temp[2];
vectorNormalize(Mxyz);
}

void vectorNormalize(float a[3]) {
    float magnitude = sqrt(vectorDot(a, a));
    a[0] /= magnitude;
    a[1] /= magnitude;
    a[2] /= magnitude;
}

```

#### IV-B. Pruebas con sensor de temperatura MLX90614

A continuacion se muestran algunas de las pruebas que se hicieron con el sensor de temperatura MLX90614. Donde este sensor fue utilizado para medir la temperatura de una manera no evasiva al bebé, logrando esto al medirla a distancia de manera infrarroja.

Ambiente	Objeto
28.25°C	29.09°C
28.29°C	29.71°C
28.27°C	30.17°C
28.29°C	30.53°C
28.27°C	30.57°C
28.31°C	30.15°C
28.29°C	29.99°C
28.29°C	29.77°C
28.27°C	29.77°C
28.29°C	29.63°C
28.27°C	29.43°C
28.31°C	29.39°C
28.31°C	29.59°C
28.31°C	29.55°C

Figura 12: Prueba de medición de temperatura de un objeto y del ambiente con el MLX90614

Como se observa en la figura 12 sobre el monitor serial, el sensor puede obtener la temperatura del ambiente y el objeto, que en este caso será el bebé. Además es importante aclarar que el sensor viene calibrado de fabrica en un amplio rango

de temperaturas de -40 a 85 °C para la temperatura ambiente y -70 a 382.2 °C para la temperatura del objeto.

#### Diagrama de conexión para el circuito

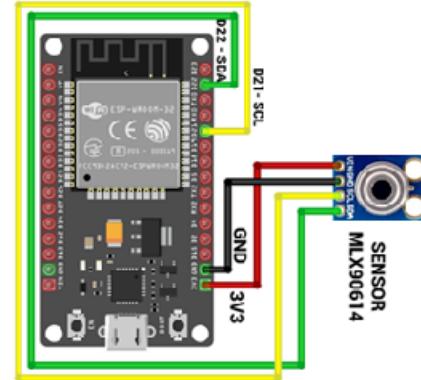


Figura 13: Representacion de la orientación de un objeto mediante los ángulos de Tait-Bryan

#### Código prueba

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h>
Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

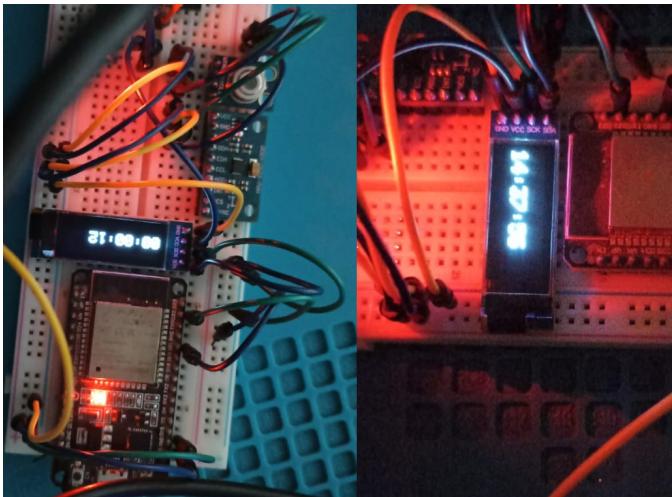
void setup(){
    Serial.begin(9600);
    mlx.begin();
}

void loop(){
    Serial.print("Ambiente = ");
    Serial.print(mlx.readAmbientTempC());
    Serial.print(" C\tObjecto = ");
    Serial.print(mlx.readObjectTempC());
    Serial.println("C");
    delay(500);
}

```

#### IV-C. Duración de batería Li-Po

Las pruebas de duración fueron realizadas con el sensor de temperatura y el MPU conectados y obteniendo mediciones RAW constantemente de ellos, con la batería que compramos se logró una autonomía de 15 horas sin necesidad de realizar alguna optimización en el código para reducir consumo, esto nos da pauta bastante buena, ya que después de la optimización se podrán conseguir mejores tiempos.



**Figura 14:** Dos instantes de tiempo donde la batería aun tenía carga

En la figura 14 se puede ver como la batería tuvo una muy buena duración aun incluso sin tener optimizaciones el código

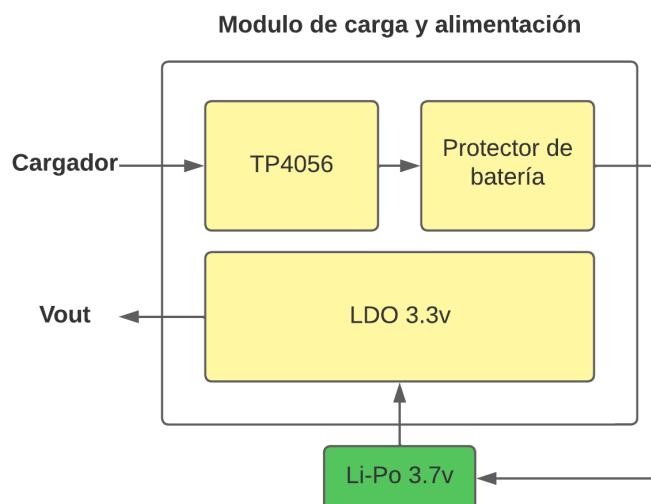
## V. SISTEMA OPERATIVO

## VI. APPLICACIÓN

## VII. CONSTRUCCIÓN

#### VII-A. *Modulo de carga y alimentación*

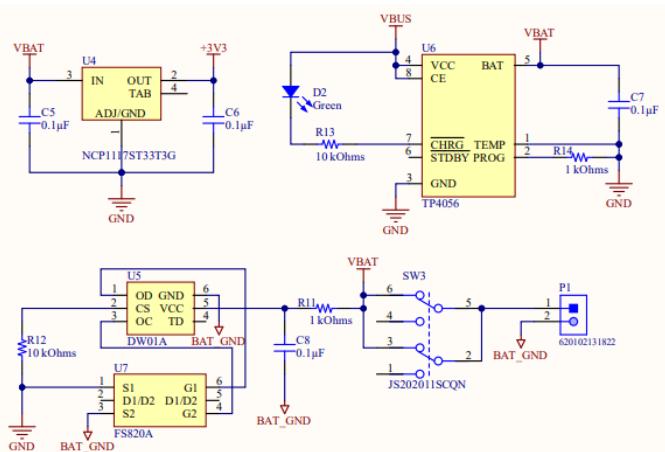
Dentro del sistema es critico el constante monitoreo de las variables de orientación, temperatura y respiración del bebé, para ello se utilizó una pila Li-Po para mantener alimentado el sistema. Al no poderse utilizar únicamente la batería de forma directa, se diseño el siguiente modulo de carga y alimentación, el cual esta construido por 3 partes:



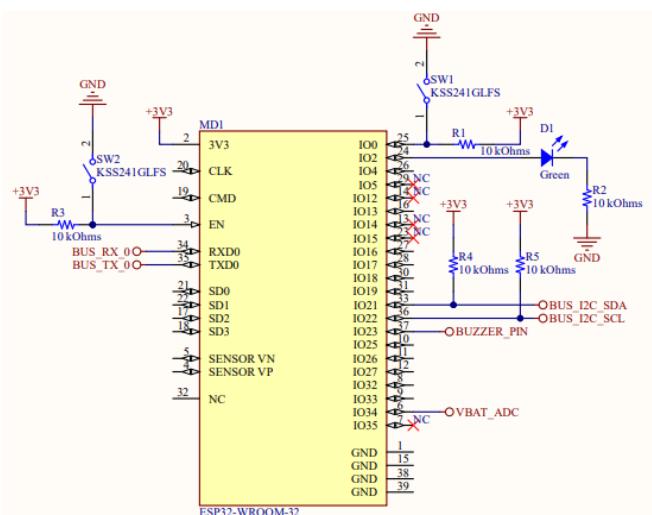
**Figura 15:** Partes que conforman el modulo de carga y alimentación

### VII-B. Diseño PCB

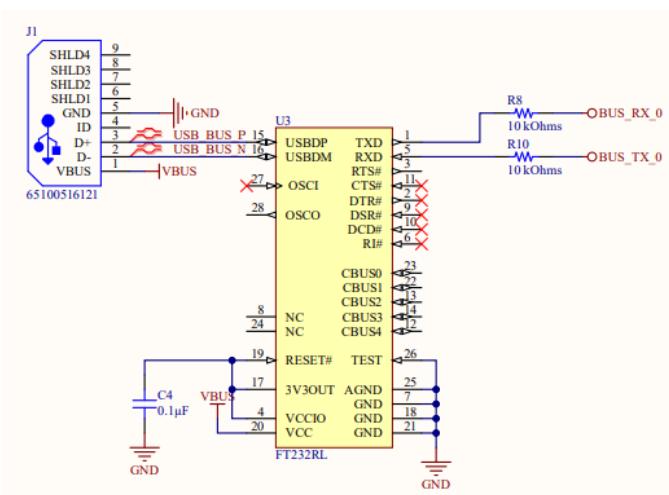
### VII-B1. Esquematicos:



**Figura 16:** Esquematicos del modulo de carga y alimentación



**Figura 17:** Esquematico del ESP32-WROOM



**Figura 18:** Esquematico del FT232RL

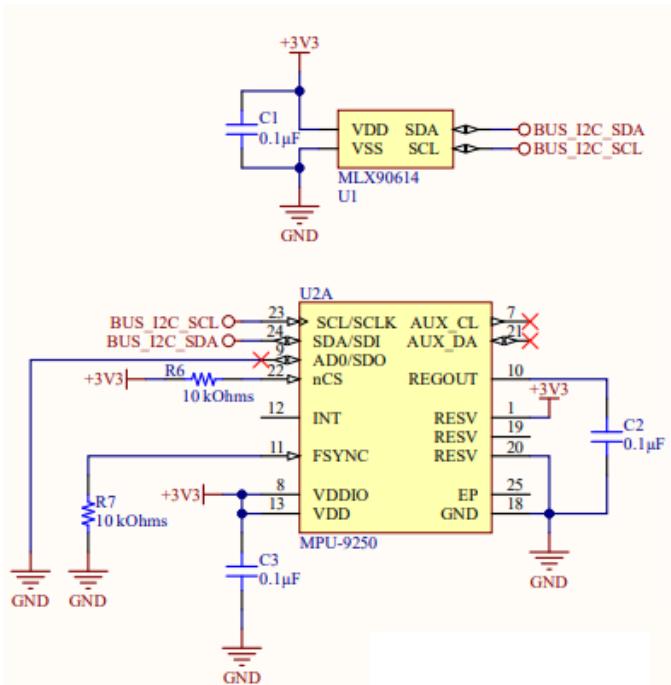


Figura 19: Esquematicos de los sensores

*VII-B2. Layout:* Al diseñar los diagramas esquematicos y realizando las pruebas pertinentes se decidió realizar una única pcb la cual sería manejera pequeña y que no representara problemas o incomodidad por su tamaño, forma y carcasa al bebé.

A continuación se muestra el layout final de la primera versión:

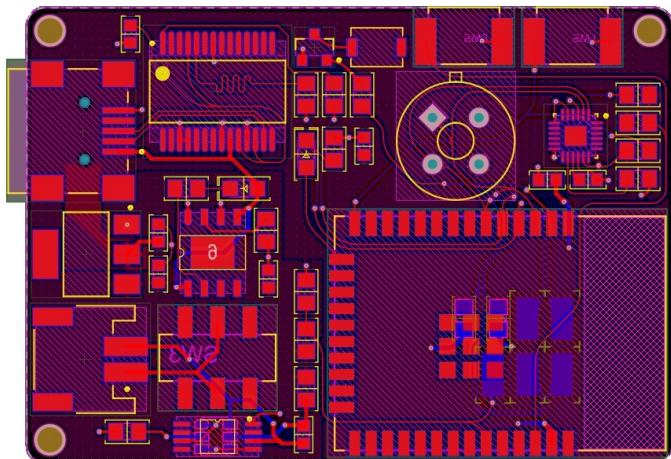


Figura 20: Layout del PCB

*VII-B3. PCB 3D:*

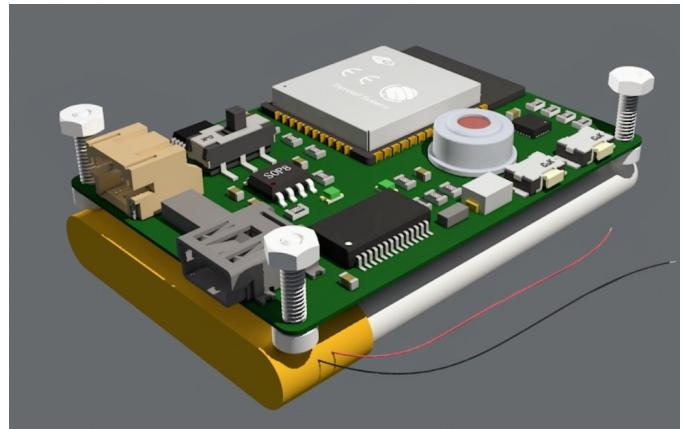


Figura 21: Vista isométrica del PCB y la batería

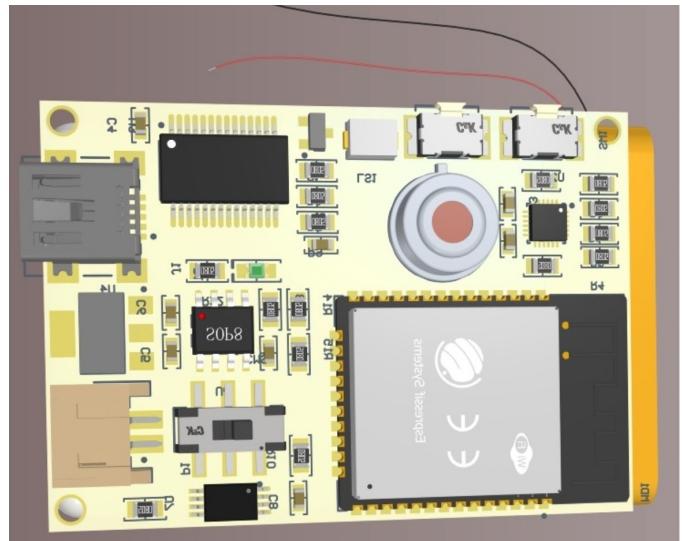
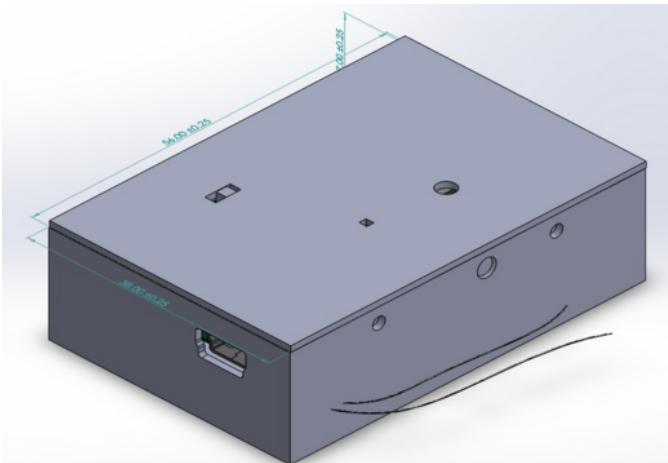


Figura 22: Vista superior del PCB

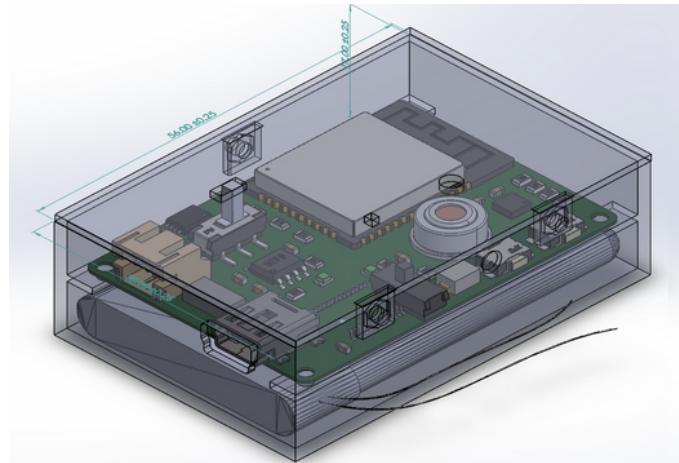
En las figuras 21 y 22 se muestra el modelo 3D, este fue hecho para poder corroborar de que tamaño quedaría el dispositivo final contando la PCB y la batería.

Tanto el modelo 3D como el layout de la PCB fue diseñado en el software Altium.

*VII-C. Diseño de Carcasa*



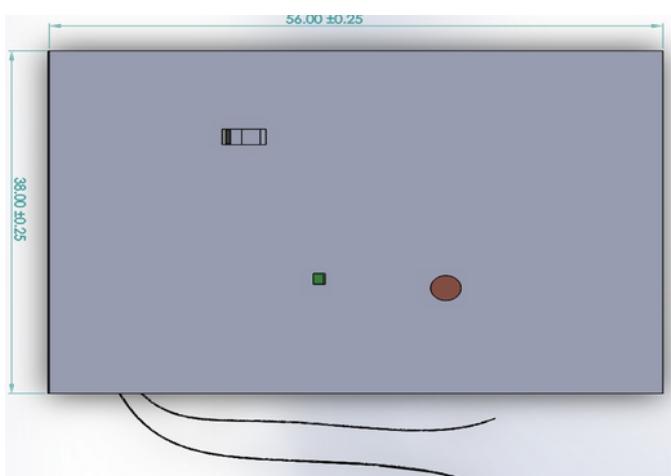
**Figura 23:** Vista isometrica de la carcasa



**Figura 26:** Vista isometrica de la carcasa con la PCB y bateria dentro



**Figura 24:** Vista de la parte frontal de la carcasa, donde esta el puerto USB



**Figura 25:** Vista superior de la carcasa

En las figuras 23, 24, 25 y 26, se puede ver el diseño propuesto para la carcasa del sistema, donde esta tendrá las siguientes aberturas:

- Switch encendido/apagado
- Puerto de carga Micro-USB tipo-B
- Salida para el sonido del buzzer
- Led infrarrojo del sensor de temperatura

#### REFERENCIAS

- [1] Munkel Ramírez, Laura, Durón González, Rodrigo, Bolaños Moreira, Pamela. (2018). Síndrome de muerte súbita del lactante. Medicina Legal de Costa Rica, 35(1), 65-74. Retrieved February 28, 2022, from [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1409-00152018000100065&lng=en&tlang=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152018000100065&lng=en&tlang=es).
- [2] Kinney, H. C., Thach, B. T. (2009). The sudden infant death syndrome. The New England journal of medicine, 361(8), 795-805. <https://doi.org/10.1056/NEJMra0803836>

#### SIGLAS

IoT Internet of things. 2

SMSILSíndrome de muerte subita inesperada del lactante.

1

SMSL Síndrome de muerte subita del lactante. 1, 2