



UNIVERSIDAD DE CHILE

MANUAL
“DOCUMENTACIÓN FOTÓMETRO”

SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2016

Índice

| | |
|---|-----------|
| 11 Antecedentes | 1 |
| 1.1. Aerosoles | 1 |
| 1.2. LEDs como fotodiodos | 2 |
| 1.3. Calculo de espesor óptico de aerosoles (AOT) | 2 |
| 2. Descripción del prototipo | 4 |
| 2.1. Funcionamiento | 7 |
| 2.2. Sistemas | 8 |
| 2.2.1. Componentes electrónicos | 8 |
| 2.2.2. Componentes estructurales | 27 |
| 3. Notas para la construcción del prototipo | 31 |
| 3.1. Componentes Electrónicos | 31 |
| 3.1.1. Pasos para poner componentes en pines | 31 |
| 3.1.2. Como soldar | 32 |
| 3.1.3. Conexiones | 33 |
| 3.2. Carcasa externa | 35 |
| 3.3. Ensamblaje | 39 |
| 4. Extracción de datos | 49 |
| 5. Calibración | 49 |
| 5.1. Langley-Plot | 49 |
| 5.2. Corrección con instrumento patrón | 50 |
| 6. Costos | 53 |
| Referencias | 55 |
| Anexos | 56 |
| Anexo A. Materiales prototipo. | 56 |

1. Antecedentes

1.1. Aerosoles

Los aerosoles son moléculas o partículas sólidas y/o líquidas suspendidas en la atmósfera que dispersan y absorben la luz solar, incidiendo en la intensidad de la radiación que es percibida en la superficie terrestre. El efecto de la dispersión y absorción en la radiación directa, puede calcularse teóricamente en función de la longitud de onda. La reducción en la radiación directa se describe a través del espesor óptico, a mayor dispersión y absorción, mayor es el valor del espesor óptico [1]. La contribución de la dispersión y absorción en la reducción de la radiación directa es linealmente proporcional a: (1) la intensidad de la radiación en el punto a lo largo del rayo de luz, (2) la concentración local del aerosol, y (3) la eficiencia de la dispersión y la absorción [2].

La ecuación básica que gobierna la transmisión de la radiación a través de un medio, es conocida como la Ley de Beer (ecuación (1.1)).

$$I_\lambda = I_{o,\lambda} \exp(-\alpha_\lambda m_{air}) \quad (1.1)$$

donde $I_{o,\lambda}$ es la intensidad original de la fuente, I_λ , es la intensidad de radiación luego de pasar a través de la masa de aire relativa m_{air} , y α_λ es el espesor óptico atmosférico total (dispersión molecular y dispersión y absorción por gases y aerosoles), en la longitud de onda λ . La masa de aire relativa define la longitud de la trayectoria óptica directa a través de la atmósfera, expresado como la razón relativa a la longitud de la trayectoria vertical (en el zenit); el valor de la masa de aire relativa se muestra en la ecuación (1.2)

$$m_{air} = \frac{L}{L_0} \approx \frac{1}{\cos(z)} \quad (1.2)$$

donde L la longitud de la trayectoria a través de la atmósfera, L_0 es la longitud zenital de la trayectoria (normal a la superficie de la Tierra) y z es el ángulo zenital.

El espesor óptico total esta compuesto por la dispersión molecular (Rayleigh), la absorción de gases (ozono y vapor de agua), y la dispersión y absorción debido a aerosoles (ecuación (1.3))

$$\alpha_\lambda = \alpha_{\lambda,R} + \alpha_{\lambda,g} + \alpha_{\lambda,a} \quad (1.3)$$

donde la ecuación (1.3) esta escrita para una longitud de onda particular λ . El valor de $\alpha_{\lambda,R}$ (Rayleigh) se puede calcular utilizando modelos de la atmósfera. Una forma de calcular el valor de $\alpha_{\lambda,R}$ viene dado por [3]:

$$\alpha_{\lambda,R} = \frac{p}{p_0} A \lambda^{(-B - C\lambda - D/\lambda)} \quad (1.4)$$

donde (p/p_0) es la razon entre la presión medida en el sitio con la presión atmósferica estándar a nivel del mar y λ es la longitud de onda en micrones. Los parámetros A , B , C , y D se muestran en la tabla 2.1, los cuales entregan el mejor ajuste de los cálculos teóricos.

Tabla 1.1: Coeficientes para el cálculo del espesor óptico de Rayleigh [3].

| Coeficiente | $\lambda \leq 0,500 \mu m$ (500 nm) | $\lambda > 0,500 \mu m$ (500 nm) |
|-------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| A | $6,50362 \times 10^{-3}$ | $8,64627 \times 10^{-3}$ |
| B | 3,55212 | 3,99668 |
| C | 1,35579 | $1,10298 \times 10^{-2}$ |
| D | 0,11563 | $2,71393 \times 10^{-2}$ |

1.2. LEDs como fotodiodos

Un LED que cumple la función de sensor de luz es conocido como fotodiode, el cual se define como un transductor de energía óptica a eléctrica en forma de corriente. Los LED emiten luz al aplicarles un flujo de corriente, debido a que la carga impuesta transporta electrones y huecos. Cuando un electrón se encuentra con un hueco este cae en un nivel de energía bajo liberándola en forma de fotón proporcionando luz.

Al colocar un LED en polarización invertida, se produce el proceso inverso, de manera que al recibir luz y absorber un fotón, se genera un par electrónhueco libre de moverse por el semiconductor bajo un campo eléctrico, produciendo una corriente de salida. Así, un LED puede ser utilizado como fotodiode.

1.3. Calculo de espesor óptico de aerosoles (AOT)

Para estimar el AOT en un LED utilizado como sensor se utiliza la aproximación longitud de onda equivalente descrita en [4], que se puede ver en la ecuación 1.5,

$$\alpha_a = \frac{\ln \left(V_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \right) - \ln (V) - \alpha_R \frac{P}{P_0} \cdot m_{air}}{m_{air}} - \alpha_g \quad (1.5)$$

Sección 1.3 Calculo de espesor óptico de aerosoles (AOT)

donde λ es la longitud de onda de rayo de luz monocromático considerado, V es el voltaje medido por el LED fotodiodo, V_0 es la constante de calibración (representa una estimación de la respuesta del sensor en caso de no haber atmósfera), $(R_0/R)^2$ es la corrección por la distancia Tierra-Sol (Este término compensa el efecto de la variación de la potencia de radiación recibida al variar la distancia del Sol), m_{air} es la masa de aire relativa (Representa el largo de la trayectoria de la luz a través de la atmósfera relativa a una columna vertical), P es el valor de la presión medida en el lugar de medición, P_0 es la presión a nivel del mar, α_R es el espesor óptico de Rayleigh (ROT), α_a es el espesor óptico de aerosoles (AOT), α_g es el espesor óptico debido a gases (GOT), se tiene que el efecto de los gases sobre los LED no es despreciable (debido a la longitud de onda de los LED, los gases tienen un efecto sobre el LED amarillo).

2. Descripción del prototipo

El fotómetro prototipo consiste en un sistema compuesto por sensores LED usados como fotodiodos para medir la luz del Sol. Los LED reciben la luz desde el Sol, la que es medida como un voltaje análogo que es medido utilizando el pin análogo de una placa tipo Arduino (Armaduino). La placa esta conectada a un Data Logger que registra las mediciones de forma acumulativa, la cual es guardada en una tarjeta micro SD.

Los sistemas principales del fotómetro prototipo se muestran en la figura 2.1 (parte externa) y en la figura 2.2 (parte interna), la tabla 2.1 muestra las principales componentes del prototipo divididos en componentes estructurales y componentes eléctricos, en el Anexo A se muestra un detalle de los materiales y componentes necesarios para la construcción del prototipo. La parte externa se divide en lo siguiente:

1. Panel de control (figura 2.1 (a)): interfaz que permite interactuar con el prototipo, a través de los botones se activan las funciones y en la pantalla se muestran los valores de voltaje de las mediciones.
2. Mira solar (figura 2.1 (b)): pestañas perforadas en el centro a un costado del panel de control, se utiliza para posicionar el instrumento con respecto al Sol.
3. Switch (figura 2.1 (c)): botón de encendido/apagado del prototipo.
4. Entrada de luz (figura 2.1 (d)): perforaciones en uno de los extremos del prototipo que permiten la entrada de rayos de luz y son dirigidos hacia los sensores LED.
5. Adaptador para trípode (figura 2.2 (a)): permite instalar el prototipo en un trípode como soporte.

La parte interna del prototipo se divide en lo siguiente:

1. Batería (figura 2.2 (b)): alimentación del prototipo
2. Armaduino (figura 2.2 (c)): versión personalizada de Arduino UNO producida por MCI Electronics Chile, consiste en una placa de circuito impreso con microcontrolador, puertos digitales y analógicos de entrada/salida. Su función principal es medir el voltage análogo del sensor

Sección 2. Descripción del prototipo

3. Data logger (figura 2.2 (c)): dispositivo electrónico para registrar datos en el tiempo.
Se utiliza para guardar la fecha, tiempo y datos de las mediciones.
4. Sensor (figura 2.2 (d)): sensor de aerosoles, que utiliza LED como fotodiodos.

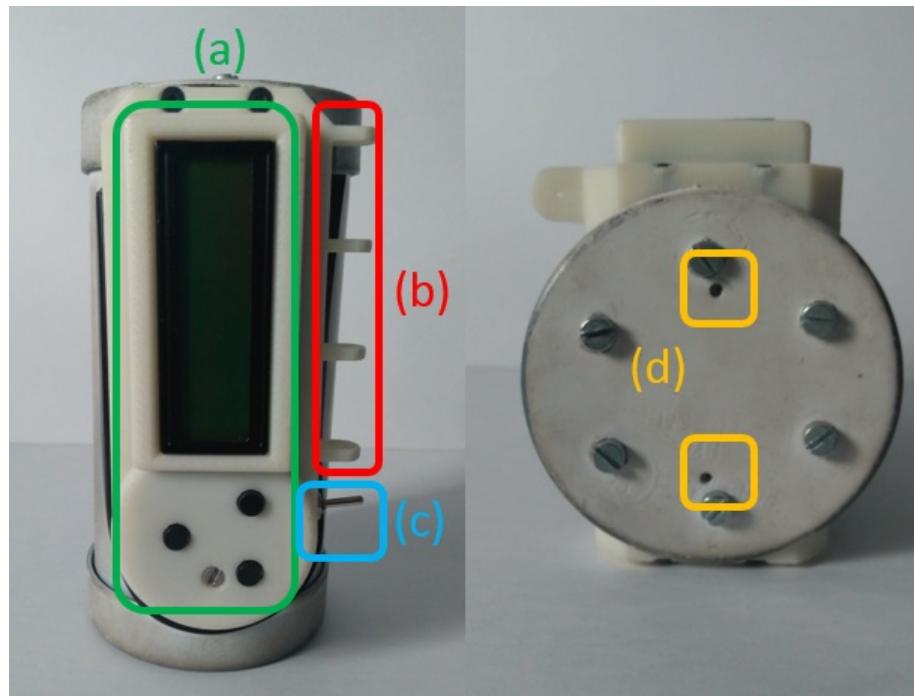


Figura 2.1: Ensamblaje externo del prototipo de fotómetro: (a) Panel de Control, (b) Mira Solar, (c) Switch Encendido/Apagado, (d) Entrada de luz.

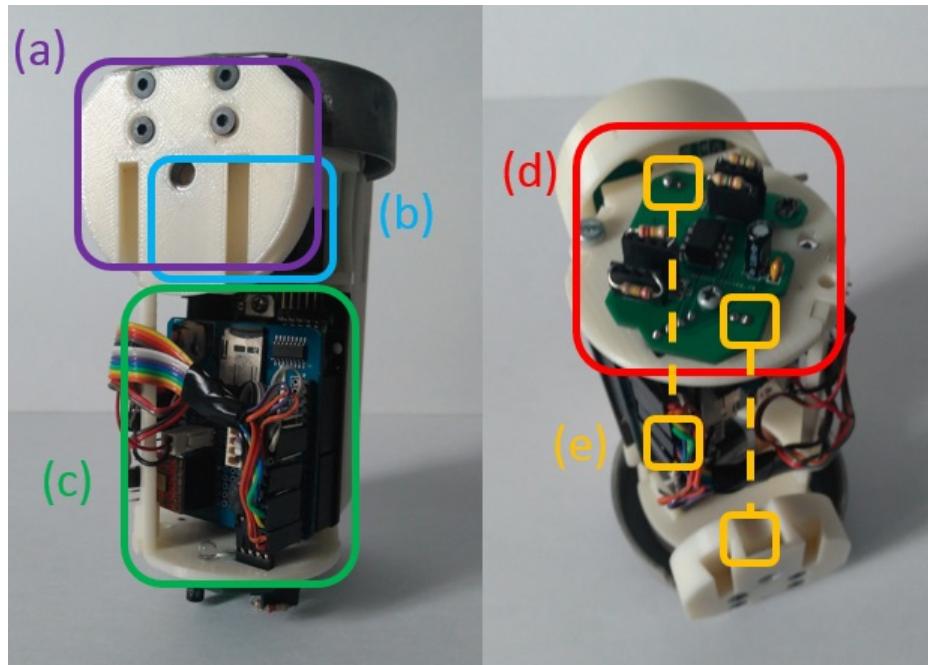


Figura 2.2: Componente externa: (a) Adaptador para trípode y Sistemas internos del prototipo de fotómetro: (b) Batería, (c) Armaduino (versión de Arduino Uno) con Data Logger, (d) Sensor, (e) Posición de LED (superior) y entrada de luz (inferior).

Tabla 2.1: Componentes y materiales principales del prototipo.

| Componentes Estructurales | Material |
|--|----------|
| Panel de Control (estructura) | ABS |
| Mira Solar | ABS |
| Adaptador Trípode | ABS |
| Carcasa externa | PVC |
| Estructura interna | ABS |
| Componentes Eléctricos | |
| PCB Interfaz | |
| Pantalla LCD Interfaz | |
| PCB Sensor | |
| Armaduino (versión personalizada de Arduino Uno) | |
| Data Logger Micro SD | |
| DS1307 Real Time Clock Shield | |
| Sensor de presión y temperatura BMP180 | |
| Sensor LED | |
| Batería 8V | |

2.1. Funcionamiento

El funcionamiento del prototipo se inicia encendiendo el instrumento con el switch. Si el sistema funciona correctamente, se mostrará un mensaje en pantalla quedando en espera a las acciones del usuario. Los botones del panel de control permiten realizar tres acciones: (1) Modo de prueba (botón superior izquierdo), (2) Medición (botón inferior), (3) Extracción de datos (botón superior derecho).

El modo de prueba permite practicar el uso del prototipo para encontrar la posición óptima para realizar la medición, en pantalla se actualiza el valor de voltaje máximo obtenido en cada sensor. La medición realiza un proceso de medidas que dura 14 segundos y registra 400 datos de voltaje por segundo y se guarda el valor máximo de cada sensor en el Data logger, este valor es el que se muestra en pantalla al finalizar el proceso. La extracción de datos permite obtener las mediciones almacenadas en la tarjeta micro SD del Data logger en un archivo .csv. Una vez finalizada la acción realizada con uno de los botones basta presionar otro de los botones para realizar la siguiente acción.

Para realizar una medición se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Encender el fotómetro prototipo.
- Apuntar al sol, con el extremo del prototipo en la que se encuentran las entradas para la luz.
- Mover la posición del prototipo de forma que el rayo de luz que pasa a través de los agujeros en las pestañas de la mira solar pase hasta la última pestaña y se ubique en el centro de ésta.
- Presionar el botón para medir para iniciar la medición, se recomienda mover el instrumento de forma que el rayo de luz en la última pestaña de la mira solar se mueva en torno del centro de ésta.
- Repetir el procedimiento, según el número de mediciones que se quieren realizar (es recomendable realizar mas de una medición en un rango de tiempo para asegurar que se mida el máximo valor en ambos sensores).

Luego de cada proceso medición se recomienda apagar el prototipo (para extender la vida de la batería) y dejar el prototipo cubierto y en la sombra para evitar el desgaste de alguno de los componentes

2.2. Sistemas

2.2.1. Componentes electrónicos

(i) Sensor de Aerosoles

El sensor tiene como objetivo el cuantificar la intensidad de la luz recibida desde el Sol en un rango de longitudes de onda pequeño determinado por los LEDs utilizados para el sensor. Los LEDs generan una corriente de magnitud que se relaciona de manera lineal a la intensidad de luz que reciben dentro de la banda de longitudes de onda del LED.

La corriente generada por el LED es, en general, pequeña (orden de magnitud igual a micro amperes) por lo que se debe utilizar un circuito amplificador que transforme la señal de corriente en una de voltaje que pueda ser medida y registrada.

El circuito amplificador está constituido por un Amplificador Operacional TLC272, el cual es alimentado con 5 [V] desde la placa Aramduino. La señal de salida es un voltaje analógico con magnitud en el rango de 0 a 4.2 [V]. La tensión es transmitida al pin A1 de la tarjeta Aramduino, el cual mide voltajes en un rango entre 0 a 5 [V] con una resolución de 10 bits.

La figura 2.3 muestra las componentes que forman el circuito del sensor. El valor de las resistencias mostradas en la figura 2.3 son referenciales y dependen del tipo de LED utilizado. El valor de las resistencias permite modificar la magnitud de la amplificación siguiendo la siguiente relación:

$$V_{medido} = 2R_1 I_{LED} \quad (2.1)$$

Debido a que el rango de amplificación es acotado, se debe buscar un valor R_1 de manera que el valor máximo a medir no supere los 4.2 [V]. El tener dos resistencia en serie en la retroalimentación permite flexibilizar los valores posibles a utilizar en el circuito.

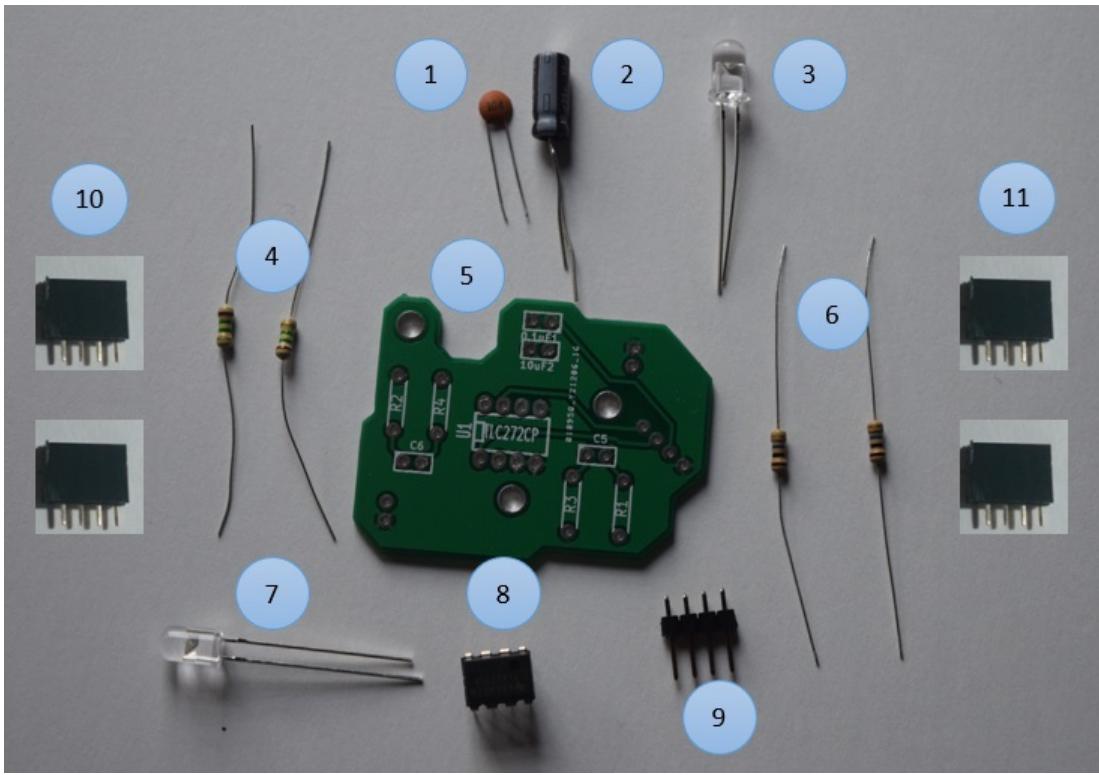


Figura 2.3: Componentes del sensor de aerosoles: (1) Capacitor 0.1 [μF], (2) Capacitor 10 [μF], (3) LED amarillo, (4) Resistencias 1.5 [$\text{M}\Omega$], (5) PCB Sensor, (6) Resistencias 10 [$\text{M}\Omega$], (7) LED Azul, (8) TLC272CP, (9) Pin Header Macho 4x1, (10,11) Pin Header Hembra 4x1.

Los pin header se sueldan a la PCB sensor en las huellas marcadas para las resistencias (R1, R2, R3 y R4) de manera de poner las resistencias sobre los pin header, sin soldar, lo que permite cambiar las resistencias sin desarmar el circuito completo, facilitando la prueba de distintas configuraciones. La figura 2.4 muestra como poner la resistencia en el pin header (antes de soldar los pin header en la placa se deben quitar los pines que se encuentran al medio).

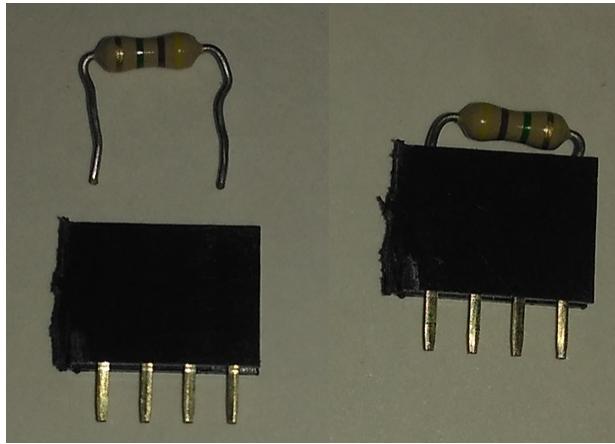


Figura 2.4: Instalación de Resistencia sobre el pin header de 4x1.

Para determinar cuál es la mejor configuración de resistencias se utiliza el siguiente método: medir el voltaje de salida máximo en el medio día solar (con cielos despejados), se recomienda que el valor de R_1 en la ecuación 2.1 sea tal que la magnitud de la señal medida sea un 75 [%] el valor máximo de salida.

La ubicación de las componentes en la PCB Sensor se describe a continuación, utilizando como referencia las huellas de la placa mostrada en la figura 2.5.

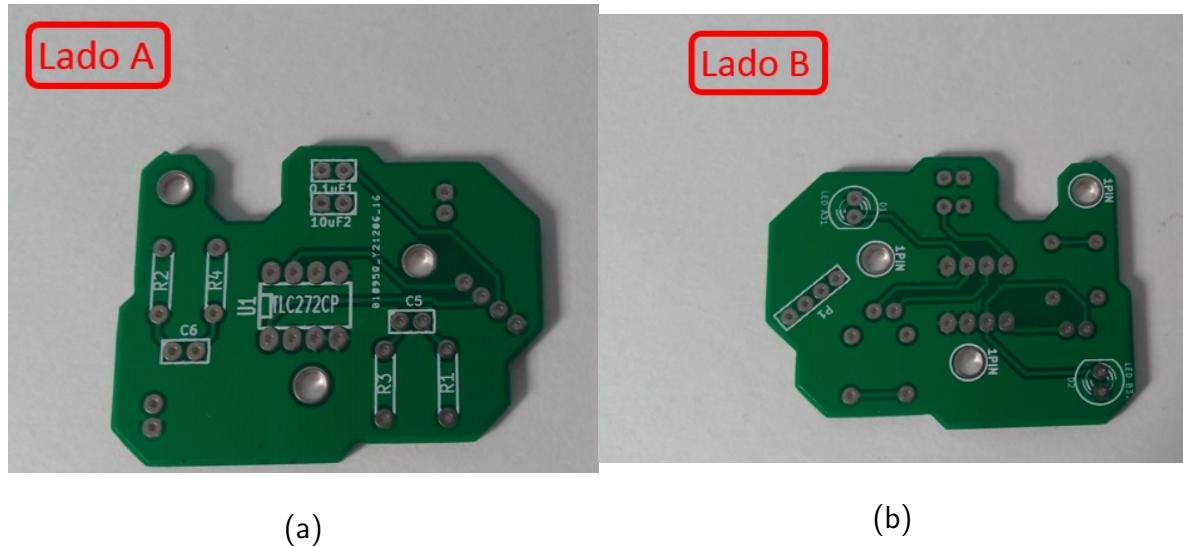


Figura 2.5: PCB Sensor: (a) Lado A y (b) Lado B.

Lado A:

- 0.1uF1: Capacitor 0.1 [μF].
- 10uF2: Capacitor 10 [μF].
- R2 y R4: Pin Header Hembra 4x1 (Resistencias 1.5 [$\text{M}\Omega$]).
- R1 y R3: Pin Header Hembra 4x1 (Resistencias 10 [$\text{M}\Omega$]).
- U1 (TLC272CP): Amplificador operacional TLC272CP.

Lado B:

- LED A31: LED Amarillo.
- LED B31: LED Azul.
- P1: Pin Header Macho 4x1.

La figura 2.6 muestra el sensor de aerosoles armado completamente. Para mas detalles constructivos ver la sección 3 Construcción prototipo.

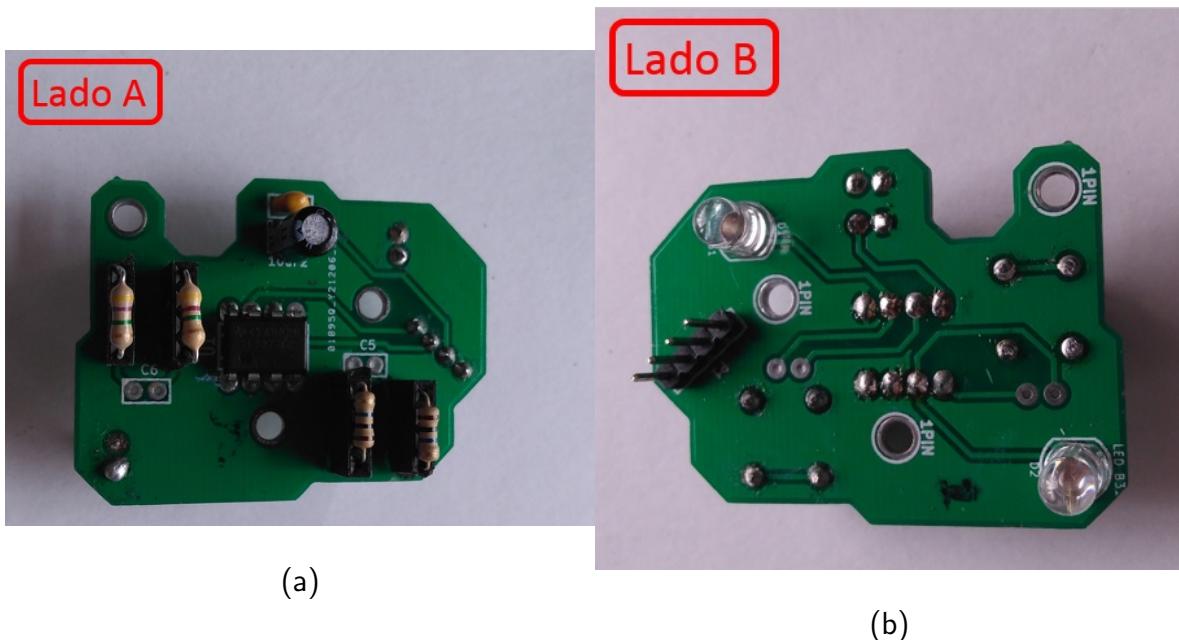


Figura 2.6: Sensor de aerosoles armado: (a) Lado A y (b) Lado B.

(ii) Interfaz Usuario

El sistema de interfaz usuario posee todos los componentes necesarios para que el usuario pueda interactuar con el fotómetro. La figura 2.7 muestra los componentes que forman la interfaz usuario. El switch (figura 2.7 (8)) regula el encendido del Armaduino. Los pulsadores (botones, figura 2.7 (5)) permiten al usuario escoger entre las funciones programadas en el Armaduino (Modo de prueba, Medición, Extracción de datos). La pantalla LCD (figura 2.7 (9)) muestra visualmente lo que esta realizando el prototipo: (1) Modo de prueba: indican el voltaje medido en los sensores, (2) Medición: mensaje "Midiendo" durante la medición y valores máximos de voltaje medido al finalizar, y (3) Extracción de datos: mensaje "Extrayendo datos" durante la operación.

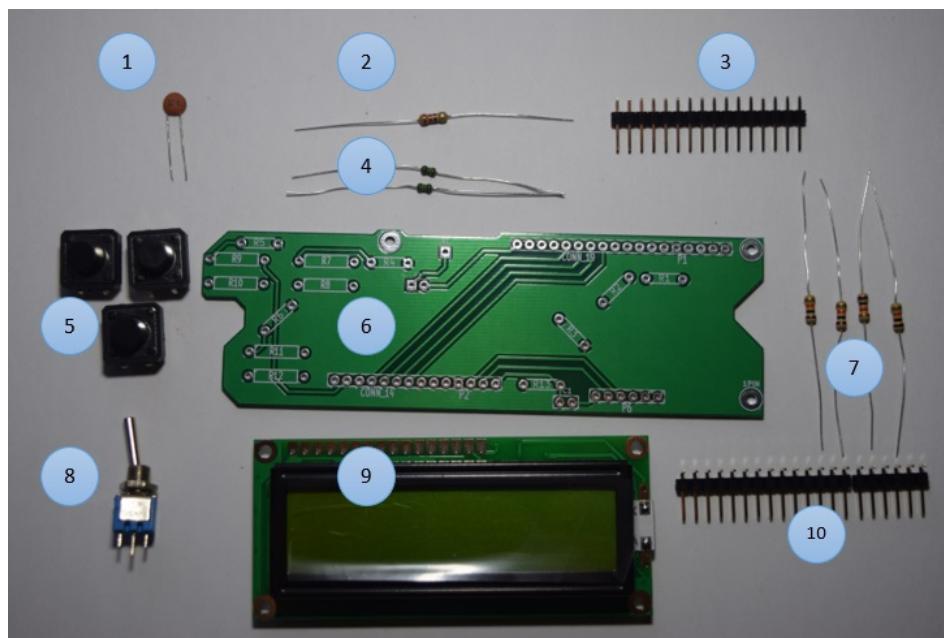


Figura 2.7: Componentes de la interfaz usuario: (1) Capacitor 0.1 [μF], (2) Resistencia 220 [Ω], (3) Pin Header Macho 16x1, (4) Resistencias 1 [$\text{k}\Omega$], (5) Pulsadores, (6) PCB Interfaz, (7) Resistencias 10 [$\text{k}\Omega$], (8) Switch, (9) Pantalla LCD 16x2, (10) Pin Header Macho L 20x1.

Antes de soldar se debe separar el Pin Header Macho L en dos partes: una de 14x1 y la otra de 6x1. La ubicación de las componentes en la PCB Sensor se describe a continuación, utilizando como referencia las huellas de la placa mostrada en la figura 2.8:

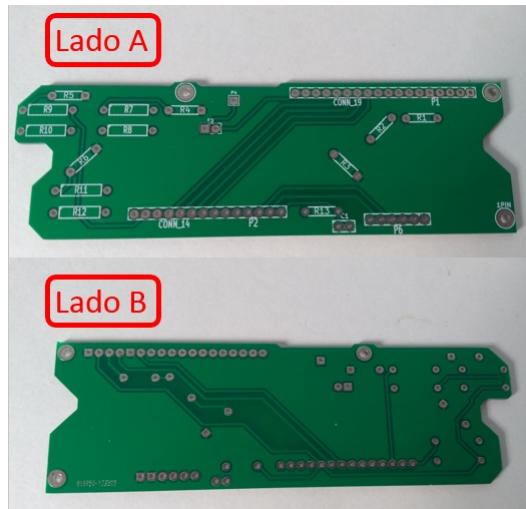


Figura 2.8: Lados de la placa PCB Interfaz: (a) Lado A, (b) Lado B.

Lado A:

- R1 y R2: Resistencia 1 [$k\Omega$].
- R3: Resistencia 220 [Ω].
- R4, R5, R6 y R13: Resistencias 10 [$k\Omega$].
- CONN_14-P2: Pin Header Macho L 14x1.
- P6: Pin Header Macho L 6x1.
- C1: Capacitor 0.1 [μF]

Lado B (Huellas por el Lado A):

- CONN_19-P1: Pin Header Macho 16x1 y sobre este la pantalla LCD 16x2.
- R7-R8: Pulsador.
- R9-R10: Pulsador.
- R11-R12: Pulsador.

La figura 2.9 (a) indica como poner la pantalla LCD sobre los pin headers correspondientes y la figura 2.9 (b) muestra el armaduino armado completamente. Para mas detalles constructivos ver la sección 3 Construcción prototipo.

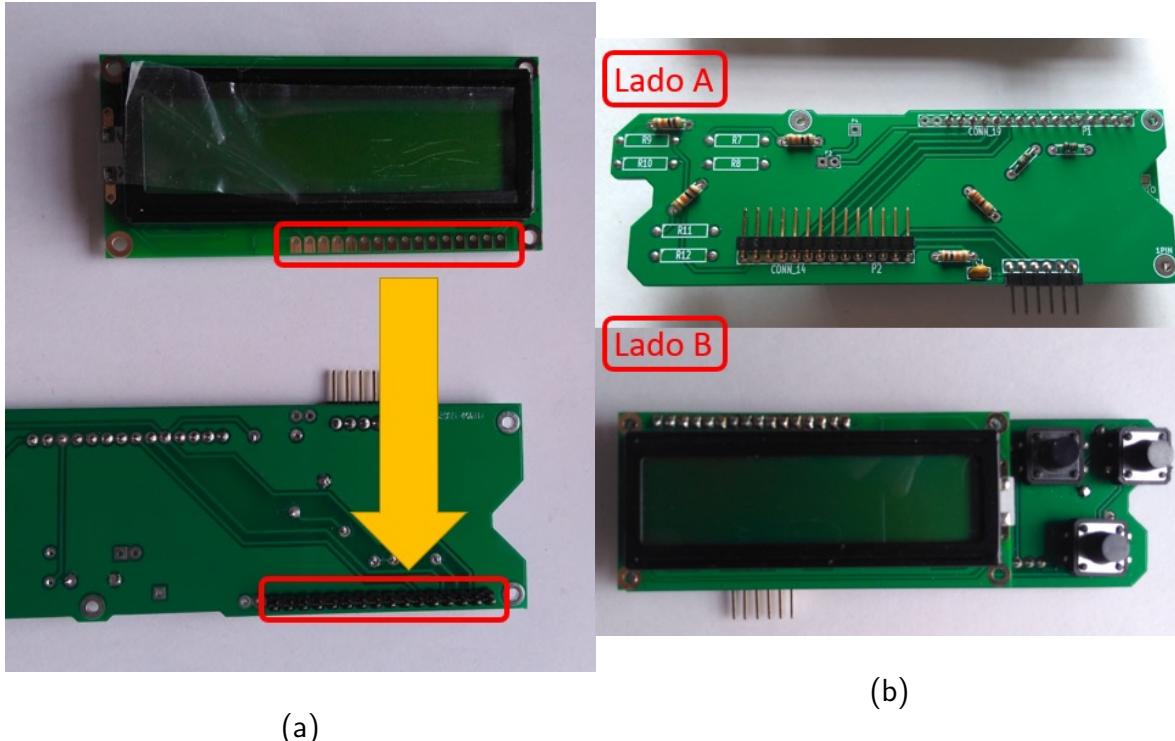


Figura 2.9: Interfaz usuario armado: (a) Pantalla LCD sobre pines, (b) Lado A (arriba) y Lado B (abajo).

(iii) Armaduino y Data Logger

Este sistema se divide en 3 subsistemas: (1) Armaduino, (2) Data Logger, (3) Elementos Data Logger:

(a) Armaduino

Armaduino es una versión personalizada de Arduino Uno producida por Ingeniería MCI Ltda. Armaduino es una placa microcontroladora soportada en ATmega328. Tiene 14 pins digitales input/output, 6 pins de entradas analogas, 5 pins para entrada de energía y posee un conector Jack Power para la entrada de energía que también puede ser entregada a través de una conexión con pin header en L.

Los pines de energía son los siguientes:

- VIN: entrada de voltaje cuando la placa funciona con una fuente de energía externa.
- 5V: suministro de energía regulado usado para dar energía al microcontrolador y otros componentes en la placa.
- 3V3: suministro de voltaje de 3.3 [V] generado por el regulador de la placa.
- GND: pines tierra.

Cada uno de los 14 pines digitales en Armaduino pueden ser usados como entrada o salida usando las funciones disponibles. Estos pines operan en 5 [V] y puede entregar o recibir un máximo de 40 [mA]. Alguno de los pines tienen funciones especializadas:

- Serial (0 (RX) y 1 (TX)): usados para recibir (RX) y transmitir (TX) datos seriales TTL. Estos pines están conectados a los pines correspondientes del ATmega328.
- Interruptores externos (2 y 3): estos pines pueden ser configurados para generar o interrumpir un proceso o cambiar un valor.
- PWM (3, 5, 6, 9, 10 y 11): provee 8-bit PWM de salida con la función correspondiente.
- SPI (10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK)): estos pines permiten comunicación SPI.
- LED (13): en la placa hay un LED incorporado conectado al pin digital 13. Cuando el pin está en un valor alto, el LED se enciende, cuando el pin está en un valor bajo, el LED está apagado.

Los 6 pines análogos de entrada, proveen de una resolución de 10 bits (esto es, 1024 valores distintos). Por defecto estos pines miden desde la tierra hasta 5 [V], siendo posible modificar este rango usando el pin AREF. Alguno de los pines tienen funciones especializadas:

- I^2C (4 (SDA) y 5 (SCL)): permite comunicación I^2C (TWI) usando la Wire library.

Los otros pines en la placa son:

- AREF: voltaje de referencia para las entradas analógicas.

- Reset: permite resetear el microcontrolador. Se usa tipicamente para agregar un botón de reset que bloquee el pin en la placa.

Los componentes del Armaduino se muestran en la figura 2.10. La ubicación de los componentes en la PCB Armaduino (figura 2.10 (15)) se determina fácilmente al leer las huellas de la PCB. Se debe poner atención con la posición de los componentes con polaridad (LEDs, diodo, condensadores electrolíticos y Socket y ATmega328) la cual se muestra en la figura 2.11.

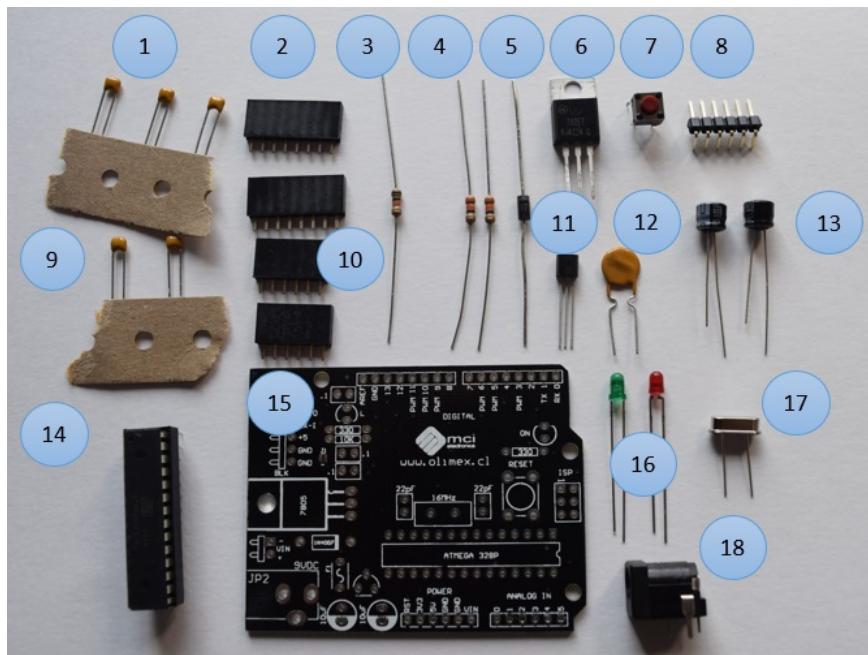


Figura 2.10: Componentes del Armaduino: (1) Condensadores Cerámicos de 0.1 [μF], (2) Pin Headers Hembra 8x1, (3) Resistencia de 10 [$\text{k}\Omega$], (4) Resistencias de 330 [Ω], (5) Diodo, (6) Regulador de 5 [V], (7) Pulsador (Mini Push Button), (8) Pin Header Macho en L, (9) Condensadores Cerámicos de 22 [pF], (10) Pin Headers Hembra 6x1, (11) Regulador de 3.3 [V], (12) Fusible, (13) Condensadores Electrolíticos 10 [μF], (14) ATmega328 y Socket, (15) PCB Armaduino, (16) LEDs Básicos, (17) Cristal 16 [MHz], (18) Conector Jack Power.

Sección 2.2 Sistemas

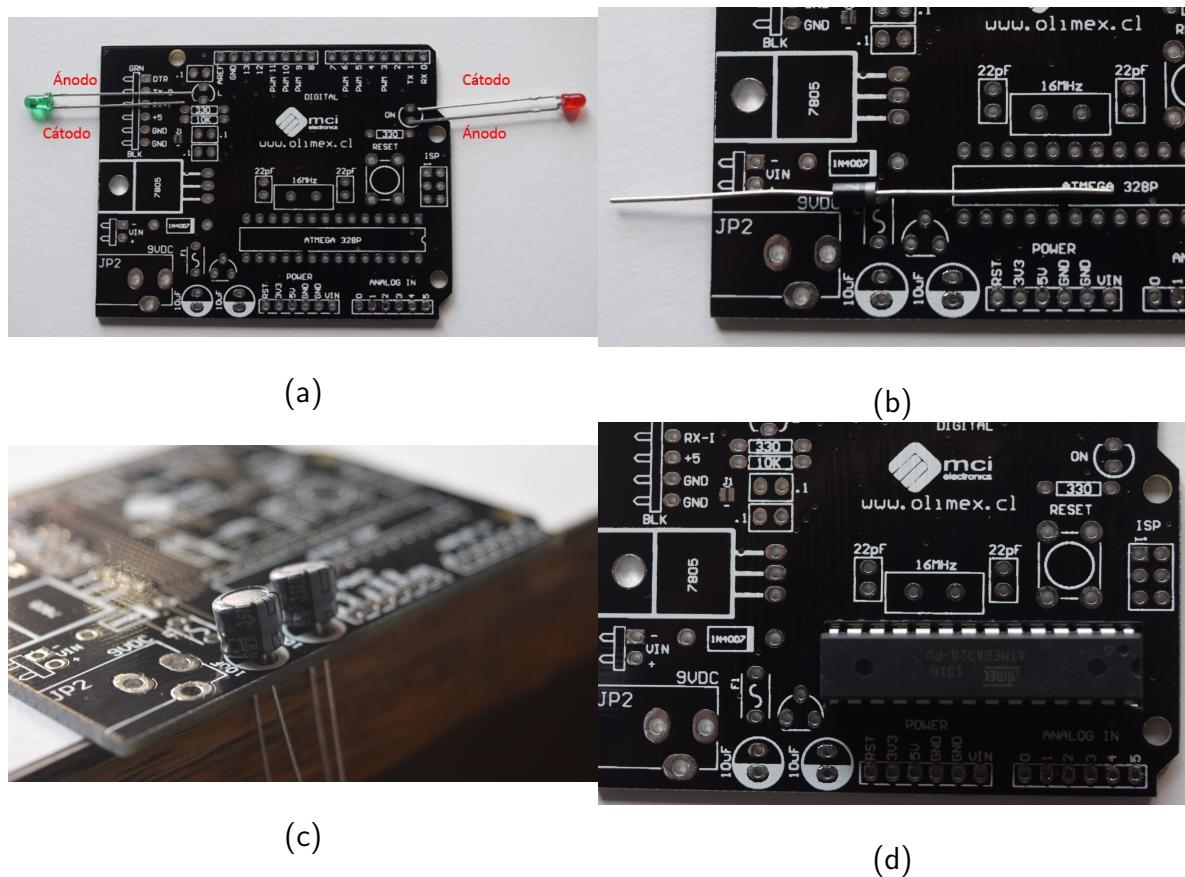


Figura 2.11: Posición de componentes con polaridad: (a) LEDs, (b) Diodo, (c) Condesadores electrolíticos y (d) Socket y Atmega328.

La figura 2.12 muestra el armaduino armado completamente. Para mas detalles constructivos ver la sección 3 Construcción prototipo.



Figura 2.12: Armaduino armado.

(b) Data Logger

El Data Logger es una tarjeta que permite aumentar la memoria del Armaduino con una unidad de almacenamiento masivo (tarjeta microSD). Cuenta con un conector microSD, un botón de Reset y una malla de 13x12 con separación de 0.1" para montaje de componentes through hole. Esta tarjeta viene con un reloj de tiempo real (RTC) incorporado, dándole al Armaduino la capacidad de registrar la fecha y la hora, aún cuando no está conectado a alguna alimentación, gracias al socket portapilas de 12 [mm]. Con ésta tarjeta es sencillo crear un archivo en la tarjeta micro SD y empezar a guardar eventos o valores asociados a una fecha y hora. La Data Logger utiliza los pines digital 6, 8, 11, 12, 13, análogos 4 y 5 y señal de Reset del Armaduino.

La figura 2.13 muestra los componentes del Data Logger. La tarjeta micro SD (figura 2.13 (6)) se utiliza como almacenamiento para la tarjeta y la batería (figura 2.13 (7)) se utiliza para alimentar el reloj de tiempo real de la tarjeta.

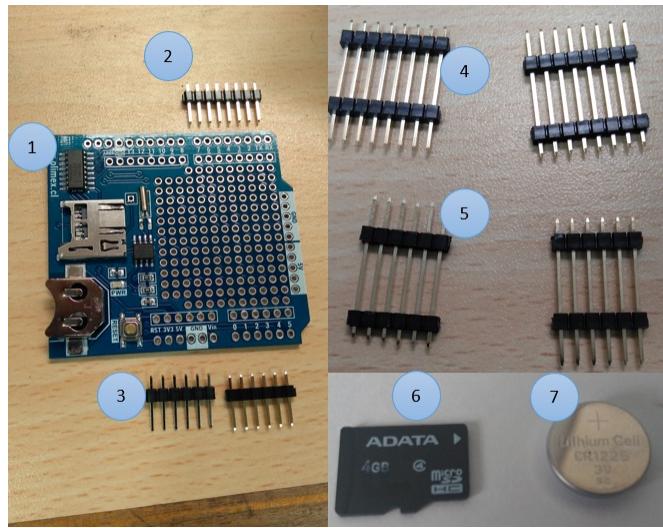


Figura 2.13: Componentes del Data Logger: (1) Tarjeta Data Logger, (2) Pin Header Macho 8x1, (3) Pin Headers Macho 6x1, (4) Pin Headers Macho Doble 8x1, (5) Pin Headers Macho Doble 6x2, (6) Tarjeta microSD, (7) Batería en forma de moneda CR1225 12mm.

La figura 2.14 muestra la ubicación de los pin headers macho en la Tarjeta del Data Logger (figura 2.13 (1)). Los pin headers macho (figura 2.14 (b.1) y (b.2)) se utilizan como soporte de la placa para los elementos Data Logger, que se describen en la sección siguiente. Los pin headers macho dobles (figura 2.14 (a.1) y (a.2)) se utilizan para equivar el data logger sobre el Armaduino, previo a la instalación de los pin headers macho dobles se debe quitar uno de los plásticos de los pines y dejarlo con uno solo, esto se muestra en la figura 2.15, los plásticos extraídos se deben conservar porque serán utilizados para el ensamblaje de componentes tal como muestra la figura 2.16 (b), luego de soldar el pin header el plástico removido se pone nuevamente desde la parte inferior.

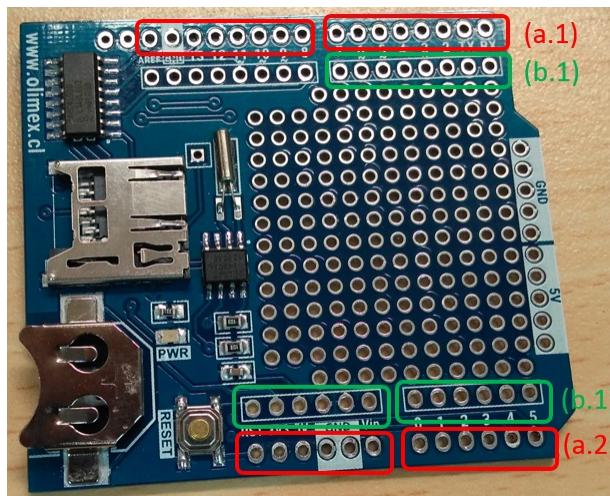


Figura 2.14: Ubicación de los pin headers en la tarjeta Data Logger: (a.1) Pin Headers Macho Doble 8x1, (a.2) Pin Headers Macho Doble 6x1, (b.1) Pin Header Macho 8x1 y (b.2) Pin Headers Macho 6x1.

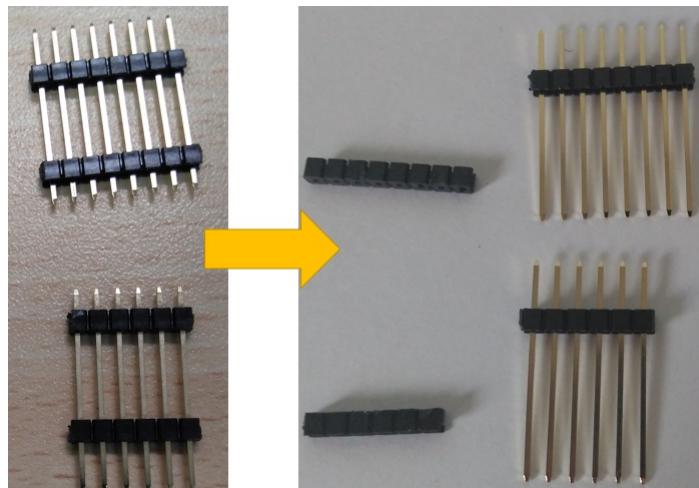


Figura 2.15: Pin Headers Machos Doble al quitar uno de los plásticos: Estado inicial (izquierda) y Estado final (derecha).

La figura 2.16 muestra el armaduino armado completamente. Para mas detalles constructivos ver la sección 3 Construcción prototipo.

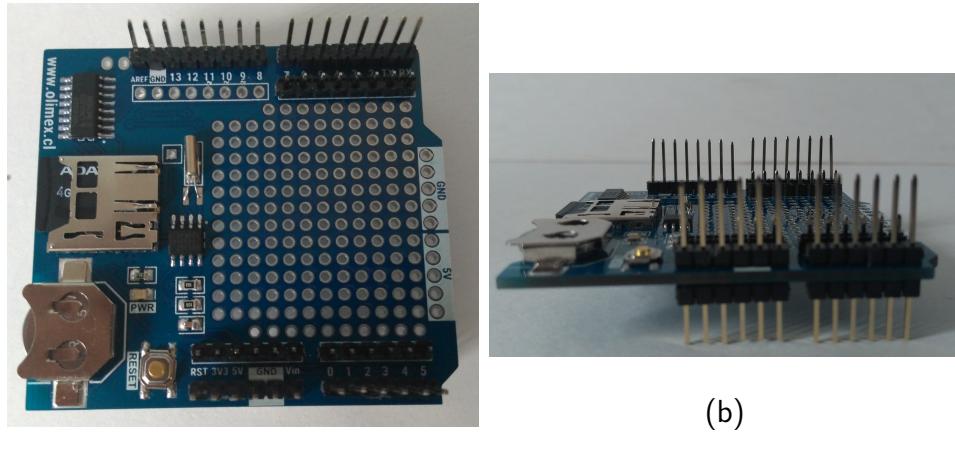


Figura 2.16: Data Logger armado:(a) Vista superior y (b) Vista costado.

(c) Elementos Data Logger

Este subsistema se utiliza para instalar componentes indirectamente sobre el Data Logger a través de una PCB para evitar realizar conexiones con cables en la misma Data Logger. La figura 2.17 muestra los componentes del subsistema. El molex macho 4x1 (figura 2.17 (2)) se utiliza para comunicar el sensor de aerosol con el Armaduino, el molex macho 2x1 (figura 2.17 (6)) se utiliza para alimentar el Armaduino con la Bateria de 9V, el buzzer (figura 2.17 (5)) se utiliza para emitir sonidos para distintas funciones del prototipo, el sensor BMP 180 (figura 2.17 (4)) se utiliza para medir la presión y temperatura al momento de una medición del prototipo.

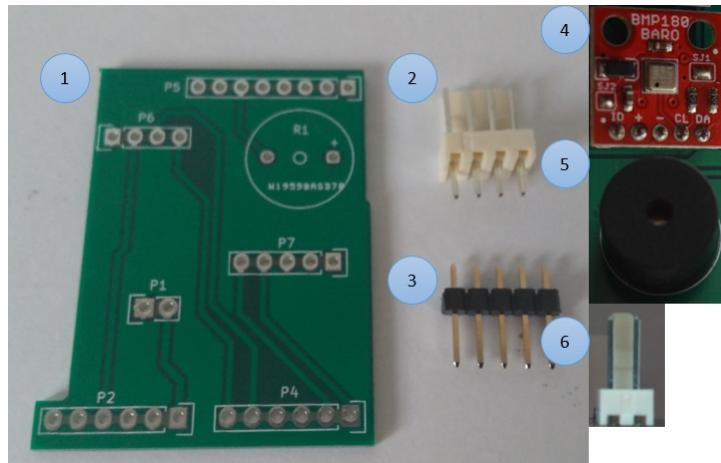


Figura 2.17: Componentes de Elementos Data Logger: (1) PCB Elementos, (2) Molex Macho 4x1, (3) Pin Header Macho 5x1, (4) Sensor de presión y temperatura BMP180, (5) Buzzer para montar en PCB 12mm 2.048kHz, (6) Molex Macho 2x1.

La ubicación de las componentes en la PCB Sensor se describe a continuación, utilizando como referencia las huellas de la placa mostrada en la figura 2.17 (1).

- P6: Molex Macho 4x1.
- R1: Buzzer (fijarse en posición + del buzzer).
- P7: Pin header macho 5x1 y sobre este el sensor BMP180.
- P1: Molex Macho 2x1.

La figura 2.18 muestra el armaduino armado completamente. Para mas detalles constructivos ver la sección 3 Construcción prototipo.

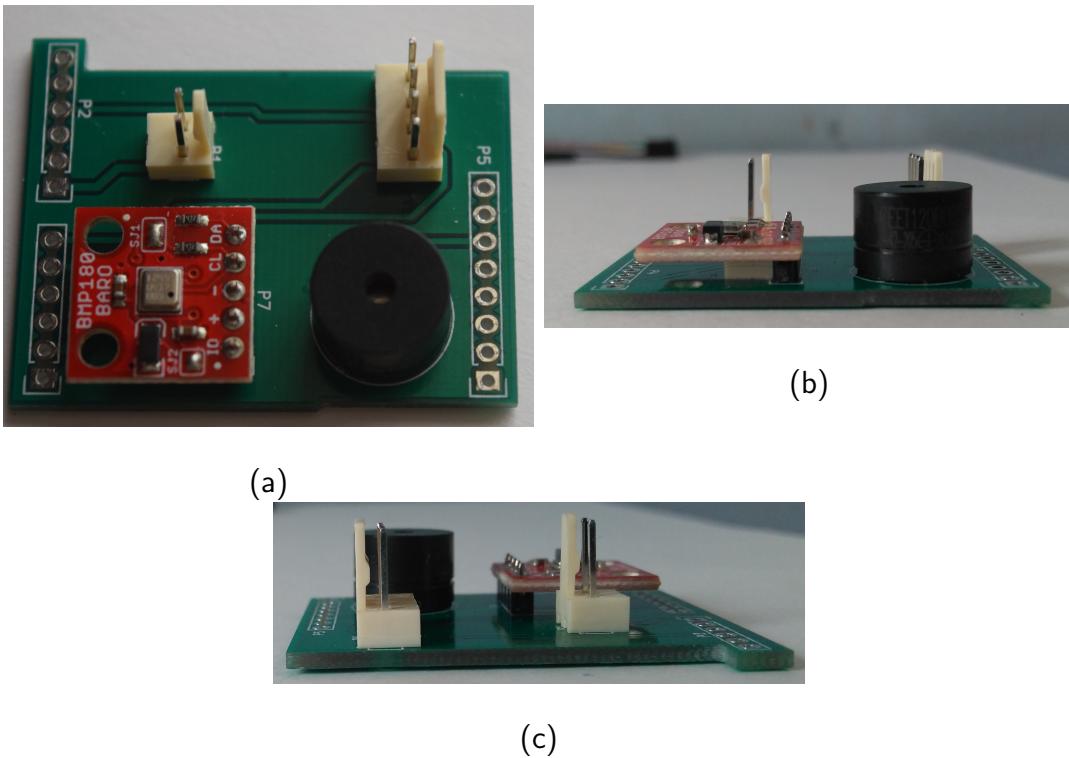


Figura 2.18: Elementos Data Logger armado: (a) Vista superior, (b) Vista costado 1 y (c) Vista costado 2.

(iv) Conexiones eléctricas

Para relacionar los componentes eléctricos entre sí es necesario realizar las conexiones eléctricas respectivas entre estos a través de cables. Para realizar las conexiones se recomienda utilizar un cable cinta (o ribbon) para facilitar la identificación de los distintos cables a través de colores distintos, un ejemplo de cable cinta se muestra en la figura 2.19 donde en sus extremos cada cable posee un Housing Slim de 1x1 (Rectángulo negro). Dependiendo del largo del cable cinta, se deberán realizar modificaciones para ajustar a la estructura del prototipo, esto se detalla en la sección 3 Construcción prototipo.

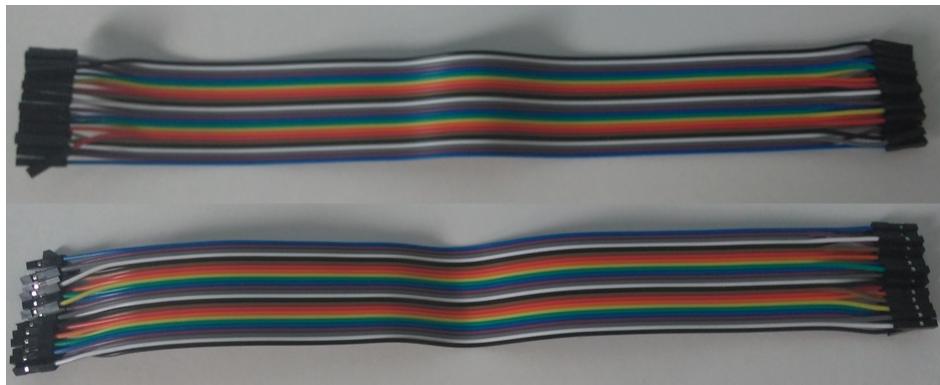


Figura 2.19: Cable cinta (o ribbon) referencial.

Se establecen 3 set de cables para las conexiones eléctricas:

(iv.1) Conexión Batería - Switch - Armaduino y Data Logger

Para dar energía al Armaduino se realiza una conexión entre la batería, el switch y el Armaduino (a través del molex macho 2x1 puesto en el data Logger). La figura 2.20 muestra esta conexión.

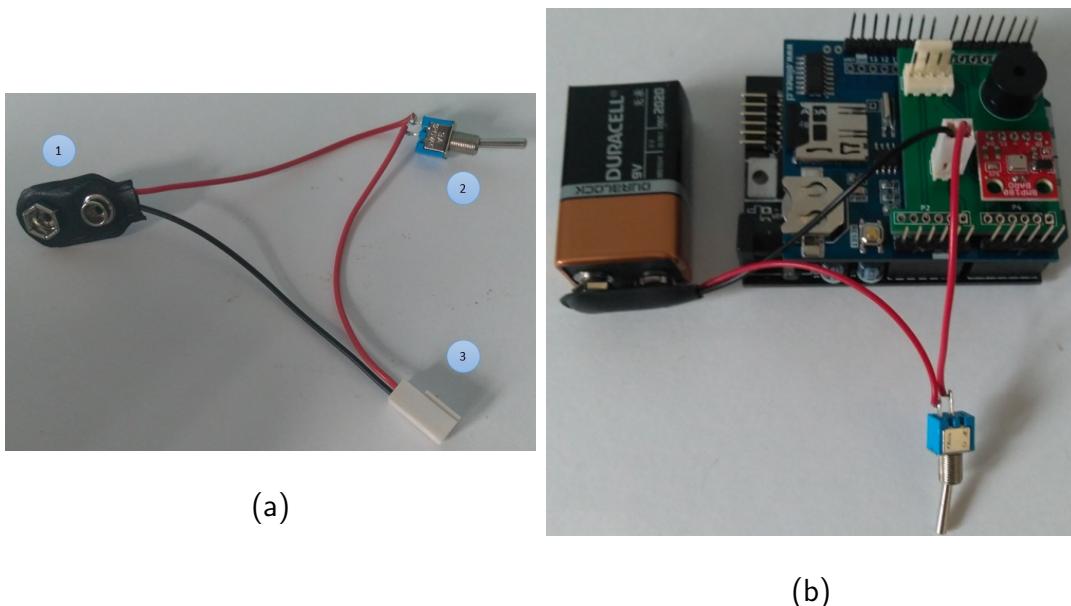


Figura 2.20: Conexión Batería - Switch - Armaduino y Data Logger: (a) Elementos de conexión: (1) Conector Batería, (2) Switch y (3) Molex Hembra 2x1. (b) Conexión.

Para mas detalles constructivos ver la sección 3 Construcción prototipo.

(iv.2) Conexión Interfaz Usuario - Armaduino y Data Logger

Esta conexión relaciona la interfaz usuario con el sistema Armaduino, permitiendo la visualización en pantalla de las mediciones, como también la interacción a través de los pulsadores de la interfaz. Los cables que forman esta conexión se muestran en la figura 2.21, el cual está formado por un total de 14 cables para conectarse a los pin headers de la PCB Interfaz tal como muestra la figura 2.22. Los Housing Slim utilizados son referenciales y se recomienda utilizar la menor cantidad de estos (es decir, no usar solo housing slim de 1x1) para mejorar la estabilidad de las conexiones entre la interfaz usuario y el Armaduino y Data Logger.



Figura 2.21: Cable conexión Interfaz Usuario - Armaduino y Data Logger.



Figura 2.22: Cable conexión en los pin Headers (Huella CONN_14-P2) de la PCB Interfaz con los cables enumerados.

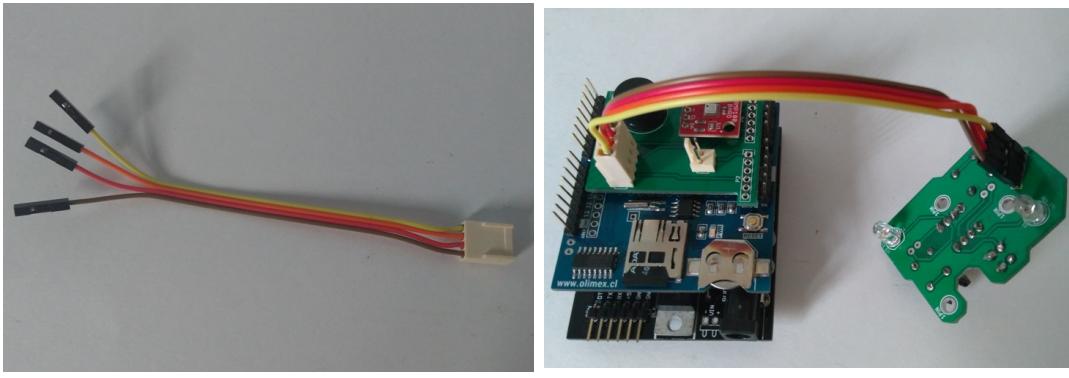
En la figura 2.22 se muestran números para identificar cada cable y su conexión en el Armaduino/Data Logger, la conexión correspondiente a cada cable a los pines del Armaduino son:

- Amarillo Cable 1 → RST.
- Naranjo Cable 2 → TX.
- Rojo Cable 3 → RX.
- Café Cable 4 → GND.
- Negro Cable 5 → 5V.
- Blanco Cable 6 → Pin Digital 9.
- Gris Cable 7 → Pin Digital 10.
- Morado Cable 8 → Pin Digital 6.
- Azul Cable 9 → Pin Digital 4.
- Verde Cable 10 → Pin Digital 3.
- Amarillo Cable 11 → Pin Digital 2.
- Naranjo Cable 12 → Pin Digital 7.
- Rojo Cable 13 → Pin Análogo 3.
- Café Cable 14 → Pin Análogo 2.

Para mas detalles constructivos ver la sección 3 Construcción prototipo.

(iv.3) Conexión Sensor - Armaduino y Data Logger

Esta conexión relaciona el sensor de aerosoles con el Armaduino/Data Logger, permitiendo recibir y registrar el voltaje medido por cada LED en la tarjeta microSD del Data Logger. La conexión se muestra en la figura 2.23 donde se puede observar como se conectan los cables al pin header (Huella P1 en la PCB sensor) y al molex macho 4x1 del Data Logger.



(a)

(b)

Figura 2.23: Conexión Sensor - Armaduino/Data Logger: (a) Conexión cables: Extremo izquierdo (Sensor) y Extremo derecho (Data Logger), y (b) Conexión Sensor - Armaduino/- Data Logger.

Para mas detalles constructivos ver la sección 3 Construcción prototipo.

2.2.2. Componentes estructurales

Para proteger y organizar los componentes electrónicos, y para dirigir la luz del sol de manera adecuada hacia los sensores se utilizan componentes estructurales definidos. Los componentes estructurales se dividen en Carcasa Externa (tubo y tapas PVC) y Componentes impresos en 3D.

(i) Carcaza externa

La carcasa consiste en un tubo de PVC de 14.5 [cm] con dos tapas de PVC correspondientes para el diámetro del tubo. Estos elementos forman la carcasa externa del prototipo que se utiliza para proteger los componentes electrónicos y sostener la estructura formada por las piezas impresas en 3D. La figura 2.24 (a) muestra el tubo PVC y las dos tapas en su estado inicial y la figura 2.24 (b) muestra el tubo PVC y las tapas en su estado final luego de cortar el tubo PVC, cortar y pegar una de las tapas al tubo y cortar la otra tapa para ensamblarla con la estructura impresa en 3D.

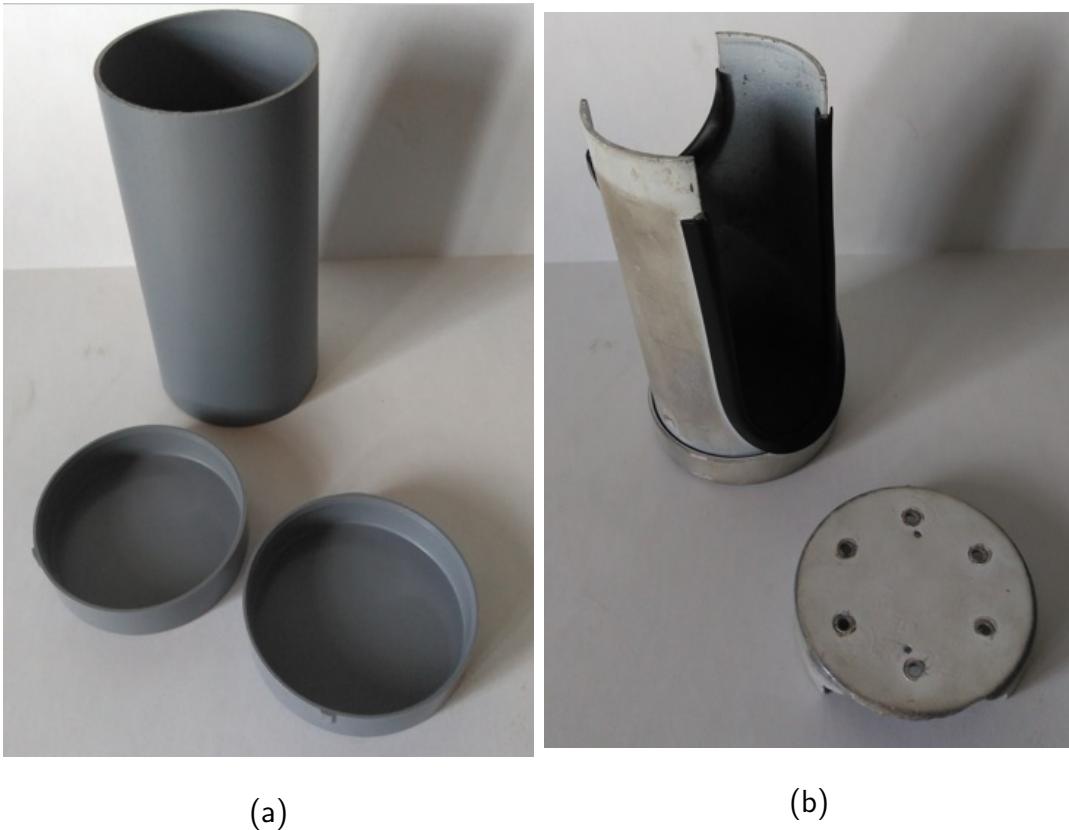


Figura 2.24: Carcasa externa: (a) Estado inicial y (b) Estado final.

Los detalles constructivos y dimensiones de los cortes que se debe realizar al tubo PVC y las tapas, ver la sección 3 Construcción prototipo.

(ii) Componentes impresos en 3D

Las piezas impresas en 3D descritas a continuación fueron impresas en una impresora Stratasys uPrint SE Plus, usando ABS como material de impresión. Esta impresora permite asegurar la precisión necesaria en las piezas. Por lo tanto, si se utiliza una impresora 3D que tenga una precisión menor o las piezas son impresas en una menor calidad, puede generar diferencias con las piezas mostradas en este documento y en las posteriores dimensiones en la carcasa externa.

La figura 2.25 muestra las piezas impresas en 3D. La figura 2.26 muestra el ensamblaje de las piezas 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 y 10, la figura 2.27 muestra como hacer coincidir los agujeros de las piezas 1 y 5 en la estructura formada en la figura 2.26. La figura 2.28 muestra el ensamblaje de todas las piezas sin incluir los componentes electrónicos.

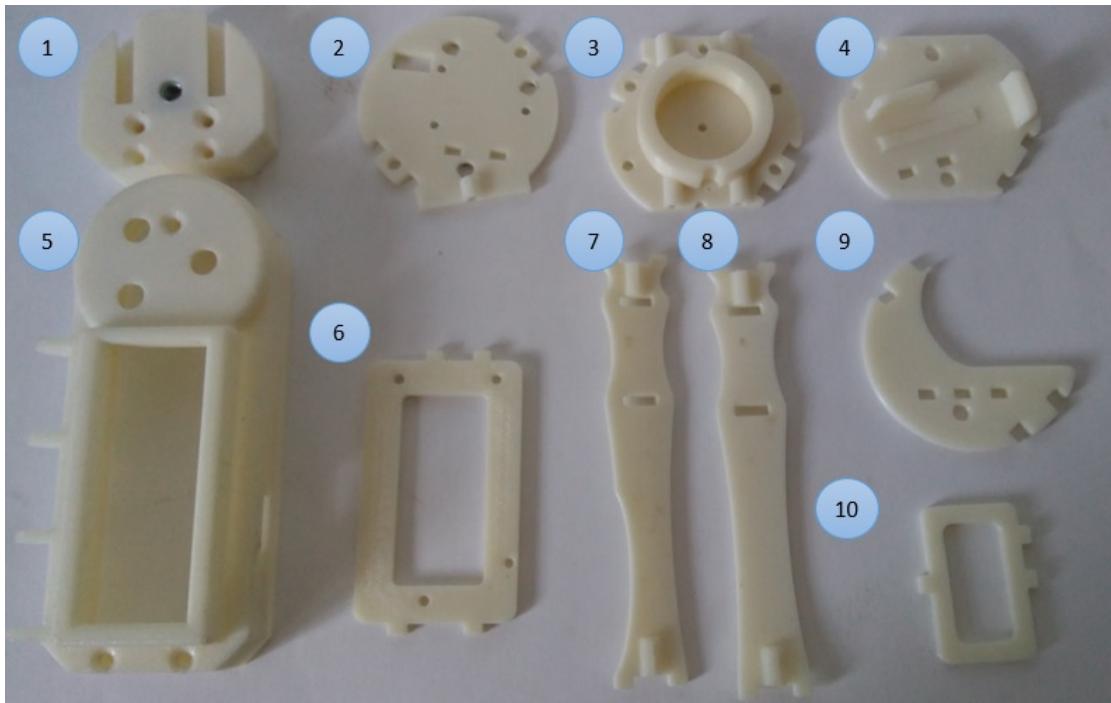


Figura 2.25: Piezas impresas en 3D: (1) Adaptador Trípode, (2) Soporte sensor, (3) Soporte Tapa PVC, (4) Piso Batería, (5) Soporte Panel de Control, (6) Soporte Armaduino, (7) Soporte Lateral 01, (8) Soporte Lateral 02, (9) Piso Armaduino, (10) Soporte Batería.

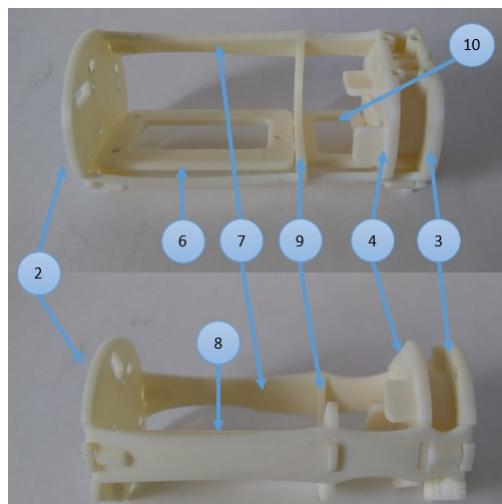


Figura 2.26: Piezas impresas en 3D: (2) Soporte sensor, (3) Soporte Tapa PVC, (4) Piso Batería, (6) Soporte Armaduino, (7) Soporte Lateral 01, (8) Soporte Lateral 02, (9) Piso Armaduino, (10) Soporte Batería.

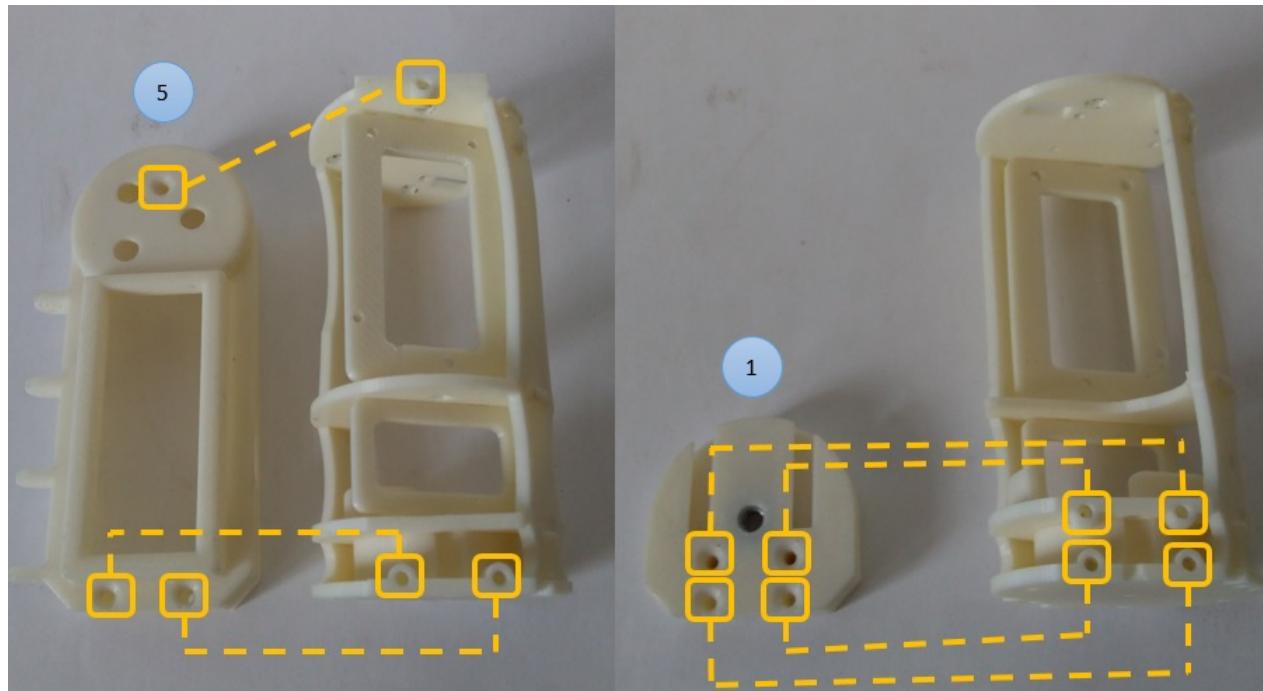


Figura 2.27: Piezas impresas en 3D: (1) Adaptador Trípode, (5) Soporte Panel de Control.

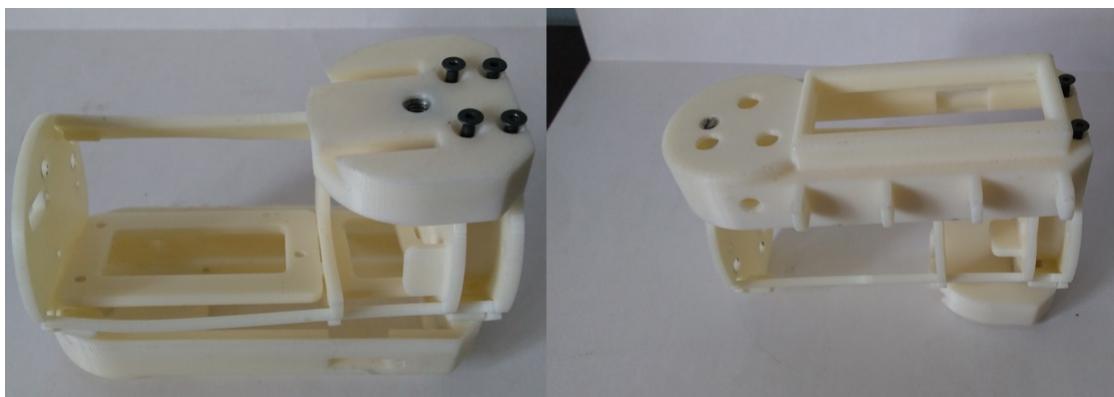


Figura 2.28: Ensamblaje piezas impresas en 3D sin componentes electrónicos.

3. Notas para la construcción del prototipo

3.1. Componentes Electrónicos

3.1.1. Pasos para poner componentes en pines

A continuación, se describe como poner los distintos componentes en los pines de las placas PCB:

1. Doblar los pines de los componenetes dependiendo de la separación que tengan las perforaciones en la tarjeta (figura 3.1).

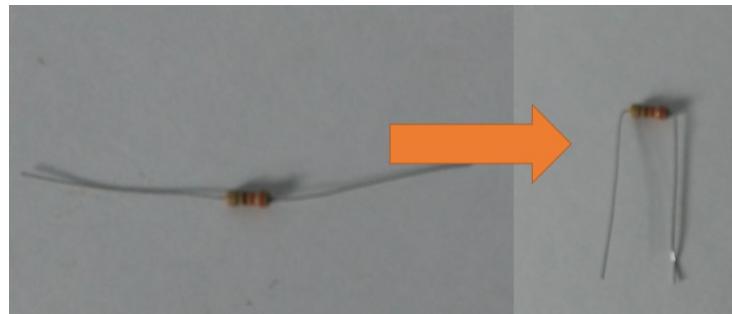


Figura 3.1: Como doblar componente.

2. Para facilitar la soldadura, al insertar el componente se recomienda doblar las patas del alambre con el componente tocando la PCB (figura 3.2).

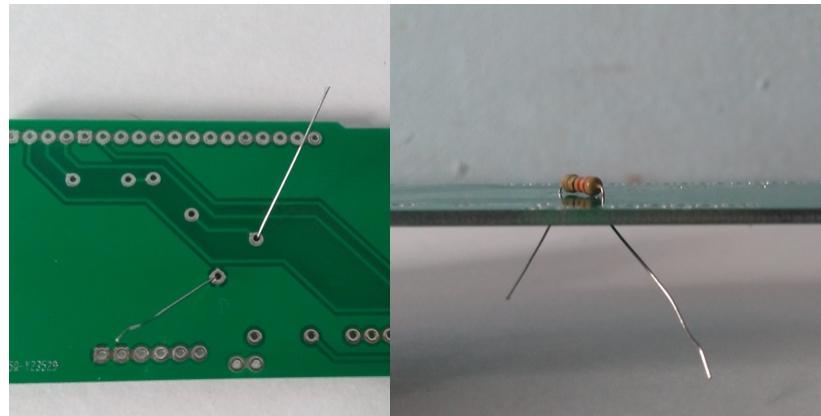


Figura 3.2: Posición del componente en la PCB.

3.1.2. Como soldar

Una vez que se tengan todos los componentes para un sistema/subsistema se puede pasar al siguiente paso que es soldar los componentes. Para esto, se deben seguir estos pasos:

1. Calentar el pin y el orificio con el cautín.
2. Agregar soldadura.
3. Retirar soldadura.
4. Retirar el cautín cuando la soldadura se adhiera al orificio y al alambre.

La figura 3.3 muestra gráficamente los pasos enunciados anteriormente. La figura 3.4 se muestra una soldadura correcta e incorrecta. Si queda de forma incorrecta se debe limpiar la punta del cautín (estando apagado y frío) y volver a calentar la soldadura para que se derrita y tome la forma correcta.

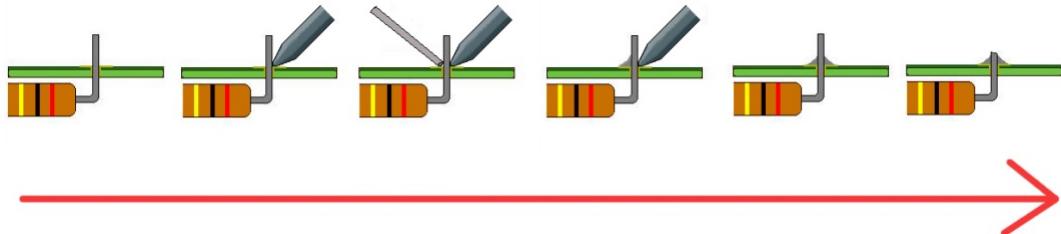


Figura 3.3: Pasos para soldar [5].

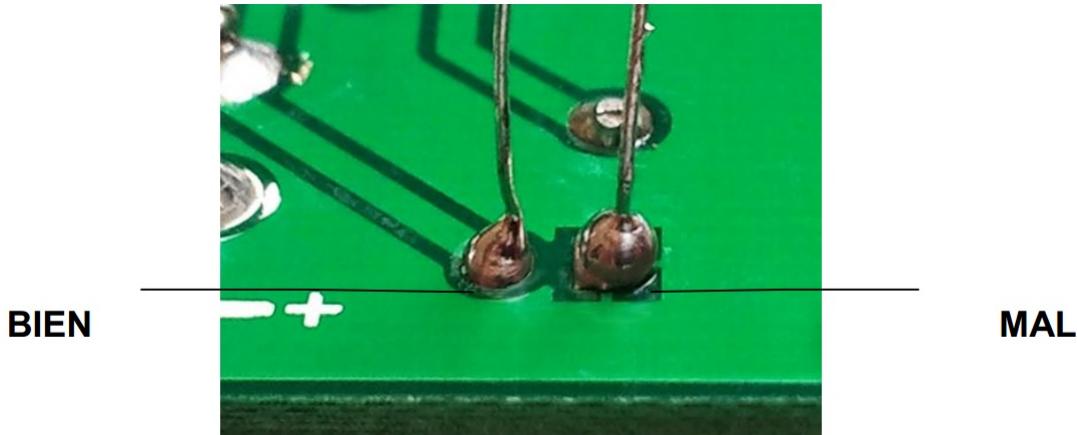


Figura 3.4: Soldadura correcta (izquierda: BIEN) e incorrecta (derecha: MAL) [5].

Si nunca se ha soldado con cautín se recomienda realizar soldadura de "práctica" para evitar problemas durante el soldado de los distintos sistemas/subsistemas del prototipo. Se debe poner una mayor atención si el cautín con el que se va a soldar no permite la regulación de temperatura.

3.1.3. Conexiones

En la sección 2.2.1.(iv) se describieron las conexiones necesarias para conectar los componentes eléctricos entre sí. Estos cables se conectan a través de dos tipos de componentes: (1) Housing Slim y (2) Molex, con sus respectivos terminales los cuales se muestran en la figura 3.5

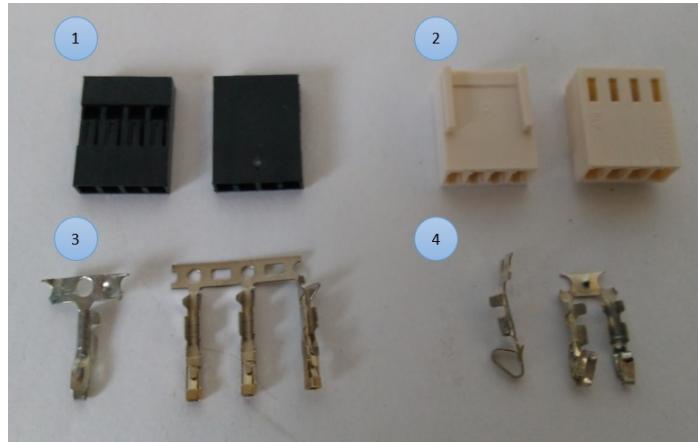


Figura 3.5: Conectores: (1) Housing Slim y (2) Molex hembra, y Terminales: (3) Housing Slim y (4) Molex.

Los pasos para generar la conexión del cable con el terminal y el posterior ensamblaje con el conector se describen a continuación y se muestran en la figura 3.6:

- Paso 1: Tomar el cable y dimensionar según lo deseado.
- Paso 2: Pelar el extremo del cable.
- Paso 3: Poner el extremo de cable pelado sobre el terminal de tal forma que el plástico quede entre las pestañas, señaladas en el círculo naranja indicado en la figura 3.6 (3).
- Paso 4: Soldar la parte pelada del cable a la terminal de forma que queden unidos. Se debe tener cuidado de poner el cautín mucho tiempo sobre el terminal ya que puede provocar el derretimiento del plástico del cable.
- Paso 5: Doblar las pestañas indicadas en el círculo naranja en la figura 3.6 (4) de forma que abracen al cable tal como se muestra en la figura 3.6 (5).
- Paso 6: Ubicar el conector y el terminal como se muestra en la figura 3.6 (6).
- Paso 7: Insertar el cable en el terminar hasta escuchar un "click", el terminal debe quedar completamente al interior del conector.

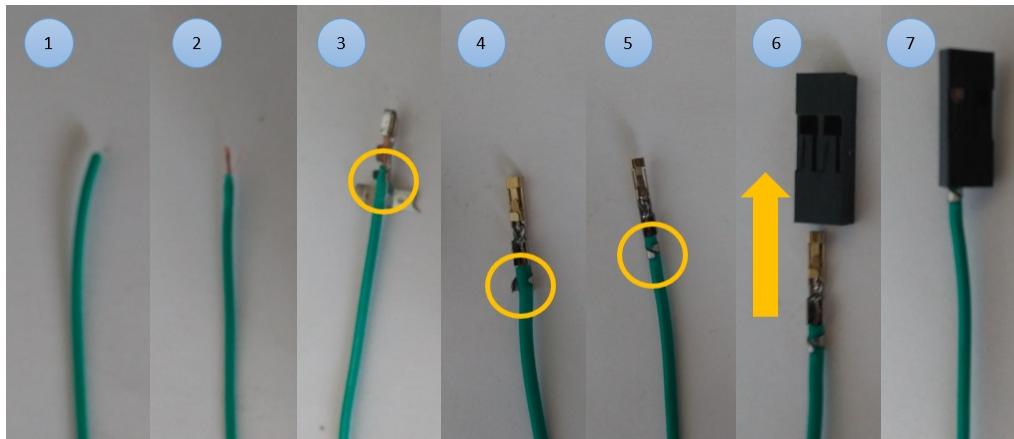


Figura 3.6: Pasos para hacer un conector con Housing Slim.

El procedimiento es equivalente para un terminal molex. La forma de ingresar el terminal en el conector molex se muestra en la figura 3.7.

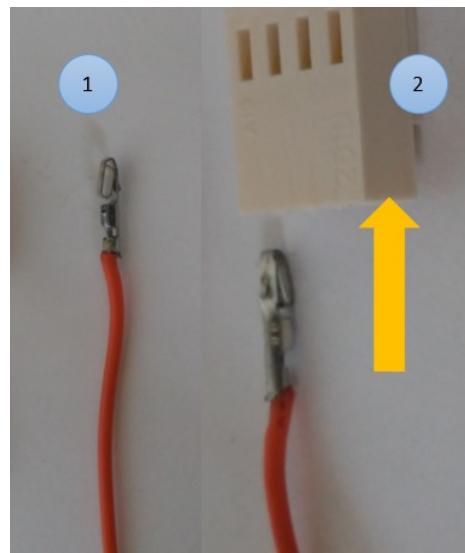


Figura 3.7: Pasos para insertar el terminal molex en el conector molex.

3.2. Carcaza externa

En esta sección se especifican las dimensiones de los cortes que es necesario hacer tanto en el tubo PVC y en las tapas para pasar de lo mostrado en la figura 2.24 (a) a lo mostrado en la figura 2.24 (b).

Sección 3.2 Carcaza externa

Los pasos para cortar el tubo PVC y las tapas se describen a continuación y se muestran desde la figura 3.8 a la figura 3.12 (la imágenes estan distorsionadas debido al ángulo de la cámara):

- Paso 1: pegar el tubo PVC a una de las tapas y en el extremo libre marcar los bordes del PVC que tengan una distancia de 5.5 [cm] tal como muestra la figura 3.8.

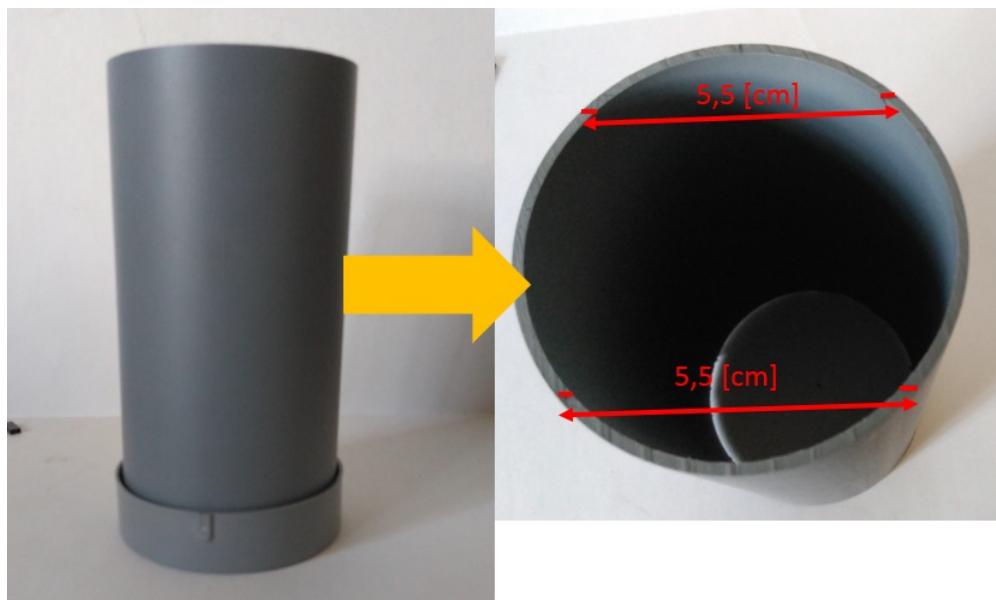


Figura 3.8: Paso 1 carcaza externa (Tubo y tapa).

- Paso 2: desde los bordes marcados en el paso anterior (figura 3.8 derecha) se marcan: (1) Desde un borde se dibujan 2 líneas rectas de 11 [cm] y en el extremo de las líneas dibujar una semi-circunferencia de 2,75 [cm], (2) Desde el otro borde se dibujan 2 líneas rectas de 2 [cm] y en el extremo de las líneas dibujar una semi-circunferencia de 2,75 [cm]. Seguir lo mostrados en la figura 3.9.

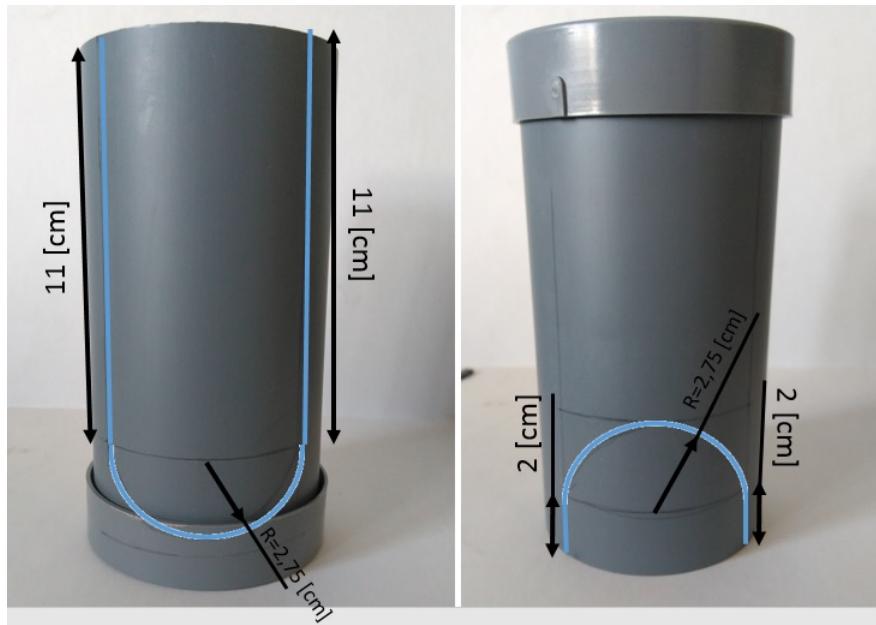


Figura 3.9: Paso 2 carcaza externa (Tubo y tapa).

Debido a la curvatura del tubo PVC, puede ser difícil marcar las dimensiones descritas por lo que se recomienda marcar las dimensiones mas cercanas, cortar y ajustar posteriormente.

- Paso 3: cortar lo marcado en el paso anterior, luego pintar y poner las gomas, tal como muestra la figura 3.10.



Figura 3.10: Paso 3 carcaza externa (Tubo y tapa).

- Paso 4: en la otra tapa se deben cortar los bordes de ésta, para hacerlo se marcan los bordes que estén separados por 4 [cm], como muestra la figura 3.11 (izquierda). Una vez marcado los bordes marcar el borde de la tapa con las dimensiones que muestra la figura 3.11 (derecha) en ambos lados y luego cortar.

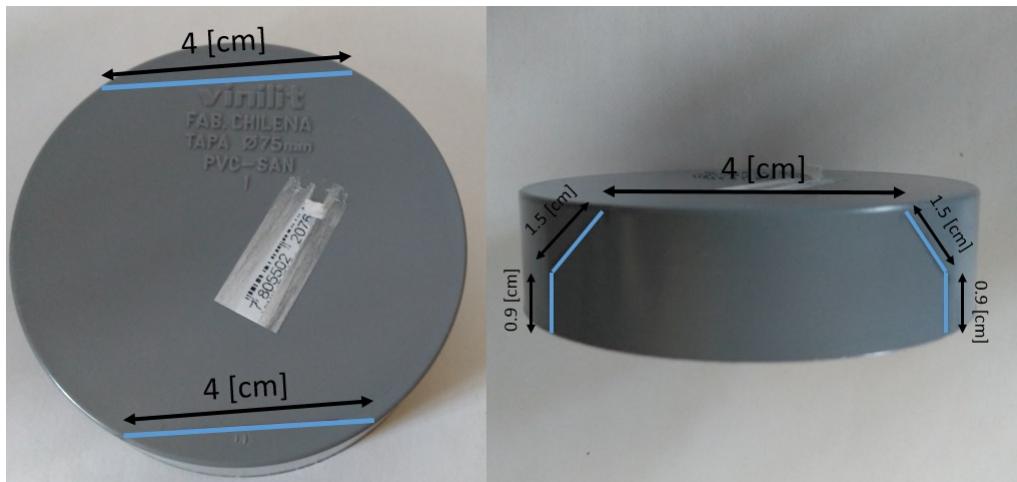


Figura 3.11: Paso 4 carcaza externa (tapa).

- Paso 5: para ensamblar la tapa con las piezas 3D se debe ubicar el centro de la tapa y

ubicar el orificio central de la pieza Soporte Tapa PVC (figura 3.12 (Izquierda, círculo rojo)). Luego marcar todos los orificios de la pieza Soporte Tapa PVC, poniendo atención en los agujeros pequeños en la figura 3.12 (Izquierda, círculo verde) ya que por estos entrará la luz hacia los sensores. Se recomienda utilizar un dremel con el mismo diámetro de los agujeros y posteriormente aumentar el diámetro de los orificos en la tapa PVC correspondientes a la entrada de luz.

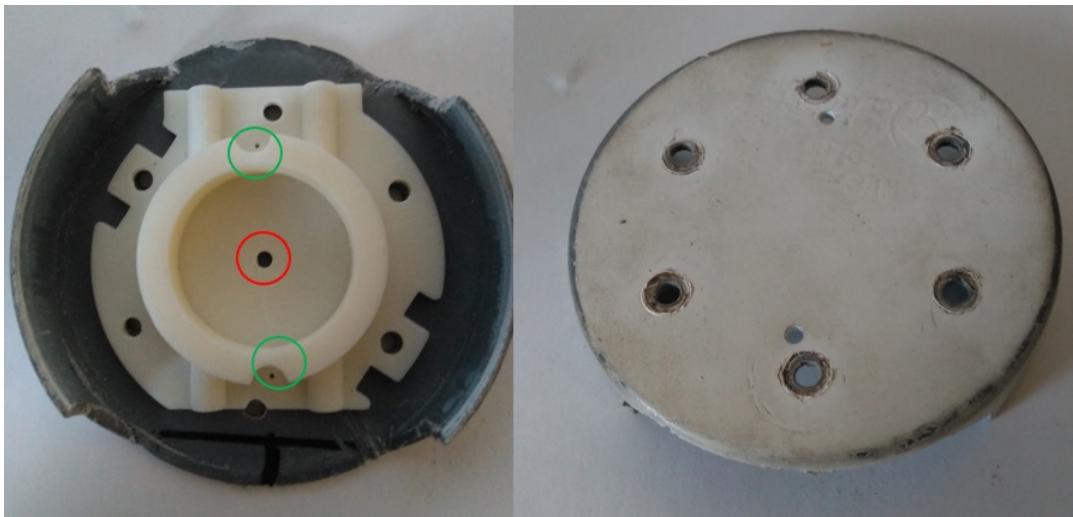


Figura 3.12: Paso 5 carcasa externa (tapa).

3.3. Ensamblaje

Con los componentes electrónicos y estructurales listos, se deben ensamblar los componentes. Para ensamblar los componentes electrónicos con las piezas 3D se utilizan pernos de distintos diámetro y tipo, los cuales se detallan en la tabla 3.1

Sección 3.3 Ensamblaje

Tabla 3.1: Pernos para ensamblaje y ubicación.

| Perno | Cantidad | Ubicación |
|------------------------------|----------|--------------------------|
| Perno cónico 2mmx18mm parker | 4 | Adaptador Tripode |
| Pernos 2mmx22mm | 1 | Soporte Panel de Control |
| Perno cónico 2mmx18mm parker | 2 | Soporte Panel de Control |
| Pernos 3mmx10mm | 6 | Tapa PVC |
| Perno 2mmx10mm | 3 | Interfaz Usuario |
| Perno 3mmx5mm | 2 | Sensor |
| Pernos 3mmx11mm | 1 | Soporte lateral 01 |
| Pernos 3mmx11mm | 1 | Soporte lateral 02 |

El ensamblaje sigue los siguientes pasos:

- Paso 1: Ensamblar Tapa PVC con Soporte Tapa PVC a excepción de los agujeros mostrados en la figura 3.13.

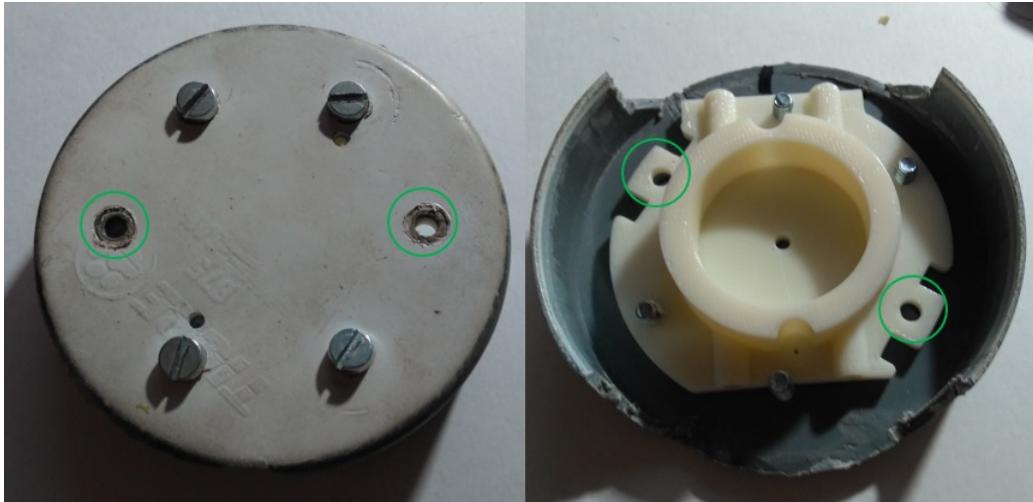


Figura 3.13: Paso 1 Ensamblaje.

- Paso 2: Ensamblar El Armaduino con el Soporte Armaduino.

Sección 3.3 Ensamblaje

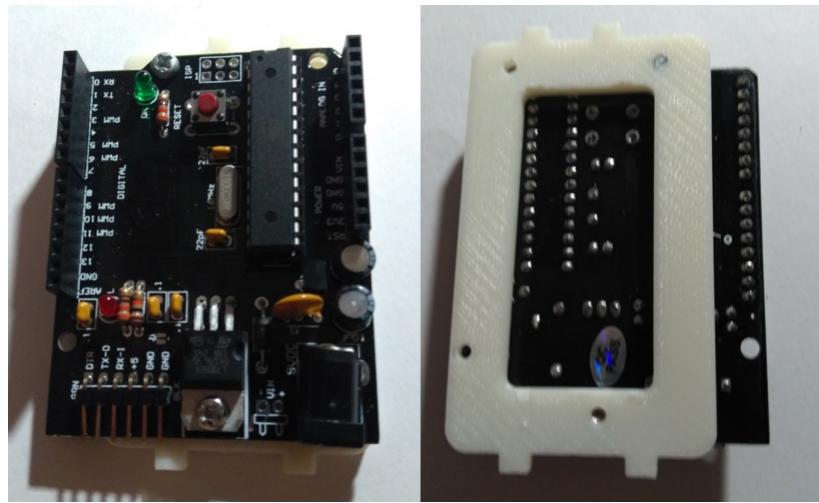


Figura 3.14: Paso 2 Ensamblaje.

- Paso 3: Equipar el Armaduino con el Data Logger con las conexiones del sensor e interfaz usuario ubicadas.

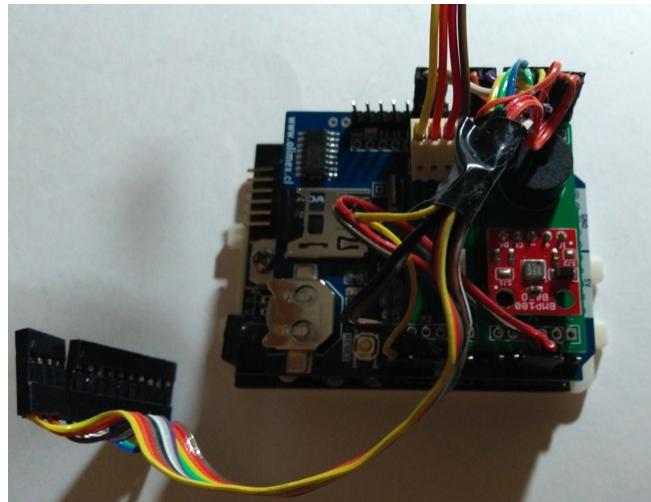


Figura 3.15: Paso 3 Ensamblaje.

- Paso 4: Ensamblar el sensor en el Soporte Sensor.

Sección 3.3 Ensamblaje

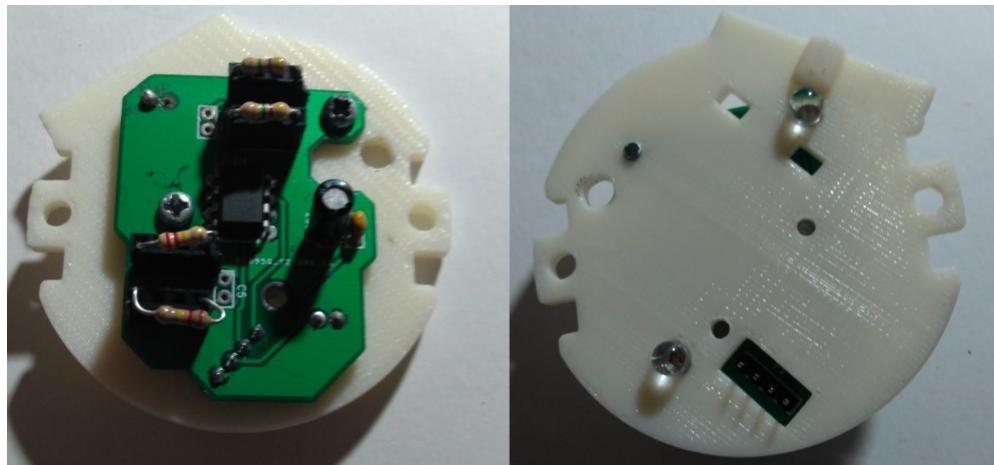


Figura 3.16: Paso 4 Ensamblaje.

- Paso 5: Ensamblar el Interfaz usuario con el Soporte Panel de Control.

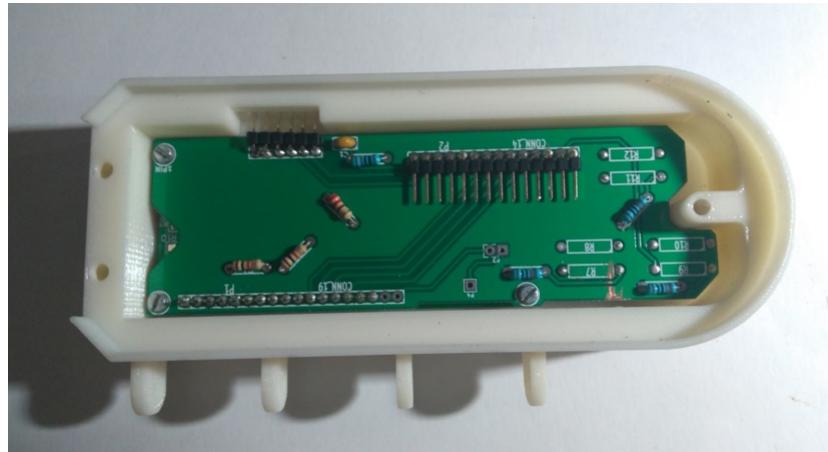


Figura 3.17: Paso 5 Ensamblaje.

- Paso 6: Instalar la conexión switch en el Soporte Panel de Control.

Sección 3.3 Ensamblaje

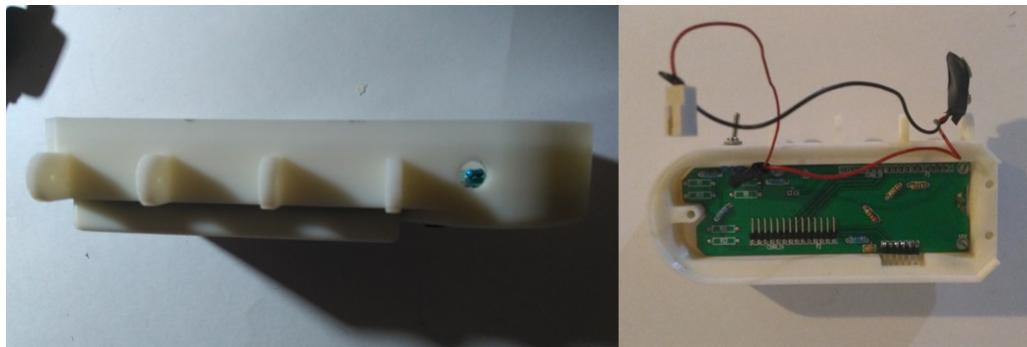


Figura 3.18: Paso 6 Ensamblaje.

- Paso 7: Conectar el Armaduino con el Interfaz usuario. Conectar la conexión Switch al Armaduino.

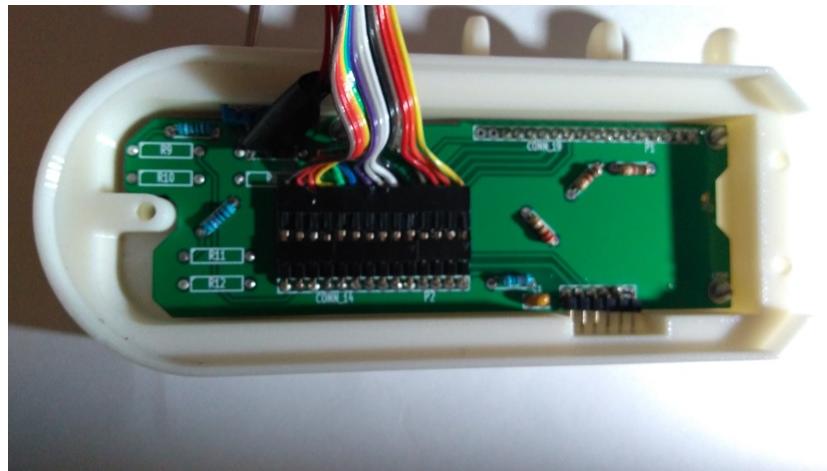


Figura 3.19: Paso 7 Ensamblaje.

- Paso 8: Conectar el Sensor al Armaduino. Ensamblar el Soporte Armaduino con el Piso Armaduino y el Soporte Sensor.

Sección 3.3 Ensamblaje

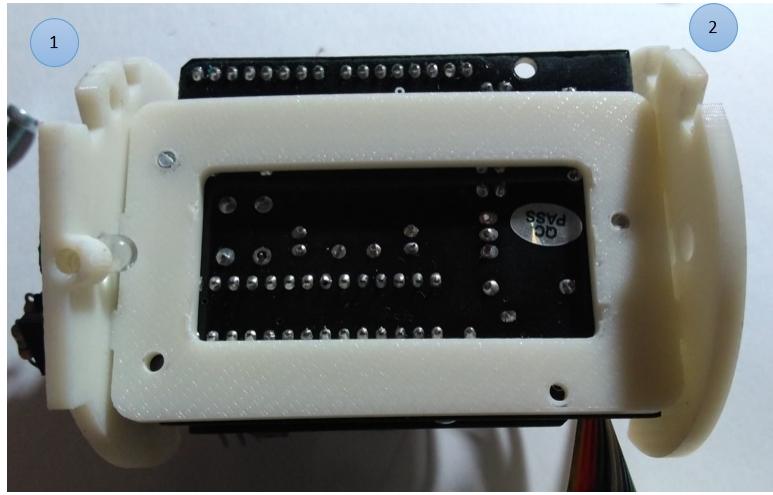


Figura 3.20: Paso 8 Ensamblaje: (1) Soporte Sensor y (2) Piso Armaduino.

- Paso 9: Ensamblar el Soporte Batería con el Piso Armaduino.

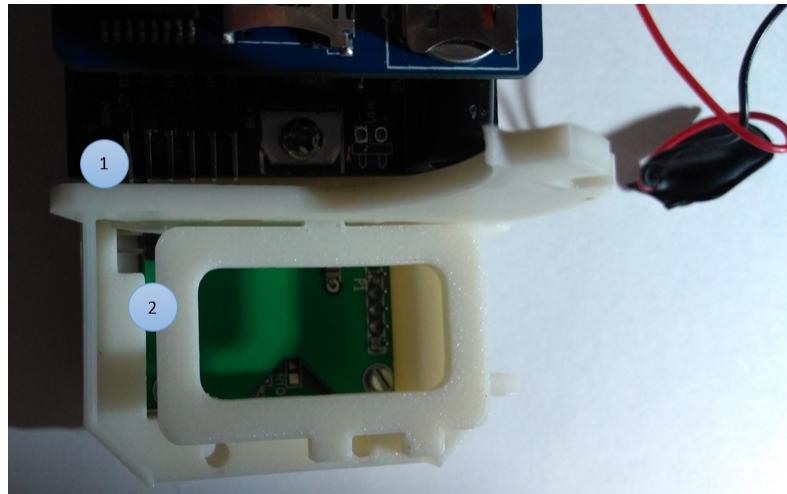


Figura 3.21: Paso 9 Ensamblaje: (1) Piso Armaduino y (2) Soporte Batería.

- Paso 10: Ensamblar el Soporte Batería con el Piso Batería.

Sección 3.3 Ensamblaje

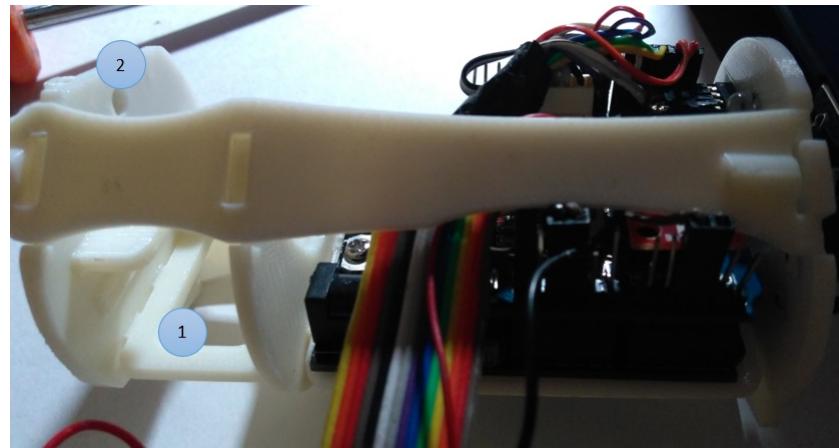


Figura 3.22: Paso 10 Ensamblaje: (1) Soporte Batería y (2) Piso Batería.

- Paso 11: Poner los soporte laterales en las ranuras con el Soporte Sensor, Piso Arduino y Piso Batería. Ensamblar con el Soprote Sensor.

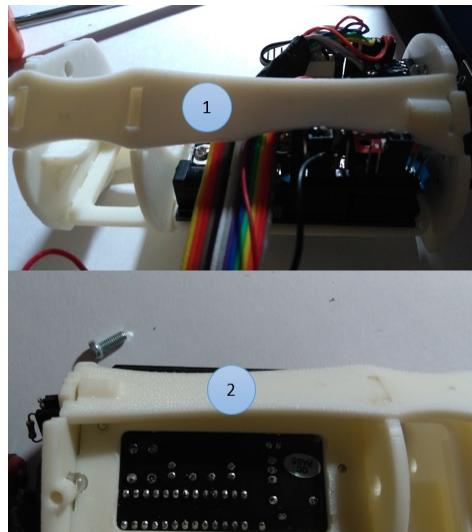


Figura 3.23: Paso 11.1 Ensamblaje: (1) Soporte Lateral 01 y (2) Soporte Lateral 02.

Sección 3.3 Ensamblaje

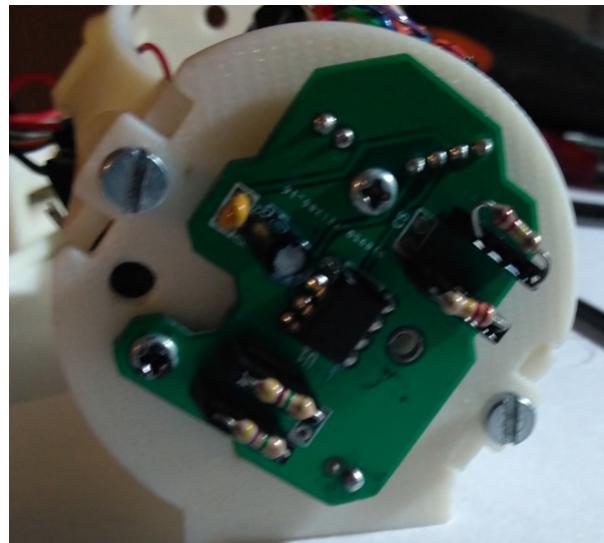


Figura 3.24: Paso 11.2 Ensamblaje: Ensamblaje soporte sensor.

- Paso 12: Poner en las ranuras con el Soporte Tapa PVC y ensamblar.



Figura 3.25: Paso 12 Ensamblaje.

- Paso 13: Ensamblar el soporte panel de control con la estructura.



Figura 3.26: Paso 13 Ensamblaje.

- Paso 14: Ensamblar el Adaptador trípode a la estructura.

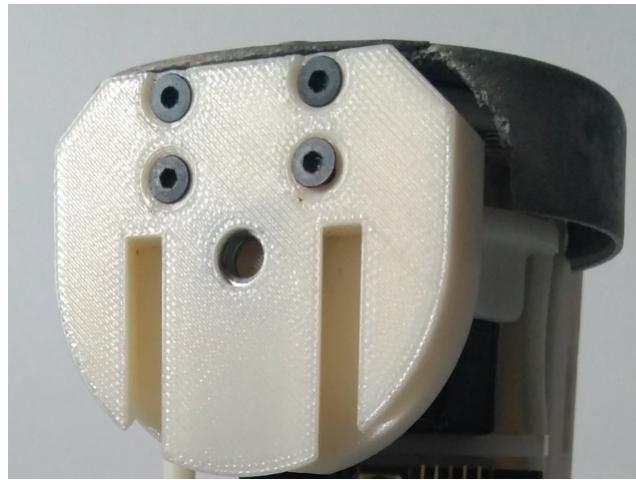


Figura 3.27: Paso 14 Ensamblaje.

- Paso 15: Poner la batería en el Soporte Batería y conectar.

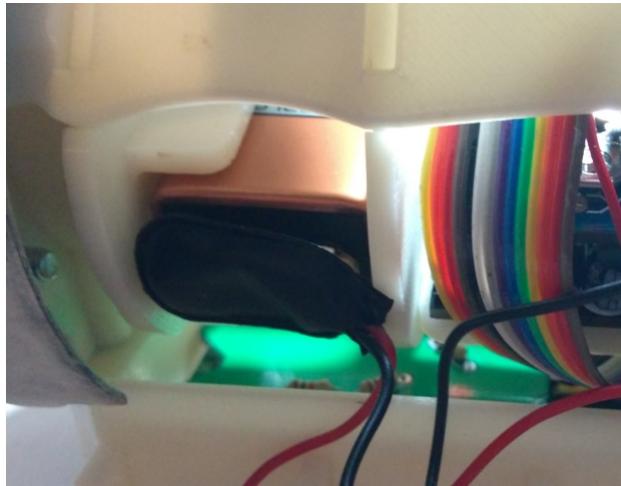


Figura 3.28: Paso 15 Ensamblaje.

- Paso 16: Encender (El arduino debe estar previamente configurado).



Figura 3.29: Paso 16 Ensamblaje.

4. Extracción de datos

Luego de realizar al menos una medición, se genera un archivo .csv en la tarjeta microSD. Este archivo se puede abrir con una planilla de cálculo. Dentro del archivo se encuentra la información registrada por el instrumento ordenada en 12 columnas: (1) Año, (2) Mes, (3) Día, (4) Hora, (5) Minutos, (6) Segundos, (7) Sensor 564 [nm] (LED amarillo), (8) Sensor 408 [nm] (LED Azul), (9) Temperatura, (10) Presión, (11) Altitud y (12) ID.

Se deben extraer los voltajes máximos (y los datos de todas las columnas para la fila correspondiente) para cada sensor en un intervalo de tiempo definido.

5. Calibración

5.1. Langley-Plot

Para usar la ecuación 1.5 es necesario obtener el valor de la constante de calibración V_0 . Para obtener este valor se utilizan dos métodos complementarios de calibración.

El primer método consiste en utilizar el método de Langley Plot en el prototipo. La constante de calibración se obtiene mapeando el logaritmo del voltaje medido bajo distintas condiciones de masas de aire (realizar mediciones para distintos ángulos de zenit), y luego comparando con la ecuación 5.1, esta ecuación asume la aproximación de longitud de onda equivalente descrita para la ecuación 1.5.

$$\ln V = \ln \left(V_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \right) - \left(\alpha_R \frac{P}{P_0} + \alpha_a \right) m_{air} \quad (5.1)$$

Para utilizar este método se deben cumplir algunas condiciones:

- El cielo debe estar completamente despejado, sin presencia de nubes.
- Las mediciones se deben realizar a una altura sobre los 3000 metros sobre el nivel del mar.
- Se recomienda que los ángulos de zenit de las mediciones sean menores a los 70.

Cuando la cantidad de mediciones es suficiente, se gráfica el mapeo del logaritmo de voltaje. Sobre estos datos se realiza un ajuste lineal sobre los datos, por lo tanto, se obtiene una recta de la forma

$$y = mx + n$$

donde m es la pendiente de la recta y n el coeficiente de posición. Luego el valor de la constante de calibración viene dado por,

$$n = \ln(V_0(\frac{R_0}{R})^2) \quad (5.2)$$

El resultado de utilizar el método de Langley Plot en un prototipo se muestra en la figura 5.1. Debido a que el ciclo diario de gases y aerosoles es incierto, las constantes de calibración y sus varianzas están correlacionadas para disminuir la incertidumbre de esta estimación. Por lo tanto, el error sistemático debido al efecto de utilizar un sensor con alto ancho de banda es corregido utilizando mediciones lado a lado con un instrumento patrón.

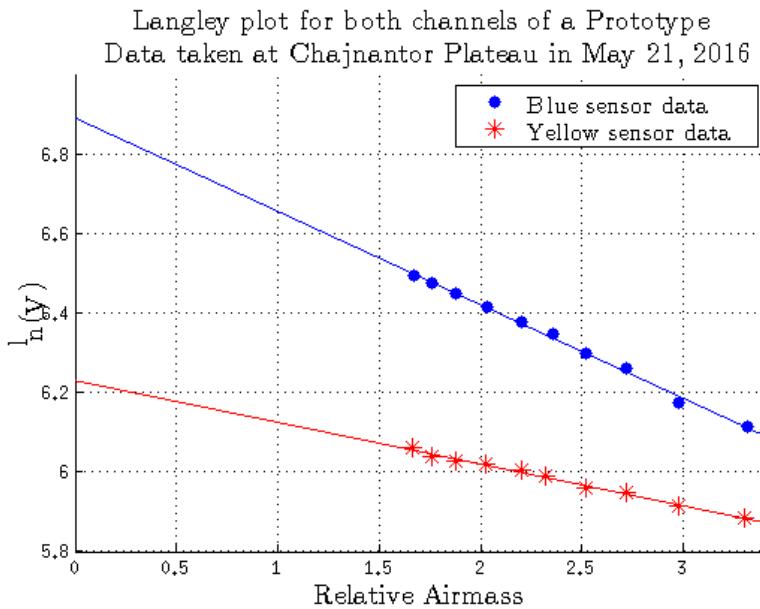


Figura 5.1: Ejemplo de Langley Plot obtenido para un prototipo. Se puede observar que los resultados se ajustan a los resultados esperados para un Langley Plot monocromático.

5.2. Corrección con instrumento patrón

Para corregir la constante de calibración obtenida con el Langley Plot se deben realizar mediciones lado a lado con un instrumento patrón midiendo el AOT de manera simultánea.

Sección 5.2 Corrección con instrumento patrón

Para realizar esta corrección, las mediciones se deben realizar cuando el cielo se encuentre completamente despejado, sin presencia de nubes.

Para realizar la corrección se debe medir de manera simultánea con el prototipo cuando el instrumento patrón realice su medición. Para mejorar los datos de calibración, se recomienda realizar varias mediciones con el prototipo por cada medición del instrumento patrón. Posteriormente, los datos del prototipo son filtrados dejando solo el valor máximo obtenido para un rango de tiempo igual a ± 3 minutos con respecto al tiempo de medición del instrumento patrón. Esto se realiza para disminuir la influencia del operador en la calidad de los datos.

Si el prototipo y el instrumento patrón no miden el AOT en las mismas longitudes de onda, se debe ajustar las mediciones realizadas por el instrumento patrón a través de la fórmula exponencial de Ångström (ecuación (5.3)) para interpolar el valor del AOT medido por el instrumento patrón y llevarlo a longitudes de onda equivalentes del prototipo.

$$\frac{\tau_\lambda}{\tau_{\lambda_0}} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\alpha} \quad (5.3)$$

donde τ_λ es el espesor óptico en la longitud de onda λ , τ_{λ_0} es el espesor óptico en la longitud de onda de referencia λ_0 y α es el coeficiente de Ångström. Luego, es posible calcular el AOT en una longitud de onda equivalente con el coeficiente de Ångström y las mediciones del instrumento patrón.

El coeficiente de Ångström se calcula con las mediciones de AOT para dos longitudes de onda λ_1 y λ_2 (distintas) en cuyo rango esté contenida la longitud de onda del sensor del prototipo. El coeficiente de Ångström se calcula como,

$$\alpha = - \frac{\log_{10} \left(\frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}} \right)}{\log_{10} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad (5.4)$$

Donde por ejemplo, si se tiene un prototipo con longitudes de onda 564 [nm] (LED amarillo) y 408 [nm] (LED azul), y se utiliza como instrumento patrón un fotómetro solar CIMEL, el coeficiente de Ångström se calcula utilizando las longitudes de onda 500 y 675 [nm] para el LED amarillo y las longitudes de onda 380 y 440 [nm] para el LED azul.

Se tiene que el sensor amarillo se ve afectado por la presencia de gases en la atmósfera por lo que es necesario corregir por la presencia de ozono y vapor de agua en la atmósfera. Para la corrección se recomienda utilizar las siguientes ecuaciones para el cálculo de espesor óptico del vapor de agua y ozono:

$$OT_v = 0,00336 \cdot H_2O[cm] + 0,00185 \quad (5.5)$$

$$OT_{oz} = 1,1136 \cdot 10^{-4} \cdot O_3 + 1,1440 \cdot 10^{-3} \quad (5.6)$$

Posterior a realizar esta corrección se debe realizar un ajuste lineal para comparar los datos del instrumento patrón y la del prototipo. La figura 5.2 muestra un ejemplo de regresión lineal al utilizar como instrumento patrón un fotómetro solar CIMEL. Usando esto se tiene la relación lineal $\tau_p^* = m\tau_C + n$ entre el prototipo calibrado con Langley Plot y la medición de AOT del instrumento patrón (τ_p^* y τ_C respectivamente).

Usando los coeficientes m y n de la relación lineal, se realiza la corrección final de la medición de AOT del prototipo (τ_p) usando la ecuación 5.7.

$$\tau_p = \frac{\tau_p^* - n}{m} \quad (5.7)$$

Para estimar la incertidumbre en las mediciones se calcula la diferencia porcentual entre los datos corregidos del prototipo y los datos del instrumento patrón. Finalmente se recomienda realizar un proceso de validación, para lo cual se realizan mediciones utilizando la misma metodología para la corrección inicial y se recalculan los coeficiente de corrección para los datos.

Sección 6. Costos

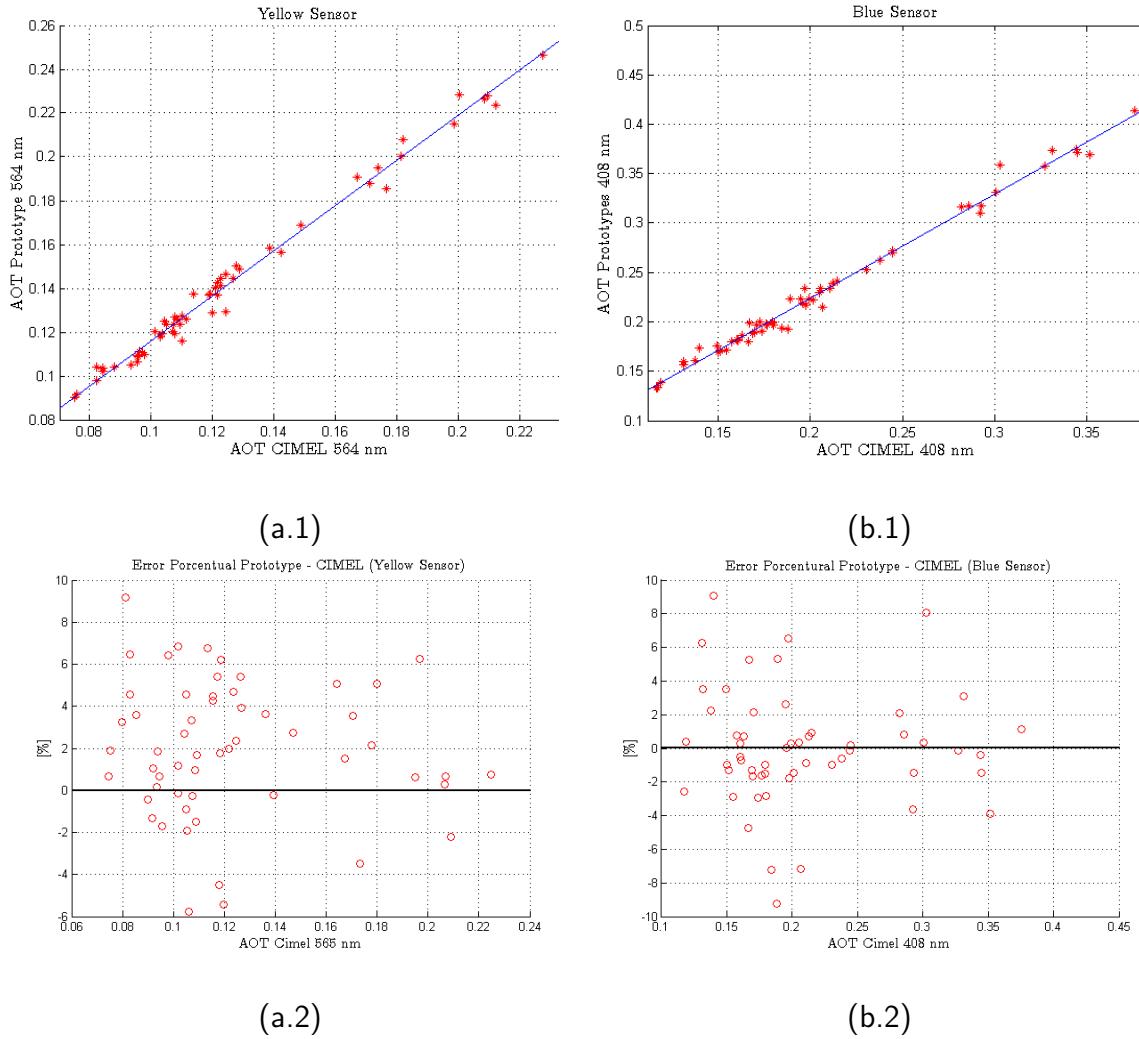


Figura 5.2: Figuras (a.1) y (b.1) muestran la correlación de medición para cada LED con el AOT equivalente del CIMEL, mientras que (a.2) y (b.2) muestran el error porcentual para cada medición de AOT en el rango de calibración lado a lado.

6. Costos

En el anexo A se presentan los componentes del prototipo y su precio en el año 2016. El costo total del prototipo es de 168291 [CLP] si se consideran precios unitarios de los componentes y de 209525 [CLP] si se considera formato comercial (la diferencia de precio se justifica en que varios de los componentes no se vende de manera unitario por lo que hay que comprar mas de lo necesario, para evaluar presupuesto se recomienda considerar el

Sección 6. Costos

costo total según formato comercial).

El mayor costo del prototipo viene dado por las piezas impresas en 3D debido a que la precisión requerida de las piezas eleva su costo (considerando una impresión en impresora tipo uprint SE plus). Si se realiza mas de 5 prototipos es mas conveniente comprar el material necesario para la impresora, lo que genera un reducción de costos.

Referencias

- [1] D. R. Brooks, *Bringing the Sun Down to Earth*. Nueva York, United States of America: Springer, 2008.
- [2] J. M. Wallace and P. V. Hobbs, *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, 2nd ed. Springer, 2008.
- [3] A. Bucholtz, *Applied Optics*, no. 34, pp. 2765–2773.
- [4] D. Brooks and F. M. Mims, “Development of an inexpensive handheld led-based sun photometer for the globe program,” *Journal of geophysical research*, vol. 105, pp. 4733–4740, 2001.
- [5] D. Muñoz Ortiz. (2012) Manual de armado: Armarduino. [Online]. Available: http://olimex.cl/website_MCI/static/documents/Manual_de_Armado_Armarduino.pdf

Anexos

A. Materiales prototipo.

La tabla A-1 muestra el valor de los materiales utilizados para la construcción del prototipo. Se muestra el precio según valor unitario de los materiales (solo material utilizado) y según el precio del formato comercial de los materiales.

Anexos

Tabla A-1: Costos de materiales para prototipo según precio unitario y precio en formato comercial.

| Materiales construcción prototipo | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------|----------|-----------------------|--------------------|--------------------------------|
| N | Nombre | Unidad | Cantidad | Precio Unitario (CLP) | Precio total (CLP) | Precio formato comercial (CLP) |
| 1 | Materiales plásticos | | | | | |
| | Piezas 3D | - | 1 | 100000 | 100000 | 100000 |
| | Tapas tubería 75 mm | un | 2 | 415 | 830 | 830 |
| | Tubería 75 mm | m | 0.2 | 760 | 152 | 760 |
| 2 | Electrónica programable | | | | | |
| | Arduino Logger Shield | un | 1 | 16990 | 16990 | 16990 |
| | Armaduino | un | 1 | 11990 | 11990 | 11990 |
| | Sensor de presión barométrica BMP180 | un | 1 | 8990 | 8990 | 8990 |
| | Sensor de aerosoles | | | | | |
| | Capacitor 0.1 uF | un | 1 | 55 | 55 | 110 |
| | Capacitor 10 uF | un | 1 | 26 | 26 | 52 |
| | LED amarillo | un | 1 | 290 | 290 | 2900 |
| | LED azul | un | 1 | 180 | 180 | 1800 |
| | PCB sensor | un | 1 | 1148,6 | 1148,6 | 11486 |
| | PIN header macho | un | 4 | 8,33 | 33,32 | 332 |
| | Resistencia 1.5 MOHMS 1/4 1% | un | 2 | 17,85 | 35,7 | 178,5 |
| | Resistencia 10 MOHMS 1/4 1% | un | 2 | 17,85 | 35,7 | 178,5 |
| | TLC 272 IP | un | 1 | 1517,25 | 1517,25 | 1517,25 |
| | Interfaz usuario | | | | | |
| | Capcitor 0,1 uF | un | 1 | 55 | 55 | - |
| | Pantalla LCD 16x2 | un | 1 | 7090 | 7090 | 7090 |
| | PCB interfaz | un | 1 | 1148,6 | 1148,6 | 11486 |
| | PIN header macho | un | 16 | 8,33 | 133,28 | - |
| | PIN header macho L | un | 20 | 15,53 | 310,59 | 621,18 |
| | Pulsadores | un | 3 | 300 | 900 | 900 |
| | Resistencia 1 KOHMS 1/4 | un | 2 | 16,66 | 33,32 | 166,6 |
| | Resistencia 10 KOHMS 1/4 | un | 4 | 17,85 | 71,4 | 178,5 |
| | Resistencia 220 OHM | un | 1 | 17,85 | 17,85 | 178,5 |
| | Switch clásico | un | 1 | 300 | 300 | 300 |
| | Ubicación de sensores | | | | | |
| | PCB | un | 1 | 1148,6 | 1148,6 | 11486 |
| | Buzzer | un | 1 | 1190 | 1190 | 1190 |
| | Molex 4 pines macho | un | 1 | 50 | 50 | 50 |
| | Molex 2 pines macho | un | 1 | 25 | 25 | 25 |
| | PIN header dos pisos macho | un | 28 | 32,84 | 919,632 | 1313,76 |
| | PIN header Hembra 5x1 | un | 1 | 40 | 40 | 40 |
| 3 | Energía | | | | | |
| | Bateria 9V | un | 1 | 2500 | 2500 | 2500 |
| | Pila CR 1225 | un | 1 | 1290 | 1290 | 1290 |
| 4 | Almacenamiento | | | | | |
| | Tarjeta micro SD | un | 1 | 3500 | 3500 | 3500 |
| 5 | Conectores internos | | | | | |
| | Cable cinta color | m | 0,15 | 4000 | 600 | 4000 |
| | Cables de alimentación | m | 0,1 | 90 | 9 | 90 |
| | Conector batería 9V | un | 1 | 250 | 250 | 250 |
| | Molex 4x1 hembra | un | 3 | 33 | 33 | 33 |
| | PIN header Hembra 5x1 | un | 3 | 50 | 150 | 150 |
| | PIN header Hembra 10x1 | un | 1 | 80 | 80 | 80 |
| | PIN header Hembra 4x1 | un | 3 | 40 | 120 | 120 |
| | Terminal Molex | un | 4 | 20 | 80 | 400 |
| | Terminales PIN header hembra | un | 40 | 20 | 800 | 800 |
| | Housing slim | un | 18 | 22,61 | 406,98 | 406,98 |
| 6 | Ensamblaje | | | | | |
| | Perno 5/32"x1/2" parker | un | 8 | | | |
| | Perno cónico 3mmx20mm parker | un | 7 | | | |
| | Pernos 2mmx8mm | un | 3 | | | |
| | Pernos 3mmx6mm | un | 6 | | | |
| | Tuerca cuadrada 1/8" | un | 4 | | | |
| | Tuerca cuadrada 1/4" (tripode) | un | 1 | | | |
| | Total: | | | 2000 | 2000 | 2000 |
| 7 | Insumos | | | | | |
| | Soldadura con plomo | un | 1 | 790 | 790 | 790 |
| | Total (CLP): | | | - | 168290,8 | 209524,8 |