



UNIVERSIDAD DE CHILE

MANUAL
“DOCUMENTACIÓN FOTÓMETRO”

SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2016

Índice

1. 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. Descripción general	4
2.2. Funcionamiento	7
2.3. Systems	8
2.3.1. Electronic components	8
2.3.2. 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. Carcaza 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	55
Anexo A. Materiales prototipo.	55

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 [?]. La contribución de la dispersión y absorción en la reducción de la radiación directa es linearmente 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 [?].

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 [?]:

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

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 [?].

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 [?], 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

2.1. Descripción general

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 2.1 Descripción general

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.

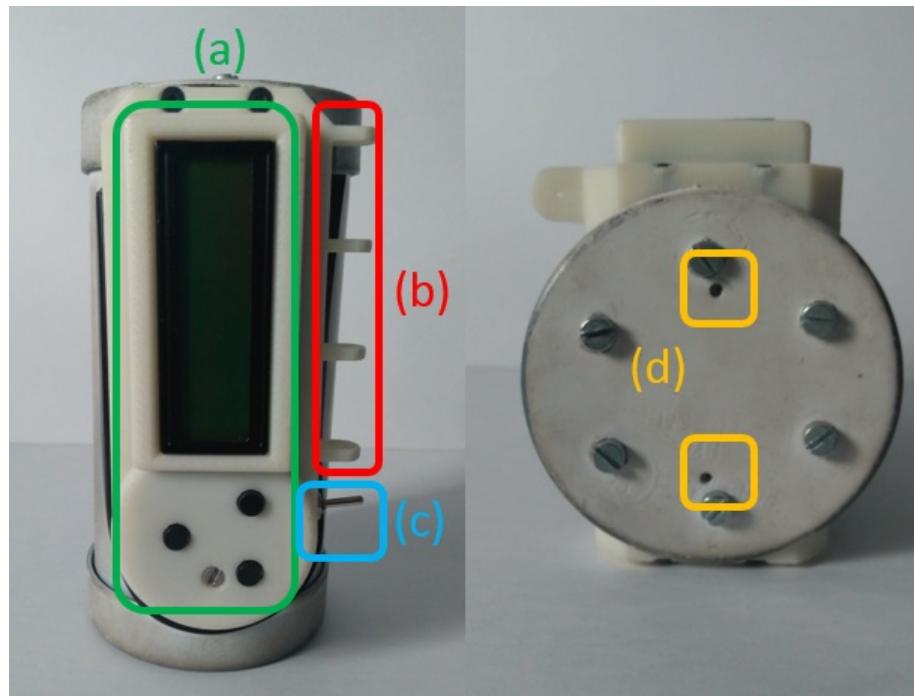


Figura 2.1: Ensamblaje externo del prototipo de fotómetro: (a) Panel de Control, (b) Mira Solar, (c) Switch Encendido/Apagado, (d) Entrada de luz.

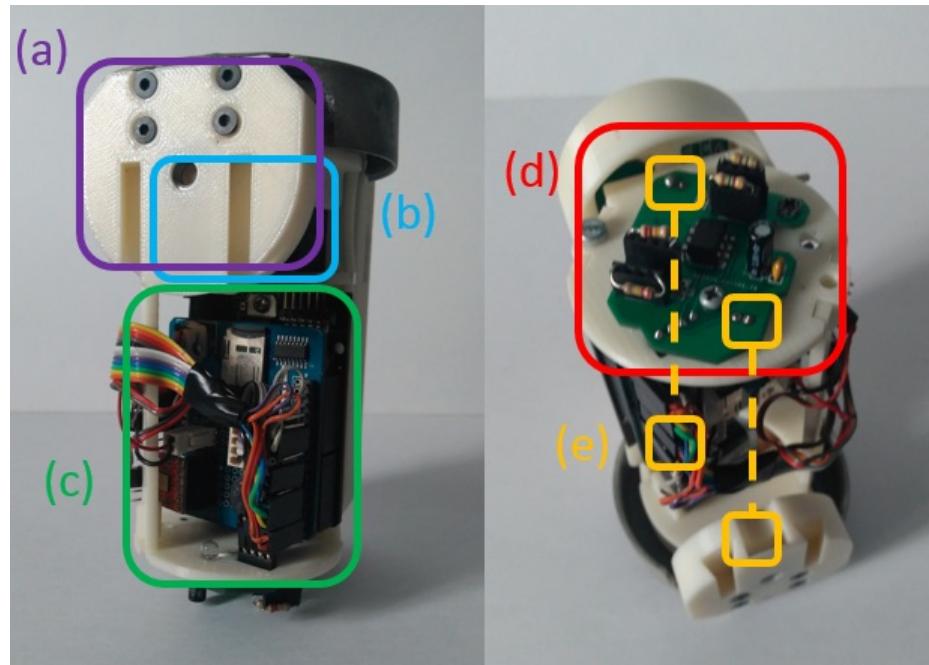


Figura 2.2: Componente externa: (a) Adaptador para trípode y Sistemas internos del prototipo de fotómetro: (b) Batería, (c) Armaduino (versión de Arduino Uno) con Data Logger, (d) Sensor, (e) Posición de LED (superior) y entrada de luz (inferior).

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	

2.2. 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

2.3. Systems

2.3.1. Electronic components

(i) Aerosol Sensor

The objective of the sensor is to quantify the light intensity received from the sun in a small wavelength span which is determined by the LEDs used. LEDs generate a current linearly proportional to the light intensity they receive in their wavelength sensitivity band.

In most cases the current generated by the LED is small, in the order of the microamperes. Because of this the use of an amplifier circuit is essential. The function of this circuit is to map this small current into a larger voltage signal, which must be within a range easy to measure and register.

The amplifier circuit is composed by a TLC272 Operational Amplifier, which is powered using the 5 [V] source from the Armaduino board. The output of the circuit is an analog voltage within the range of 0 to 4.2 [V]. This signal is transmitted to the pin A1 of the Armaduino board. Pin A1 has an analog to digital converter (ADC) capable to measure voltages in the range between 0 and 5 [V] with a 10 bit resolution.

Figure 2.3 shows the sensor circuit components. The resistances shown in Figure 2.3 are of a referential value and depend on the model of LED used. These resistances allow the modification of the amplification magnitude following the next relationship:

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

Considering the fact that the amplifier output range is limited it is important to limit the value of R_1 so that the sensor doesn't reach the saturation level in the output (4.2 [V]) under operative conditions. The inclusion of two resistance sockets in series for the amplification feedback allows a more flexible determination of the resistance values to use in the circuit.

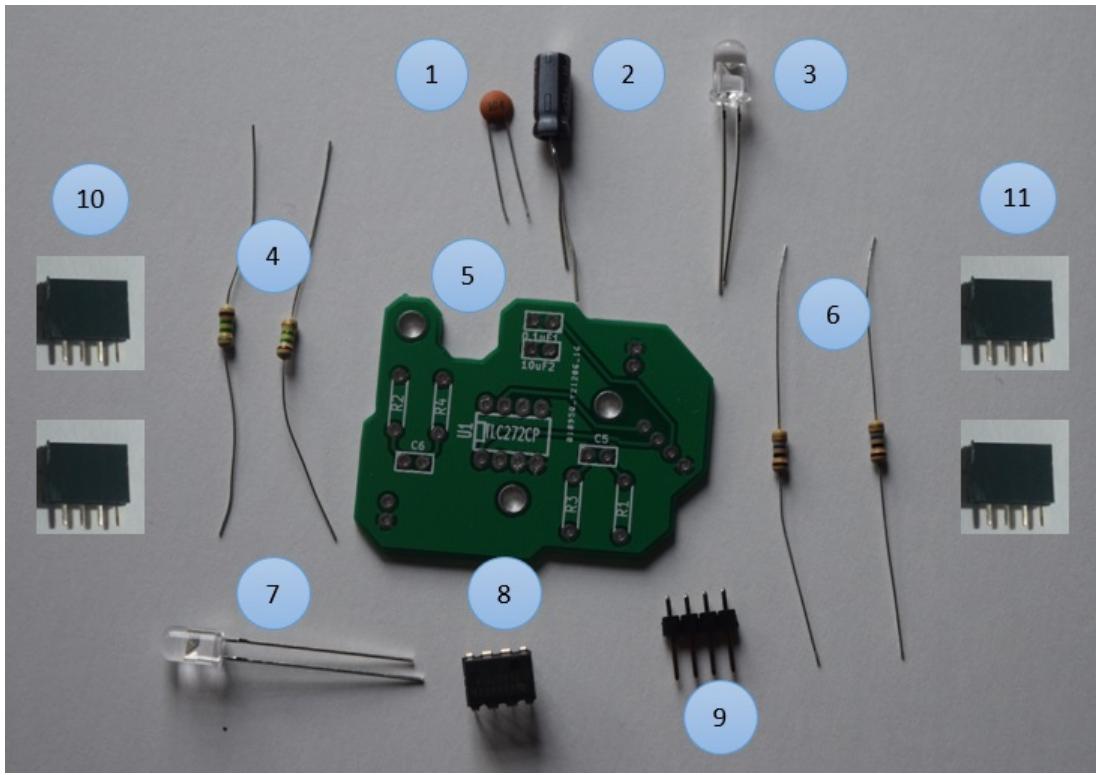


Figura 2.3: Aerosol sensor components: (1) Capacitor 0.1 [μF], (2) Capacitor 10 [μF], (3) Yellow LED, (4) Resistance 1.5 [$\text{M}\Omega$], (5) Sensor PCB, (6) Resistance 10 [$\text{M}\Omega$], (7) Blue LED, (8) TLC272CP, (9) Male Pin Header 4x1, (10,11) Female Pin Header 4x1.

Female pin headers are soldered to the sensor PCB in the R1, R2, R3 and R4 footprints. This way it will be possible to interchange resistances easily by connecting and disconnecting them from the pin connector. This is useful to test different amplification configurations. Figure 2.4 shows how to properly connect the resistance. It is important to note that before soldering this connector to the PCB the two middle copper connectors must be removed.

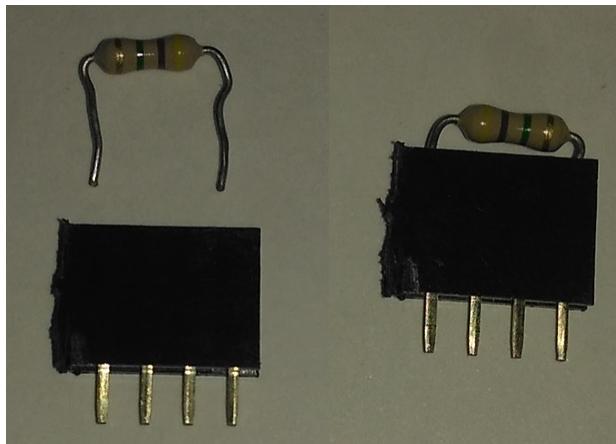


Figura 2.4: Resistance connection on the female pin header 4x1.

To determine the best resistances configuration it is recommended to follow the next procedure: Measure the maximum output voltage of the sensor at noon (solar maximum height in the sky) with a clear line of sight to the sun. R_1 of equation 2.1 must be tuned to obtain an output signal of $\approx 75\%$ of the maximum output in the aformentioned conditions.

In the following pages the location of the sensor PCB components is explained, using the board footprints shown in figure 2.5 as a reference.

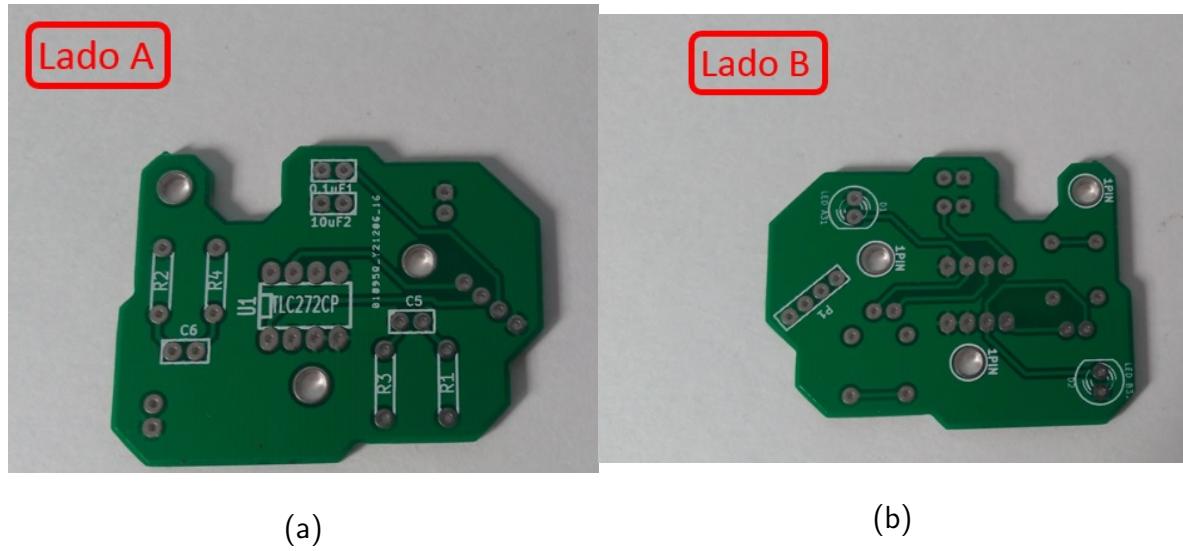


Figura 2.5: Sensor PCB: (a) Side A, (b) Side B.

Side A:

- 0.1uF1: Capacitor 0.1 [μF].
 - 10uF2: Capacitor 10 [μF].
 - R2 y R4: Female pin header 4x1 (Resistances of 1.5 [$\text{M}\Omega$]).
 - R1 y R3: Female pin header 4x1 (Resistances of 10 [$\text{M}\Omega$]).
 - U1 (TLC272CP): TLC272CP Operational Amplifier.

Side B:

- LED A31: Yellow LED.
 - LED B31: Blue LED.
 - P1: Male pin header 4x1.

Figure 2.6 shows the aerosol sensor fully assembled. For more constructive details please look at the section 3 (Prototype building).

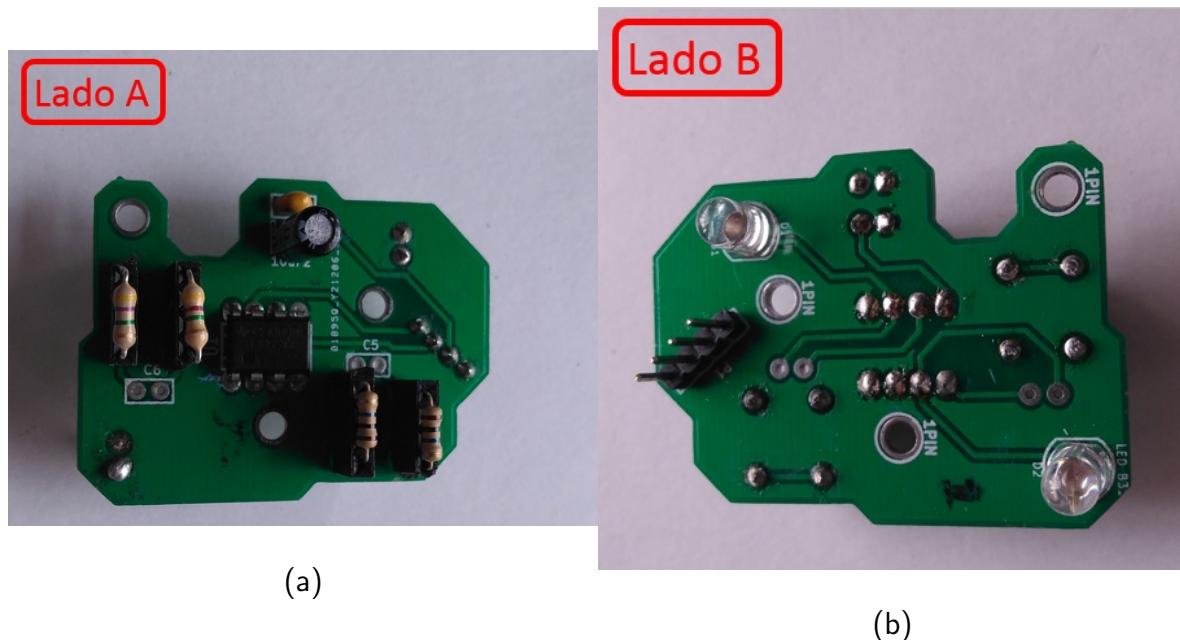


Figura 2.6: Assembled aerosol sensor: (a) Side A, (b) Side B.

(ii) User interface

The user interface system contains all the necessary components to interact with the sun photometer. Figure 2.7 shows its components. The switch (8) of figure 2.7 is used to turn the Armaduino on and off. The buttons (5) allow the user to choose between the programmed functions in the controller board (test mode, measurement and data extraction). The LCD screen (9) is used to provide a visual feedback on the instrument state: (1) Test mode: indicates the measured voltage in the sensors, (2) Measurement: prints the message "measuring" during the data acquisition and then the maximum voltages registered for each sensor at the end of the sample time and (3) Data extraction: prints the message ".Extracting data" while the instrument sends the information stored in the memory to the computer.

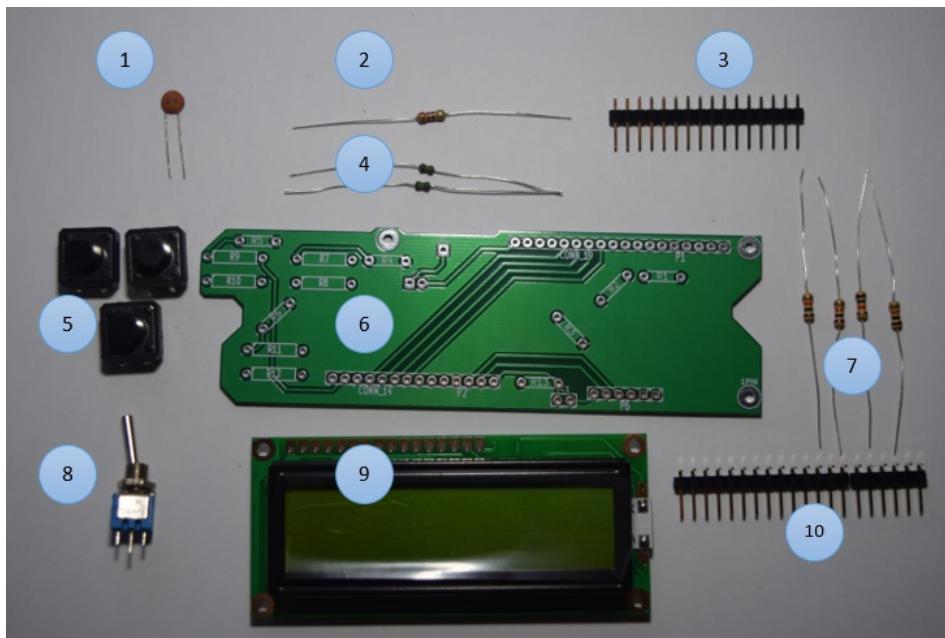


Figura 2.7: User interface components: (1) Capacitor $0.1 \mu\text{F}$, (2) Resistance 220Ω , (3) Male pin header 16×1 , (4) Resistances $1 \text{ k}\Omega$, (5) Pushbuttons, (6) Interface PCB, (7) Resistances $10 \text{ k}\Omega$, (8) Switch, (9) LCD screen 16×2 , (10) Right angled male pin header 20×1 .

Before soldering it is important to separate the right angled male pin header in two parts: one of 14×1 and the other of 6×1 pins. The location of the interface PCB components is described in the next figure, using the board footprints of figure 2.8 as a reference.

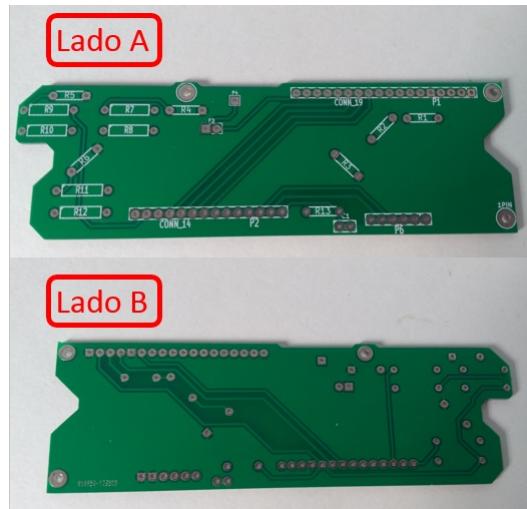


Figura 2.8: Interface PCB faces: (a) Side A, (b) Side B.

Side A:

- R1 y R2: Resistance of 1 [$k\Omega$].
- R3: Resistance of 220 [Ω].
- R4, R5, R6 y R13: Resistances of 10 [$k\Omega$].
- CONN_14-P2: Right angled male pin header 14x1.
- P6: Rigth angled male pin header 6x1.
- C1: Capacitor 0.1 [μF]

Side B (Footprints on side A):

- CONN_19-P1: Male pin header 16x1 soldered to the LCD screen connectors.
- R7-R8: Button.
- R9-R10: Button.
- R11-R12: Button.

Figure 2.9 (a) illustrates how to connect the LCD screen to its corresponding pin headers and figure 2.9 (b) shows the Armaduino fully assembled. For more details on the construction check section 3.

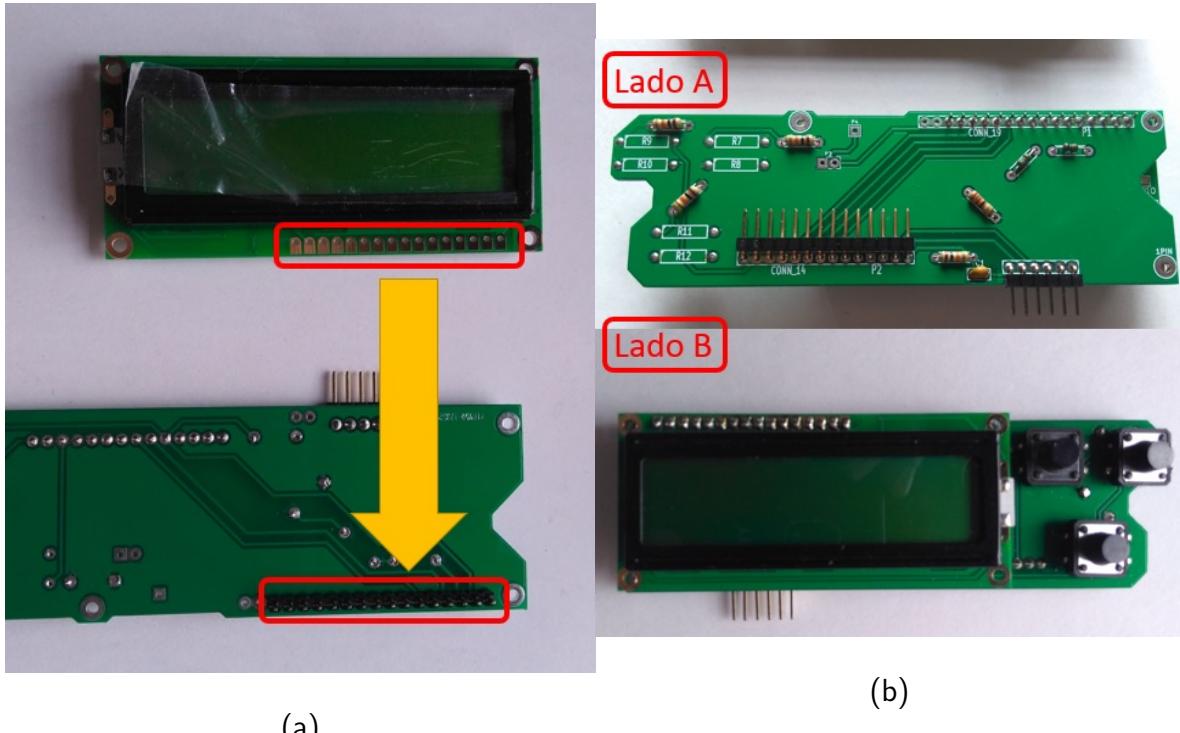


Figura 2.9: Assembled user interface: (a) Solder the LCD screen to P1 pins, (b) Side A complete (top) and Side B complete (bottom).

(iii) Armaduino and Data Logger

This system is divided in three sub-systems: (1) Armaduino, (2) Data logger, (3) Data logger elements:

(a) Armaduino

Armaduino is a custom version of the Arduino UNO designed and produced by the chilean company Ingeniería MCI Ltda. It is a prototyping board implemented with the microcontroller ATmega328. As the Arduino UNO, it has 14 digital pins for digital input/output, 6 analog voltage measurement pins and 6 power pins. The main technical reason to use this board instead of the Arduino UNO is that it uses an FTDI port for program loading. Since this

port only uses pins already included in the board it enabled an easy way to extend the programming and communication port to the interface panel. This approach does not work with the Arduino UNO because it has some limitations on the external use of the reset pin. Another reason to choose this board is that it increases the educational value of the instrument. Since the components have to be soldered by hand it provides a good oportunity to explain the students the electronic components of a microcontroller board.

The power pins are the following:

- VIN: voltage input when the board works with an external power source.
- 5V: regulated power source for the microcontroller and other board components.
- 3V3: regulated power source of 3.3 [V].
- GND: ground pins.

Each of the 14 digital pins in Armaduino can be used as input or output with the available functions in the Arduino IDE¹. These pins operate with a 5 [V] logic and can provide or receive a maximum current of 40 [mA]. Some of these pins have special functions:

- Serial (0 (RX) and 1 (TX)): used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data.
- External interrupts (2 y 3): these pins can be configurated to generate or interrupt a process, or to change a variable value.
- PWM (3, 5, 6, 9, 10 y 11): can output an 8-bit PWM signal if programmed to do so.
- SPI (10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK)): These pins allow SPI communication.
- LED (13): in the board there is an incorporated LED connected to the digital pin 13. When the pin is set to HIGH the LED turns on, and when is set to LOW the LED turns off. It is usefull to check if the board is working properly.

The 6 analog pins provide a voltage measurement resolution of 10 bits (this is, 1024 different values). By default these pins measure from 0 to 5 [V], being possible to modify this range using the pin AREF. Some of the analog pins also have special functions:

¹The same programming enviroment used for the Arduino UNO

- I^2C (4 (SDA) y 5 (SCL)): used for communication I^2C (TWI) with the Wire library.

The other board's pins are:

- AREF: reference voltaje analógicas for the analogic inputs.
- Reset: can be used to reset the microcontroller (inverse logic).

Armaduino components are shown in figure 2.10. The location of the components in the armaduino PCB (figure 2.10 (15)) are easily determined by reading the PCB footprints. Special care has to be put regarding the polarized components orientation (LEDs, diodes, electrolytic capacitors, sockets and ATmega328). These components position is shown in figure 2.11.

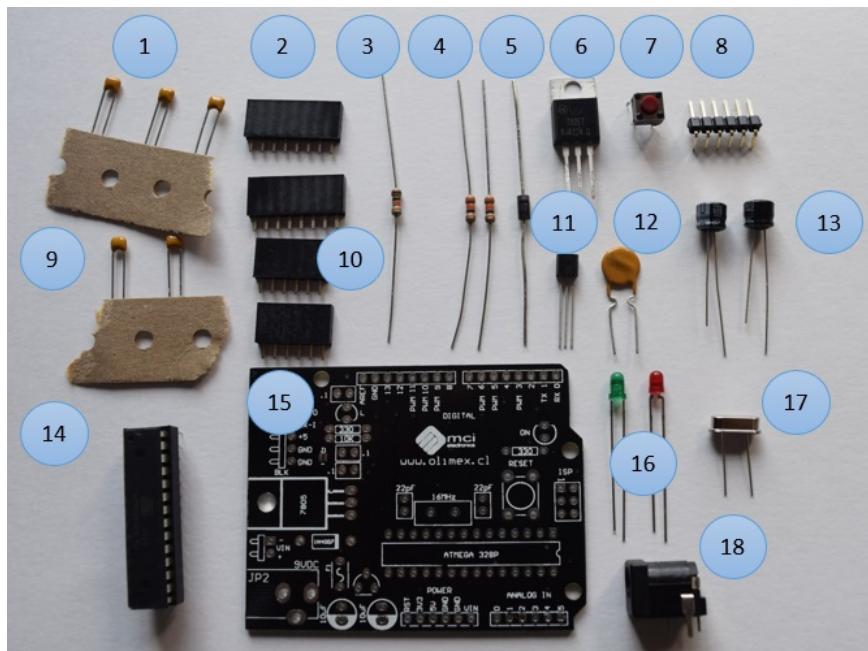


Figura 2.10: Armaduino components: (1) Ceramic Capacitors 0.1 [μF], (2) Female pin header 8x1, (3) Resistance 10 [$k\Omega$], (4) Resistance 330 [Ω], (5) Diode, (6) Voltage Regulator 5 [V], (7) Mini Push Button, (8) Right angle male pin header, (9) Ceramic capacitors 22 [pF], (10) Female pin headers 6x1, (11) Voltage Regulator 3.3 [V], (12) Fuse, (13) Electrolytic capacitors 10 [μF], (14) ATmega328 and Socket, (15) Armaduino PCB, (16) Regular LEDs, (17) Crystal oscillator 16 [MHz], (18) Jack power connector.

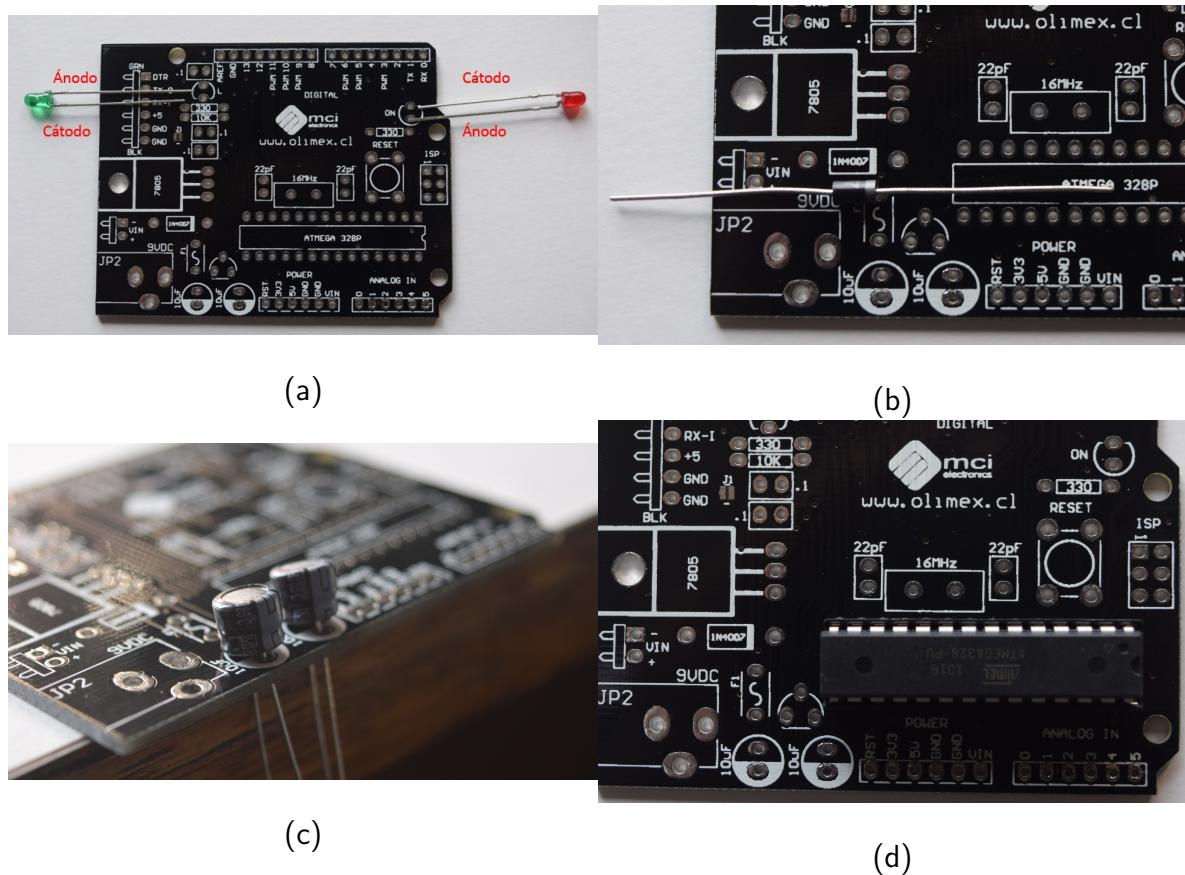


Figura 2.11: Polarized components position: (a) LEDs, (b) Diode, (c) Electrolytic capacitors and (d) Socket and Atmega328.

Figure 2.12 shows the armaduino completely assembled. For more details on the construction go to the section 3: Prototipe building.



Figura 2.12: Assembled Armaduino.

(b) Data Logger

The data logger, shown in figure 2.13, is a shield board that provides the possibility of storing data in a micro SD (figure 2.13 (6)). It is composed by a micro SD connector, a reset button and a mesh of 13x12 pin holes separated by 0.1" for through hole components mounting. In addition it includes a real time clock (RTC) and its battery socket (figure 2.13 (7)) to enable the storing of the date and time of measurement. The battery enables the conservation of the clock time even when the Armaduino is not connected to a power source. This board is used to register events with an associated timestamp in a file inside the SD, depending on the Armaduino software configuration. Finally, the shield uses the digital pins 6, 8, 11, 12, 13, the analog pins 4, 5 and the reset signal of the Arduino.

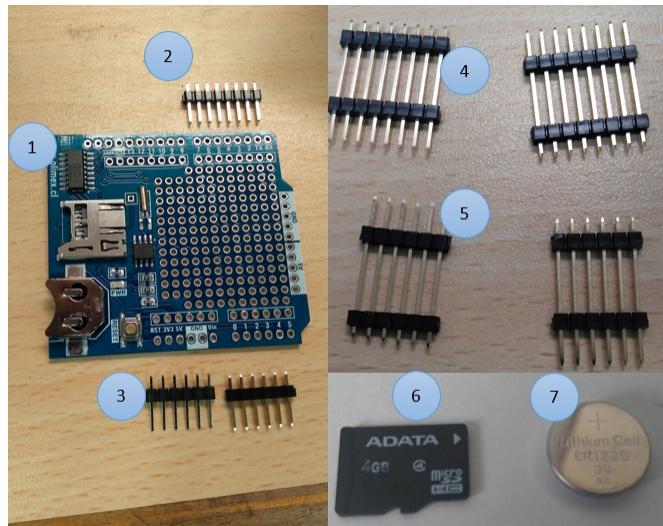


Figura 2.13: Data logger components: (1) Data logger board, (2) Male pin headers 8x1, (3) Male pin headers 6x1, (4) Long male pin headers 8x1, (5) Long male pin headers 6x2, (6) MicroSD card, (7) CR1225 12mm battery.

Figure 2.14 shows the location of the male pin headers in the data logger board (figure 2.13 (1)). Male pin headers (figure 2.14 (b.1) y (b.2)) are used as a board support for the data logger components described in the next section. Long male pin headers (figure 2.14 (a.1) y (a.2)) are used to mount the datalogger over the Aramduino. Prior to installation of these pins the middle plastic line must be removed in order to leave them as one long pin, as shown in figure 2.15. The extracted plastic must be conserved because it will be used for the ensemble of the shield as shown in figure 2.16 (b). After soldering the pins the removed plastic is placed again in the inferior face of the board.

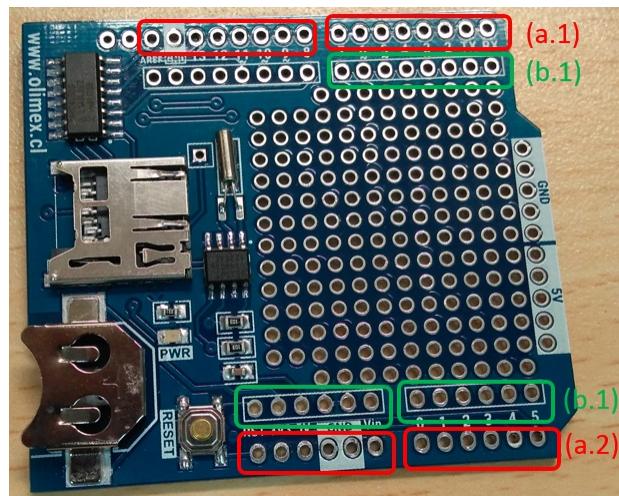


Figura 2.14: Pin location in the data logger board: (a.1) Double male pin headers 8x1, (a.2) Double male pin headers, (b.1) Male pin headers 8x1 and (b.2) Male pin headers 6x1.

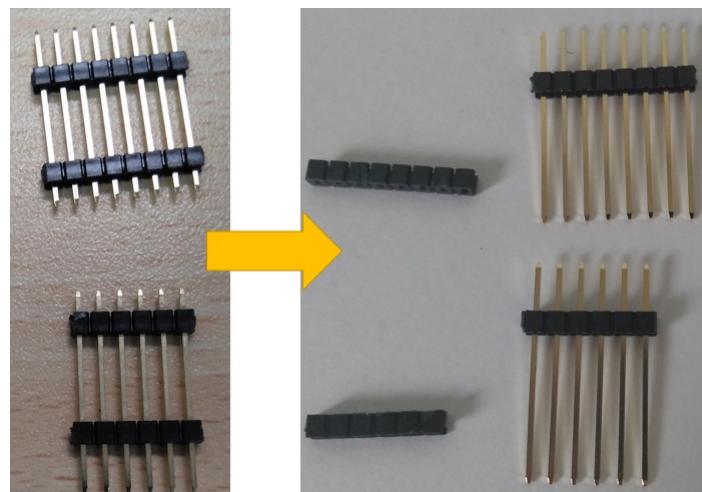


Figura 2.15: Long male pin headers without the middle plastic: Original state (left) and final state (right).

Figure 2.16 shows the Armaduino assembled. For more building details review section 3.

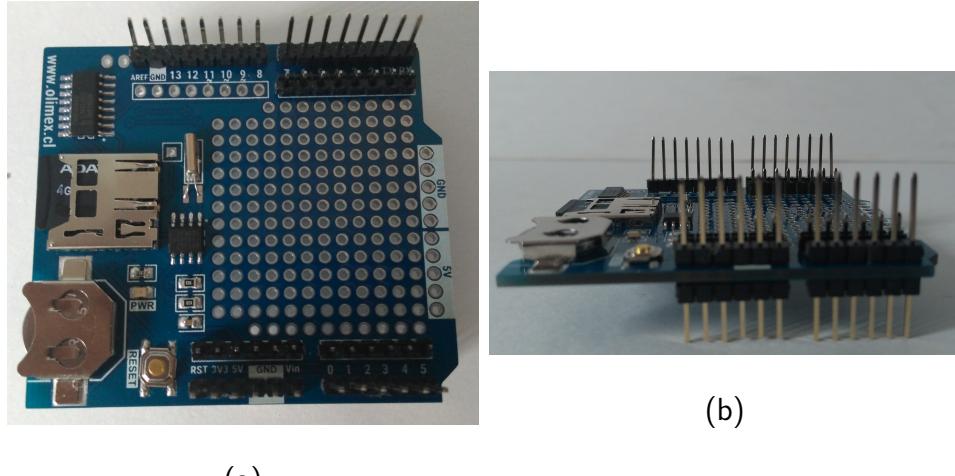


Figura 2.16: Assembled data logger:(a) Top view and (b) Side view.

(c) Data Logger mini-board

This board is used to ease the soldering of components and their connection to the data logger. Figure 2.17 shows the subsystem components. The male molex macho 4x1 (figure 2.17 (2)) is used to communicate the aerosol optical sensor with the Aramduino. The male molex 2x1 (figura 2.17 (6)) is used to provide power the 9V battery power to the Aramduino. The buzzer (figure 2.17 (5)) emits sound feedback for different use cases of the prototype. Finally, the BMP 180 sensor (figure 2.17 (4)) is used to measure pressure and temperature at the time of each AOT measurement.

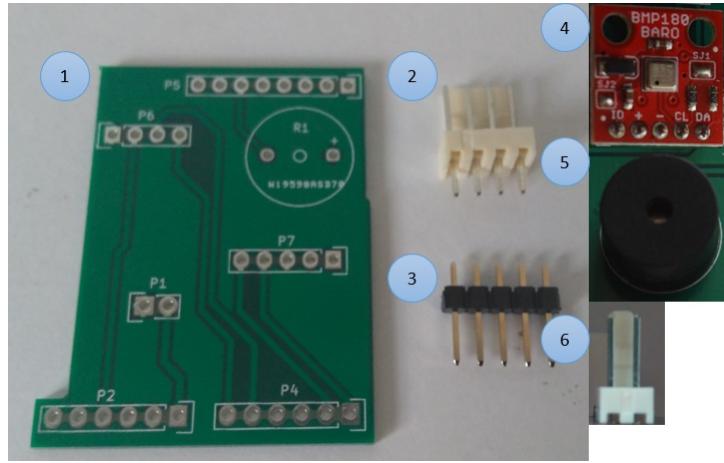


Figura 2.17: Mini-board components: (1) Mini-board, (2) Male Molex 4x1, (3) Male pin header 5x1, (4) BMP180 pressure and temperature sensor, (5) 12mm PCB mountable buzzer 2.048kHz, (6) Male molex 2x1.

Next the location of the components in the mini-board is described. They are referred to the board footprints shown in figure 2.17 (1).

- P6: Male molex 4x1.
- R1: Buzzer (watch the + symbol on the buzzer).
- P7: Male pin headers 5x1. The BMP180 sensor is mounted here.
- P1: Male molex connector 2x1.

Figure 2.18 shows the fully assembled mini-board. For more details on the assembling check section 3.

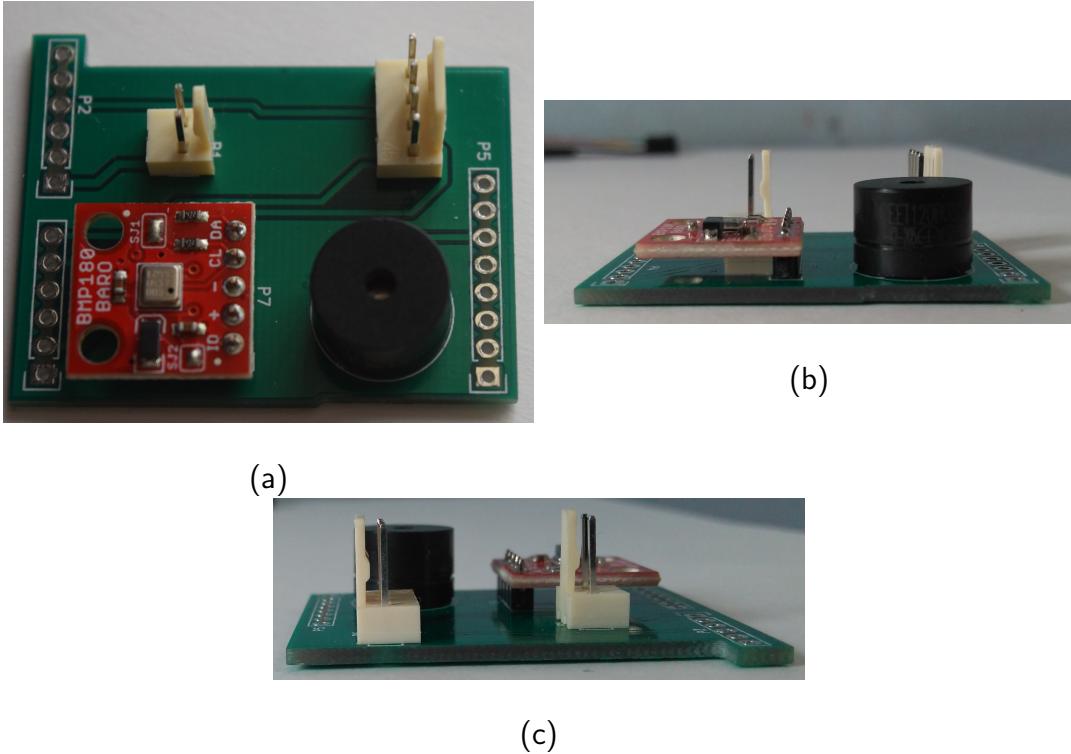


Figura 2.18: Assembled mini-board: (a) Top view, (b) Side view 1 and (c) Side view 2.

(iv) Electrical connections

To communicate all the electronic components between each other it is necessary to connect them using cables. The use of a ribbon cable is highly recommended since it simplifies the identification of each cable through different colors and enables a better use of the space. In figure 2.19 is possible to see a ribbon cable with a Slim Housing of 1x1 in each side (black rectangle). Depending on the cable length it might be necessary to modify it for a better fit in the prototype structure (see section 3).

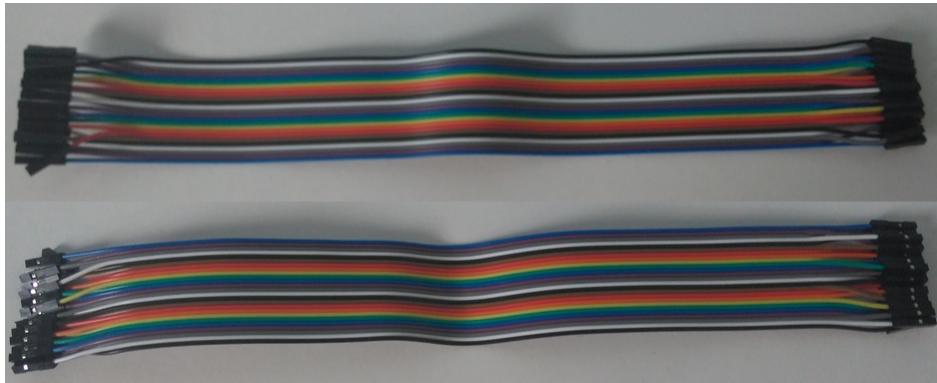


Figura 2.19: Referential ribbon cable.

It is usefull to establish 3 cable sets for the electrical connections:

(iv.1) Battery connection - Switch - Armaduino and Data Logger

To power the Armaduino a connection between the battery, the switch and the affermented board (through the male molex 2x1 soldered in the data logger) must be built. Figure 2.20 shows how should this connection look like. To see more details on the construction check section 3.

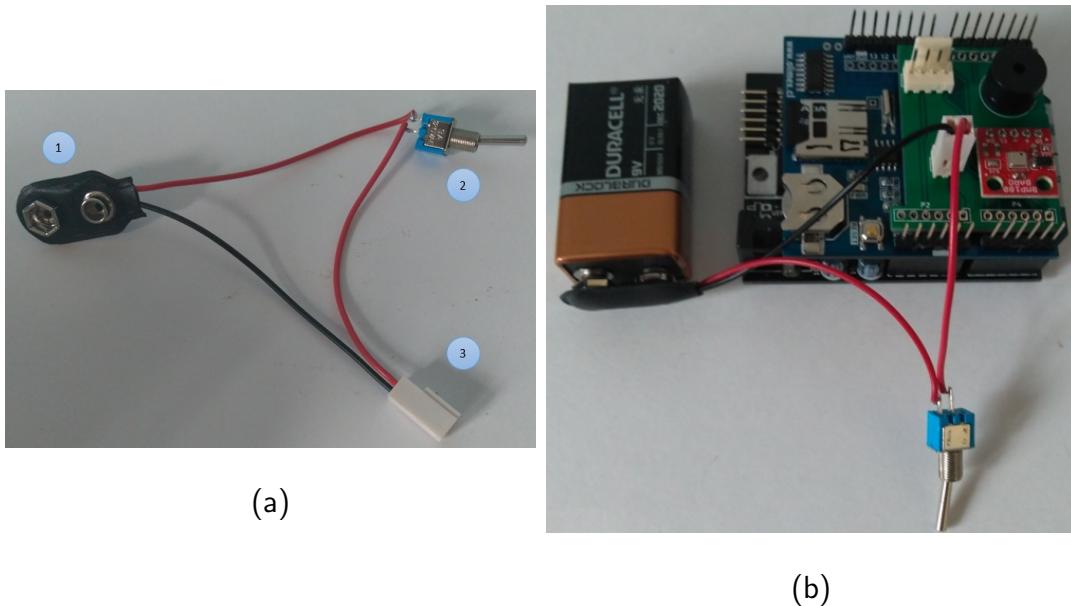


Figura 2.20: Battery connection - Switch - Armaduino and Data Logger: (a) Connection elements: (1) Battery conector, (2) Switch and (3) Female Molex 2x1. (b) Connection.

(iv.2) User interface connection - Armaduino and Data Logger

This connection communicates the user interface with the Armaduino system to enable the screen feedback. It is composed by a total of 14 cables, shown in figure 2.21, connecting the pin headers of the Interface PCB (figure 2.22). The connectors used are referential and is recommended to minimize the amount of independent pieces, i.e. not using only 1x1 connectors. This improves the stability and reliability of the connections between each component.

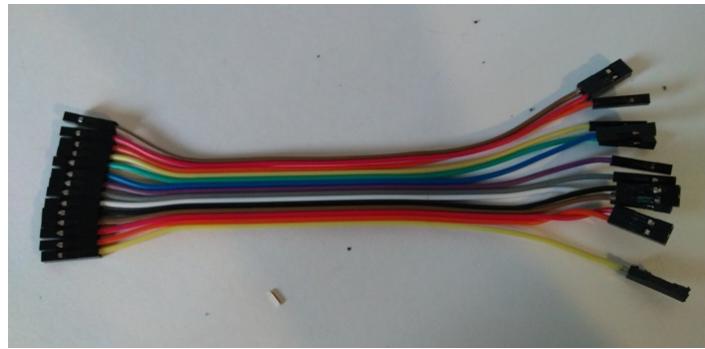


Figura 2.21: Cable connection between the user interface and the Armaduino/Data Logger.



Figura 2.22: Cable connection to the pin headers (footprint CONN_14-P2) of the interface PCB, cables enumerated.

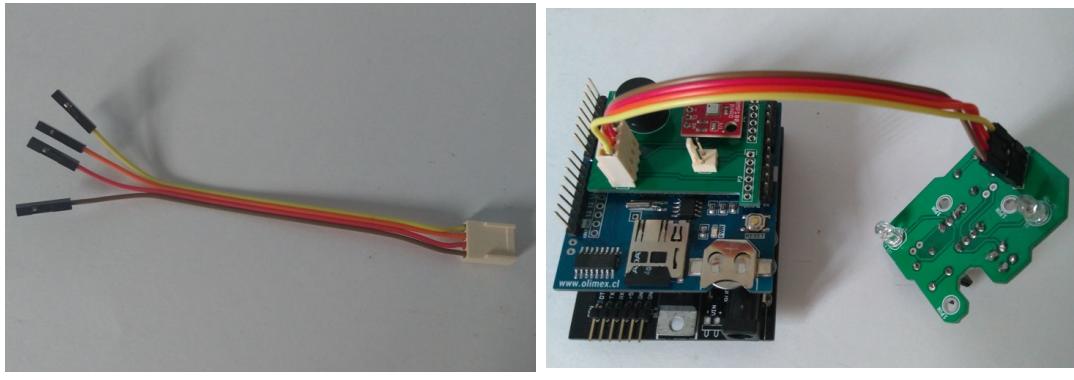
Next is the cable list showing where each labeled cable of Figure 2.22 is connected in the Armaduino:

- Yellow Cable 1 → RST.
- Orange Cable 2 → TX.
- Red Cable 3 → RX.
- Brown Cable 4 → GND.
- Black Cable 5 → 5V.
- White Cable 6 → Digital Pin 9.
- Grey Cable 7 → Digital Pin 10.
- Purple Cable 8 → Digital Pin 6.
- Blue Cable 9 → Digital Pin 4.
- Green Cable 10 → Digital Pin 3.
- Yello Cable 11 → Digital Pin 2.
- Orange Cable 12 → Digital Pin 7.
- Red Cable 13 → Analog Pin 3.
- Brown Cable 14 → Analog Pin 2.

The cables position and instalation is explained with more detail in section 3.

(iv.3) Sensor connection - Armaduino and Data Logger

This bus connects the aerosol sensor with the Armaduino/Data Logger, transfering the amplified voltage measured by each LED for its registering in the microSD card of the datalogger. The connection is shown in figure 2.23, where is possible to see how the cables are connected to the pin headers (P1 footprint in the sensor PCB), and to the male molex 4x1 of the data logger.



(a)

(b)

Figura 2.23: Sensor connection - Armaduino/Data Logger: (a) Cables connection: Left side (Sensor) and right side (Data Logger), and (b) Sensor connection to the Armaduino/Data Logger.

For more building instructions and details check section 3.

2.3.2. 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 carcaza 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 carcaza 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.

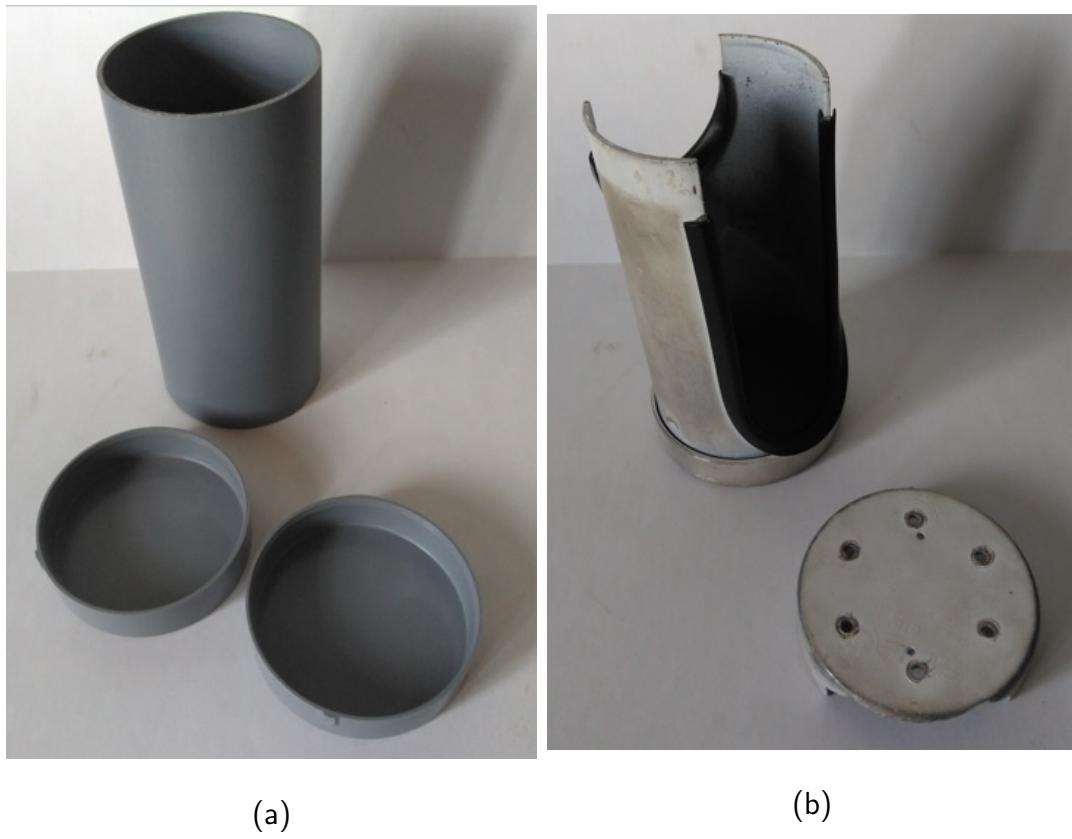


Figura 2.24: Carcasa externa: (a) Estado inicial y (b) Estado final.

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.

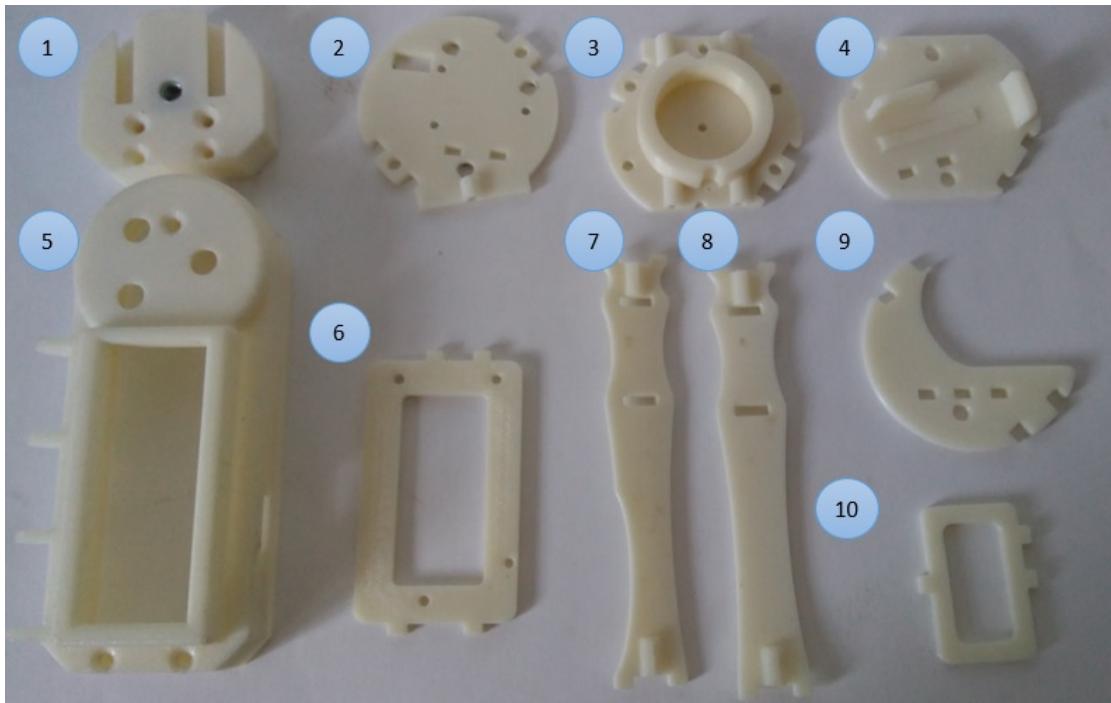


Figura 2.25: Piezas impresas en 3D: (1) Adaptador Trípode, (2) Soporte sensor, (3) Soporte Tapa PVC, (4) Piso Batería, (5) Soporte Panel de Control, (6) Soporte Armaduino, (7) Soporte Lateral 01, (8) Soporte Lateral 02, (9) Piso Armaduino, (10) Soporte Batería.

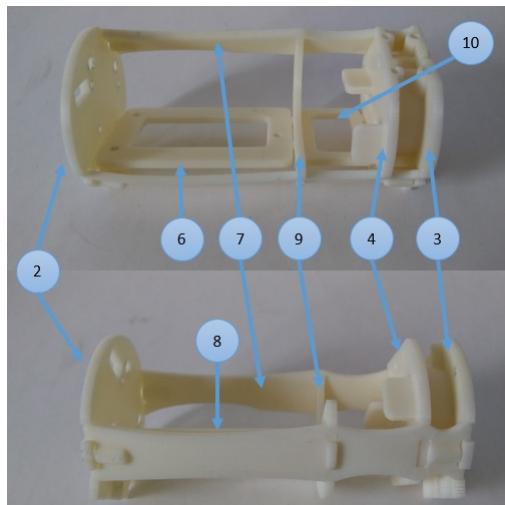


Figura 2.26: Piezas impresas en 3D: (2) Soporte sensor, (3) Soporte Tapa PVC, (4) Piso Batería, (6) Soporte Armaduino, (7) Soporte Lateral 01, (8) Soporte Lateral 02, (9) Piso Armaduino, (10) Soporte Batería.

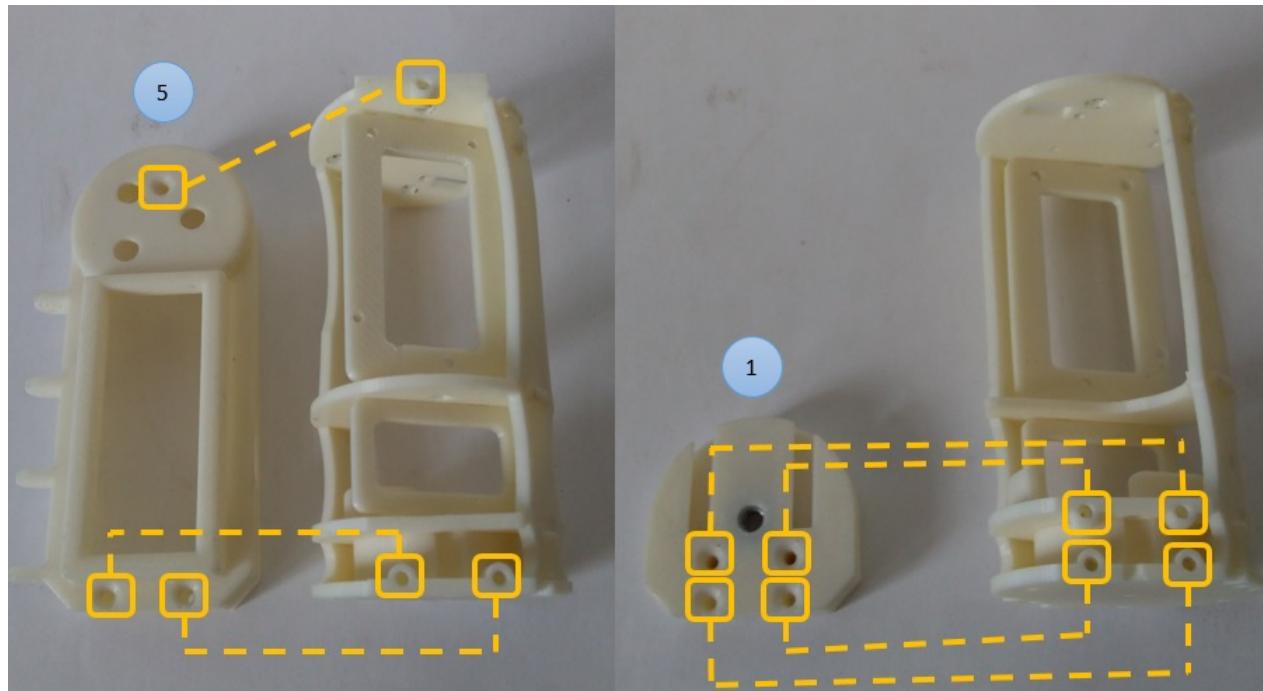


Figura 2.27: Piezas impresas en 3D: (1) Adaptador Trípode, (5) Soporte Panel de Control.

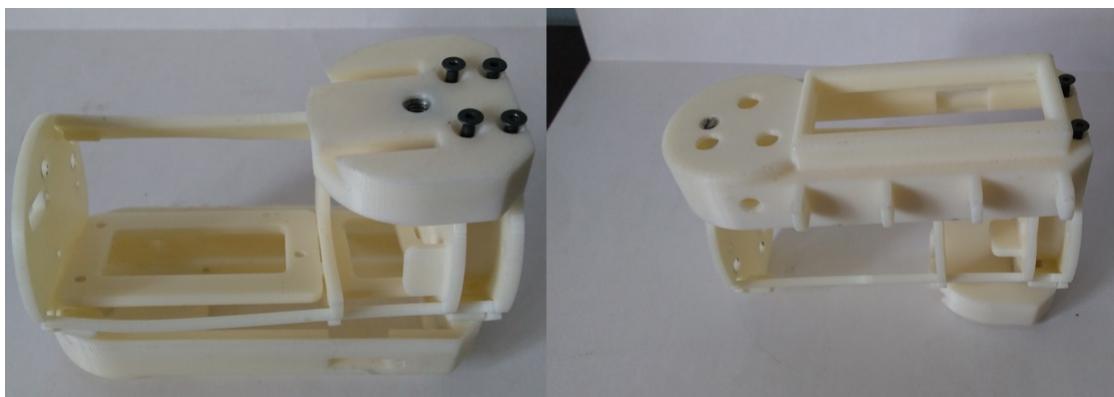


Figura 2.28: Ensamblaje piezas impresas en 3D sin componentes electrónicos.

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).

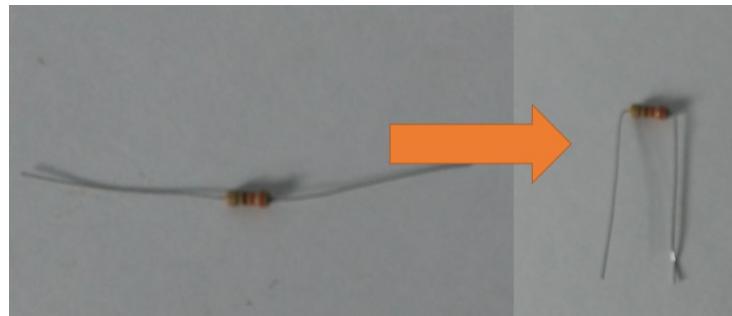


Figura 3.1: Como doblar componente.

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).

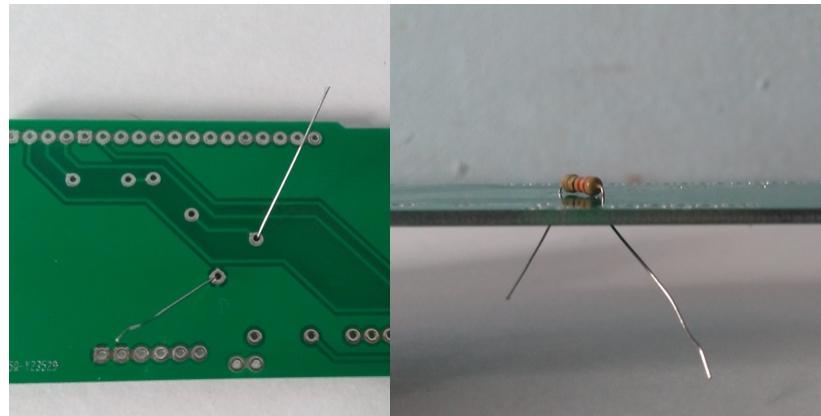


Figura 3.2: Posición del componente en la PCB.

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.

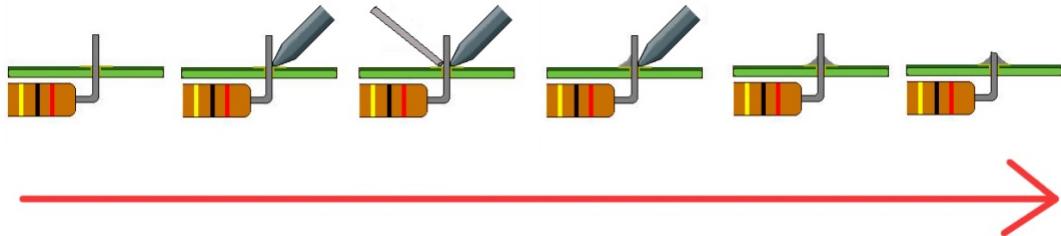


Figura 3.3: Pasos para soldar [?].

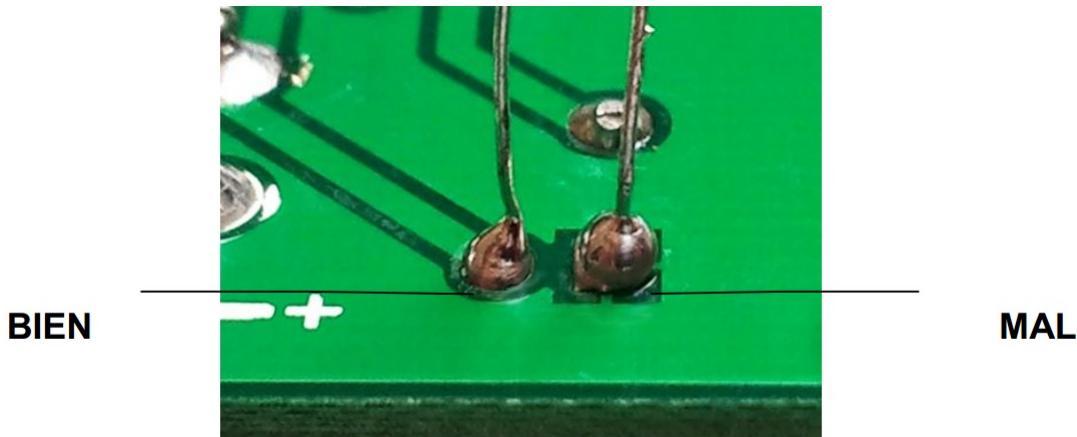


Figura 3.4: Soldadura correcta (izquierda: BIEN) e incorrecta (derecha: MAL) [?].

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 2.3.1.(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

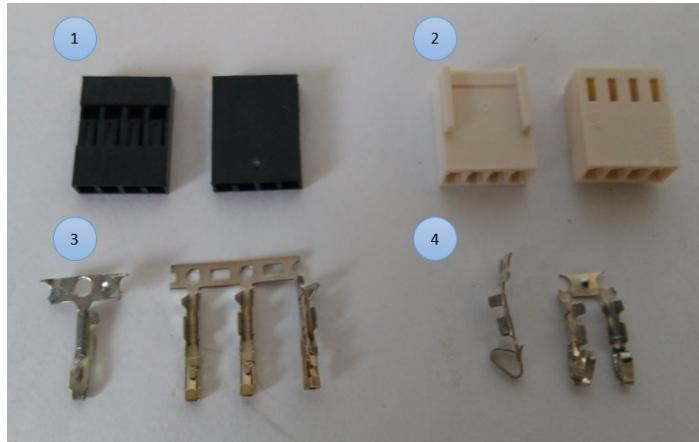


Figura 3.5: Conectores: (1) Housing Slim y (2) Molex hembra, y Terminales: (3) Housing Slim y (4) Molex.

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.

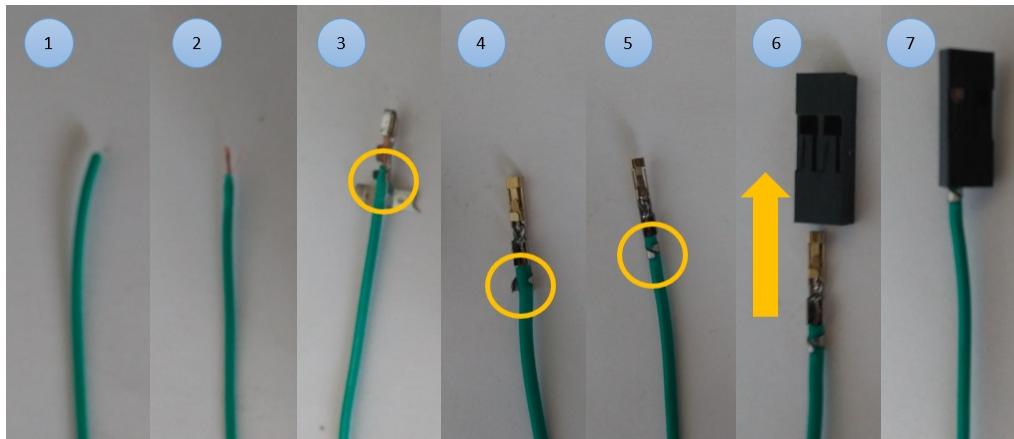


Figura 3.6: Pasos para hacer un conector con Housing Slim.

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.

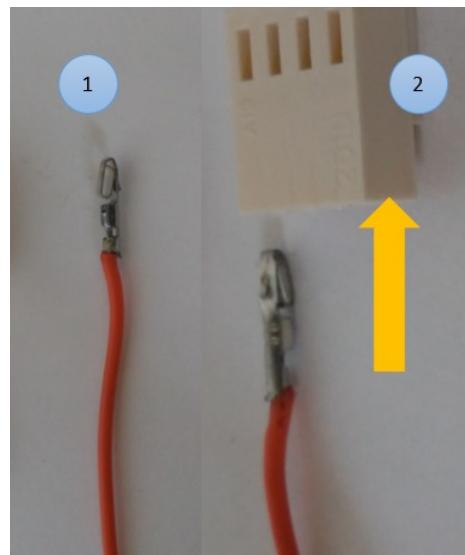


Figura 3.7: Pasos para insertar el terminal molex en el conector molex.

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 Carcasa 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.

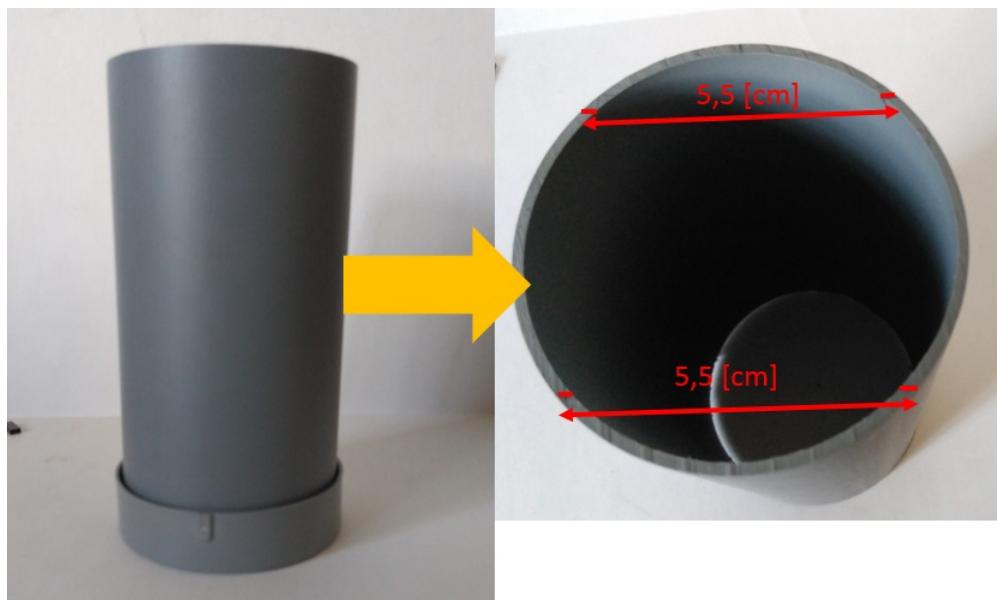


Figura 3.8: Paso 1 carcaza externa (Tubo y tapa).

- 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.

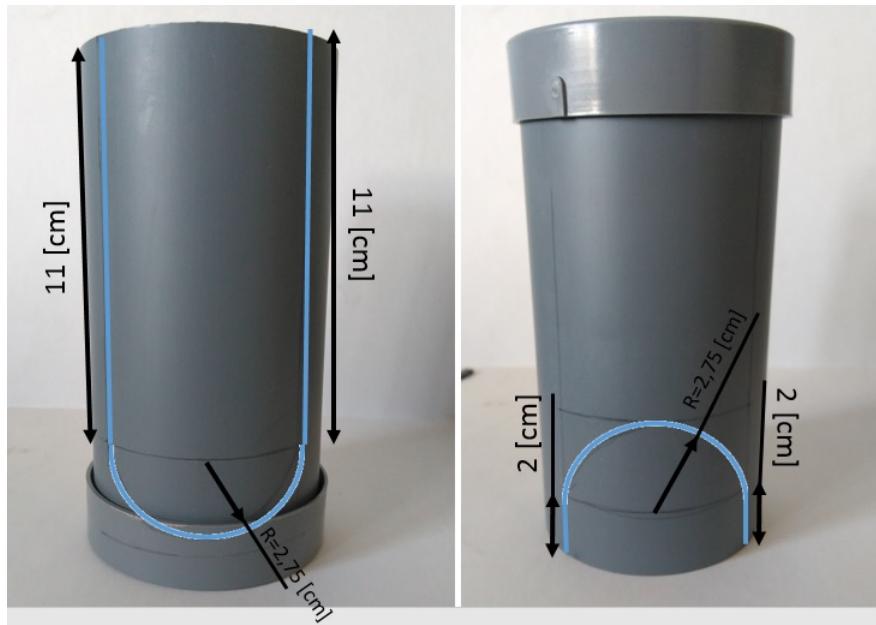


Figura 3.9: Paso 2 carcaza externa (Tubo y tapa).

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.

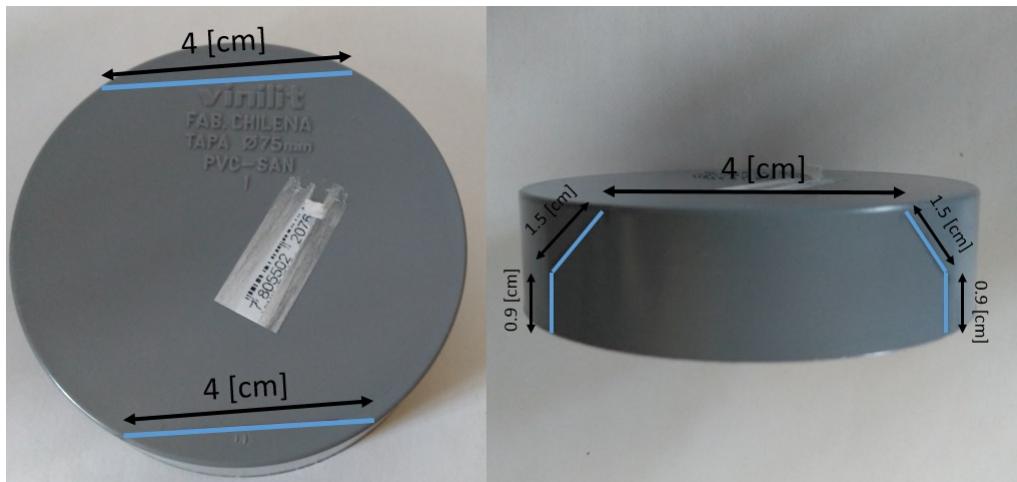


Figura 3.11: Paso 4 carcaza externa (tapa).

- 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.

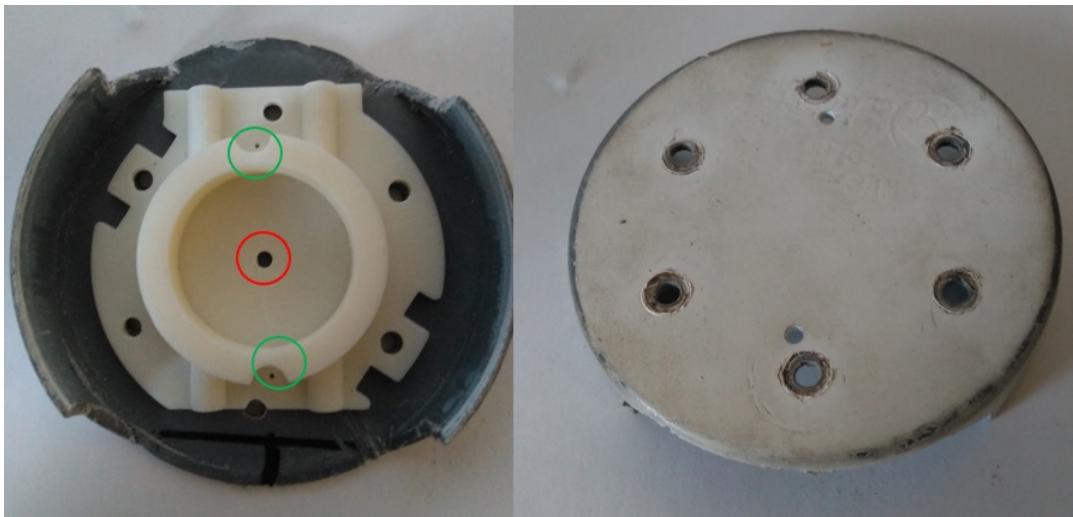


Figura 3.12: Paso 5 carcaza externa (tapa).

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.

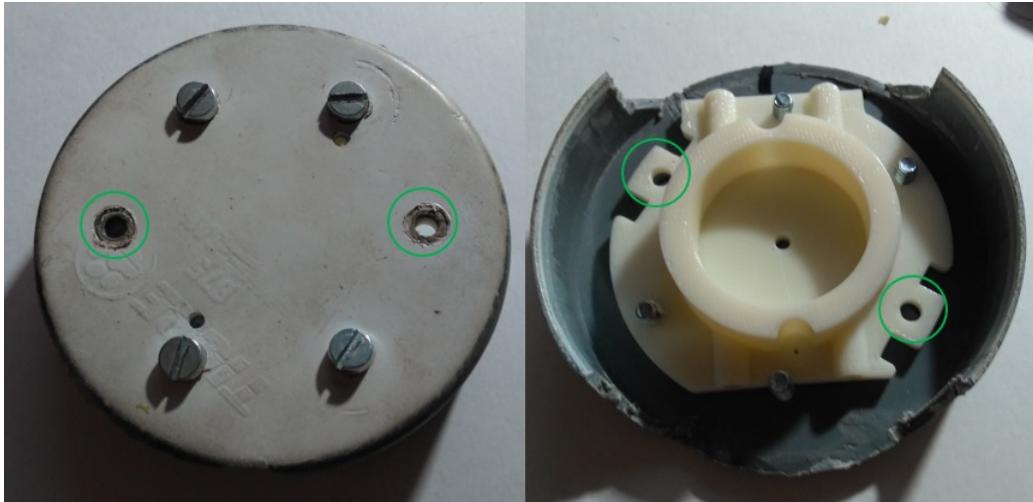


Figura 3.13: Paso 1 Ensamblaje.

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

Sección 3.3 Ensamblaje

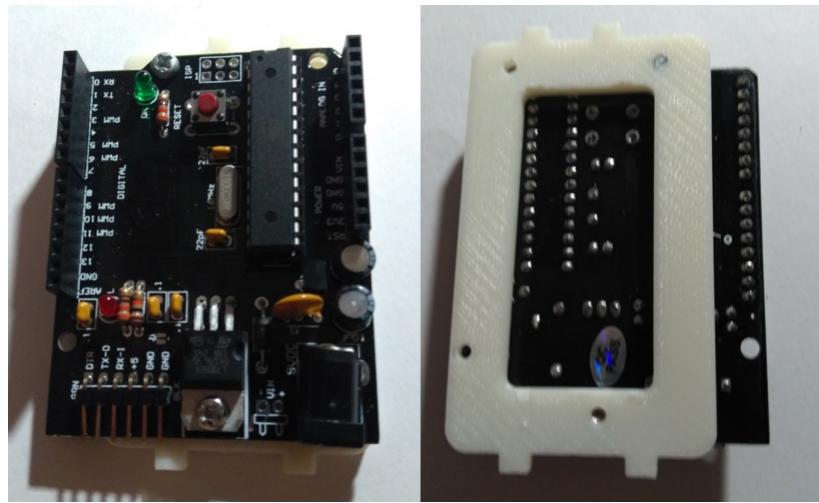


Figura 3.14: Paso 2 Ensamblaje.

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

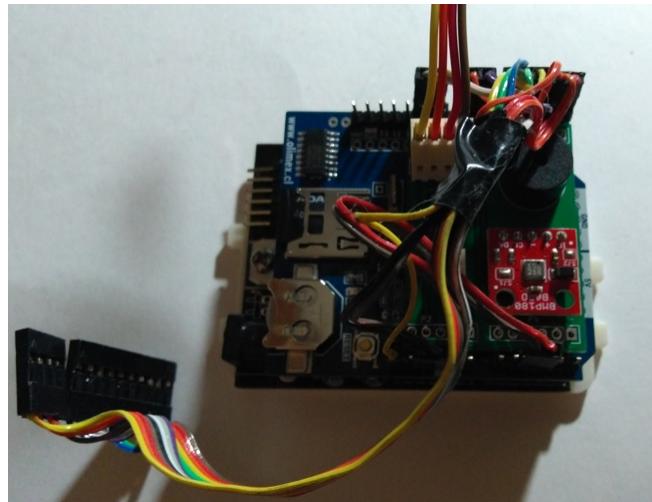


Figura 3.15: Paso 3 Ensamblaje.

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

Sección 3.3 Ensamblaje

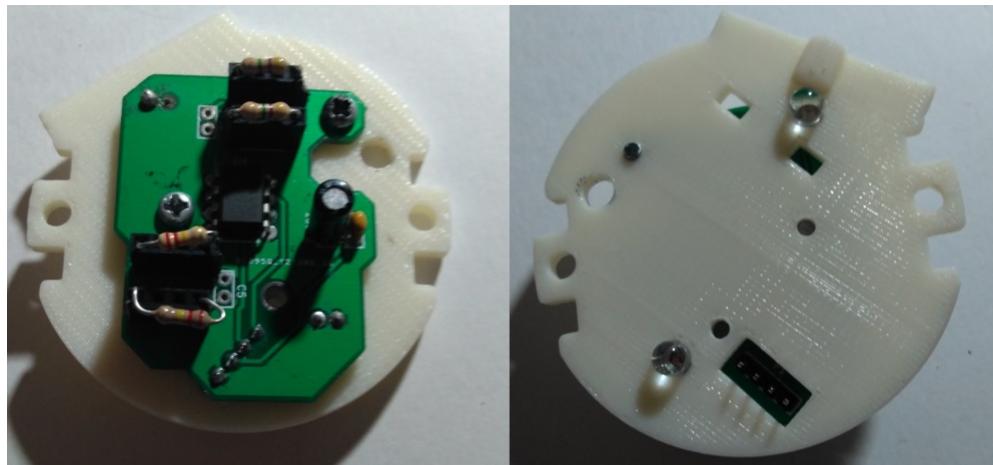


Figura 3.16: Paso 4 Ensamblaje.

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

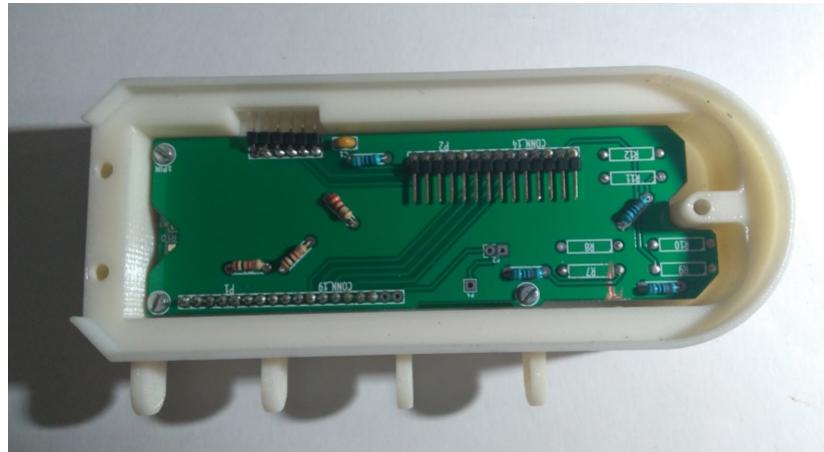


Figura 3.17: Paso 5 Ensamblaje.

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

Sección 3.3 Ensamblaje

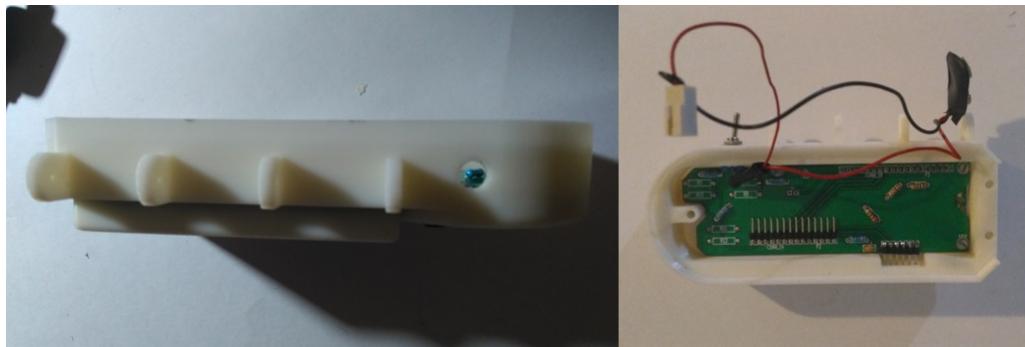


Figura 3.18: Paso 6 Ensamblaje.

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

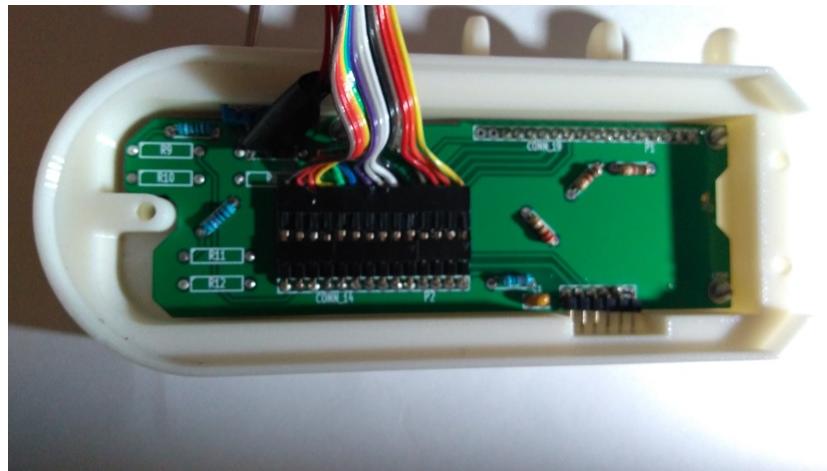


Figura 3.19: Paso 7 Ensamblaje.

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

Sección 3.3 Ensamblaje

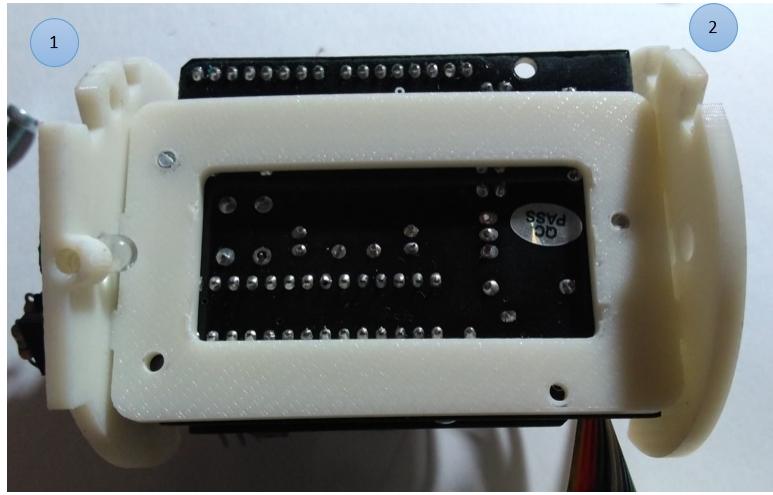


Figura 3.20: Paso 8 Ensamblaje: (1) Soporte Sensor y (2) Piso Armaduino.

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

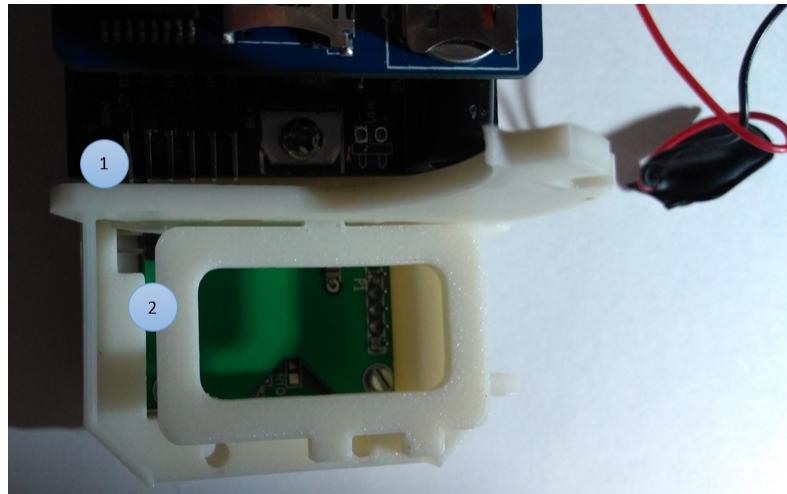


Figura 3.21: Paso 9 Ensamblaje: (1) Piso Armaduino y (2) Soporte Batería.

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

Sección 3.3 Ensamblaje

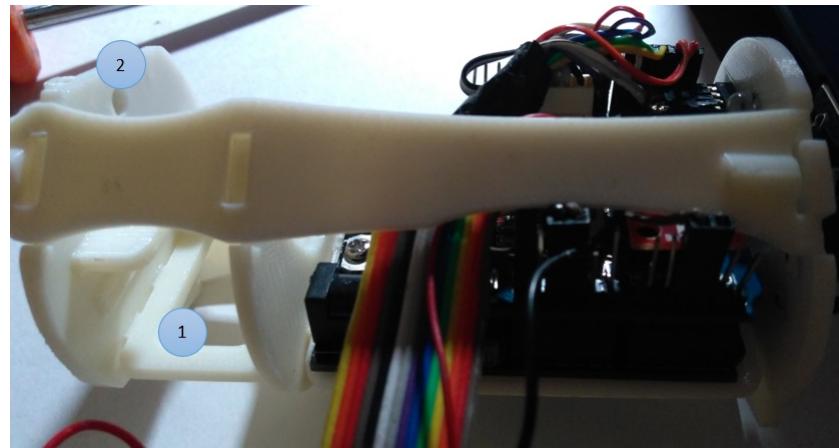


Figura 3.22: Paso 10 Ensamblaje: (1) Soporte Batería y (2) Piso Batería.

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

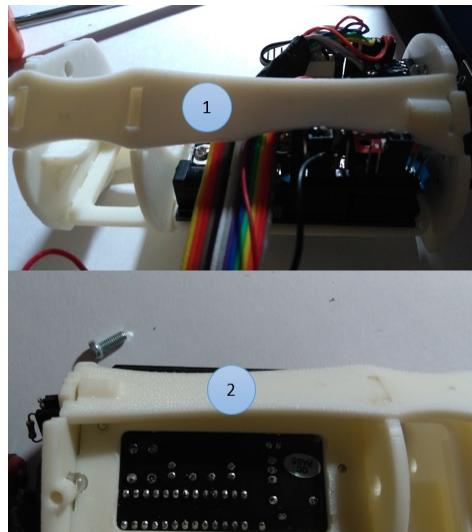


Figura 3.23: Paso 11.1 Ensamblaje: (1) Soporte Lateral 01 y (2) Soporte Lateral 02.

Sección 3.3 Ensamblaje

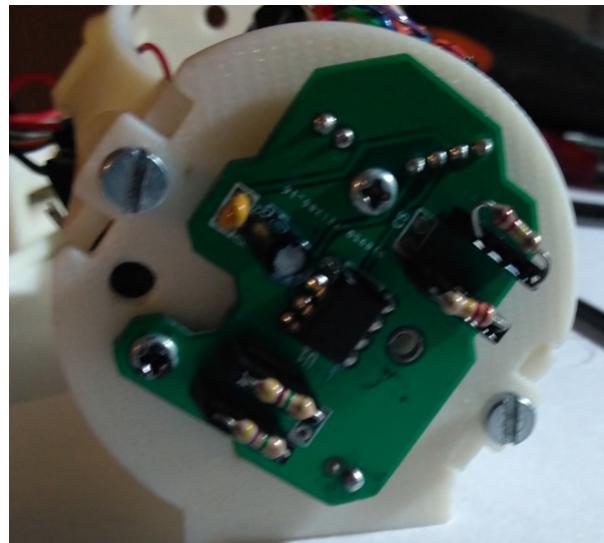


Figura 3.24: Paso 11.2 Ensamblaje: Ensamblaje soporte sensor.

- 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.

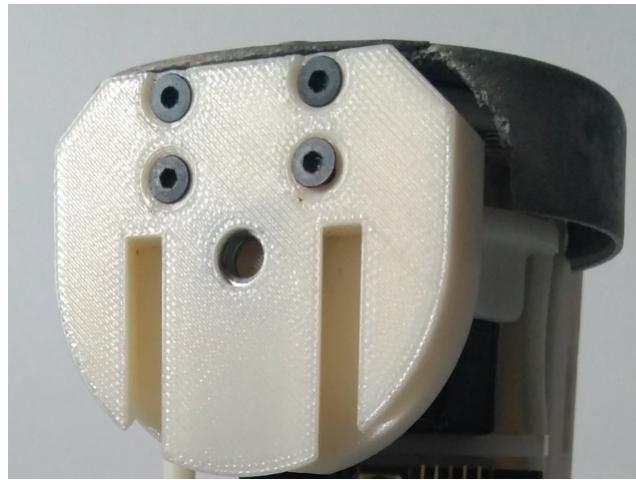


Figura 3.27: Paso 14 Ensamblaje.

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

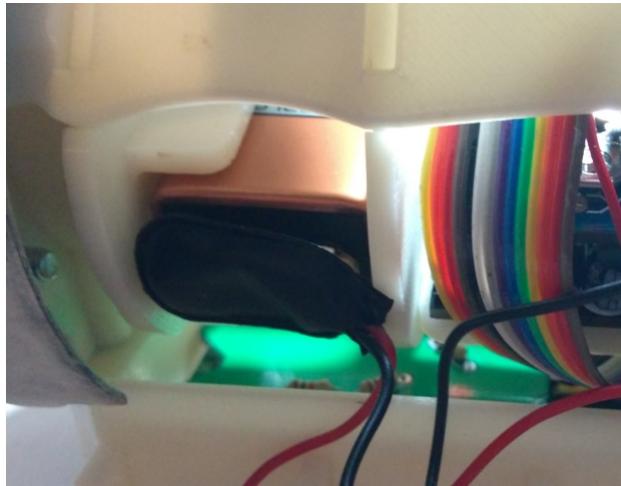


Figura 3.28: Paso 15 Ensamblaje.

- 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.

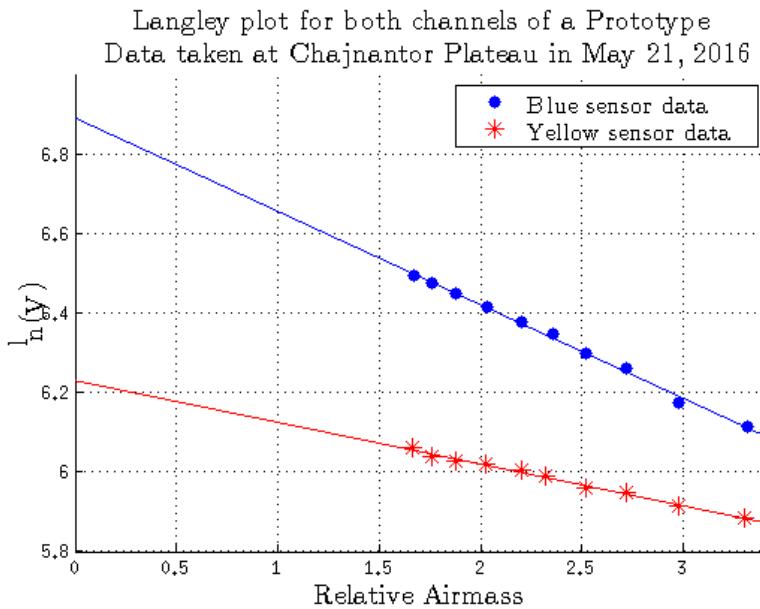


Figura 5.1: Ejemplo de Langley Plot obtenido para un prototipo. Se puede observar que los resultados se ajustan a los resultados esperados para un Langley Plot monocromático.

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 equivalente 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 este contenida la longtiud 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 longtiudes 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 afectando 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 calculo de espesores ópticos 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

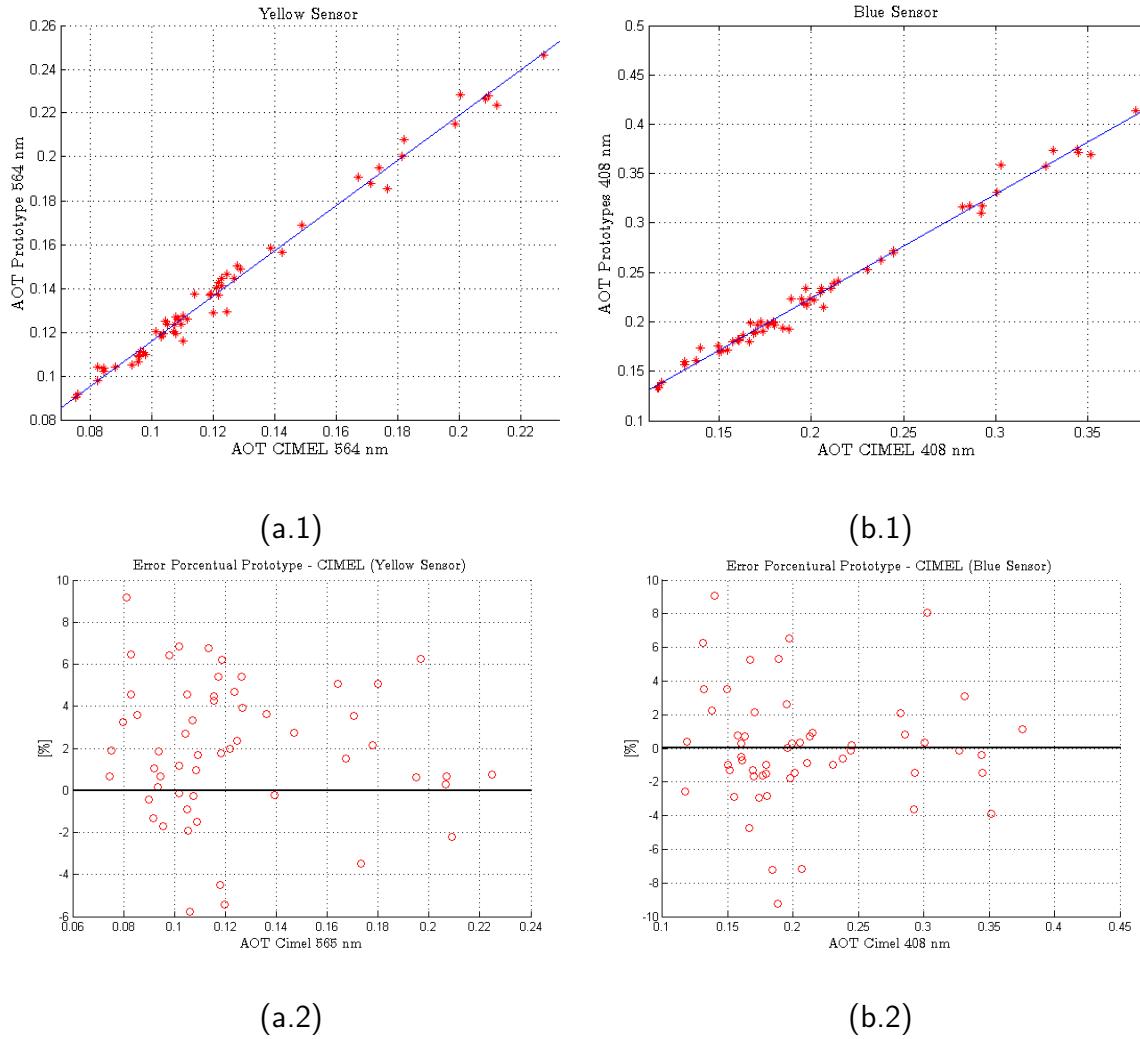


Figura 5.2: Figuras (a.1) y (b.1) muestran la correlación de medición para cada LED con el AOT equivalente del CIMEL, mientras que (a.2) y (b.2) muestran el error porcentual para cada medición de AOT en el rango de calibración lado a lado.

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.

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