



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



Desarrollo de un dispositivo de medida de concentración de nanopartículas

MEMORIA PRESENTADA POR:

MARTÍN GUTIÉRREZ BENITO

Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica

DIRECTOR:

Jose Luis Poza

CODIRECTORES:

Juan de Dios Diaz Marques

Juan Luis Posadas Yagüe

Septiembre, 2018

Índice

1. Introducción	1
2. Estado del arte.....	2
2.1. Necesidades del sector	2
2.2. Equipos de medición de NMs actuales.....	3
2.3. Características del dispositivo	6
2.4. Elección del sensor	6
3. Objetivos del proyecto.....	8
4. Arquitectura y funcionamiento	9
5. Componentes hardware	11
5.1. Sensor de nanopartículas.....	11
5.1.1. Mini PC.....	12
5.2. Filtros HEPA.....	13
5.3. Bombas	13
5.4. Módulo WiFi.....	13
5.5. Módulo GPS	14
5.6. Electrónica externa	14
5.7. Tanque externo.....	14
5.8. Botón de encendido.....	15
5.9. Interruptor de alimentación.....	15
5.10. Toma de escape.....	15
5.11. Ventilador.....	16
5.12. Sistema de alimentación	16
5.13. Batería.....	17
5.14. Maletín	18
5.15. Tableta.....	19
6. Desarrollo final del prototipo	20
7. Integración software	24
8. Aplicación tableta.....	25
9. Pruebas realizadas.....	28
10. Conclusiones	30
11. Bibliografía.....	31
12. Anexos	35
A. Assembly instructions.....	35

Tabla de abreviaturas

NMs	nanomateriales
SEM	<i>scanning electron microscope</i>
TEM	<i>Transmission electron microscope</i>
STEM	<i>Scanning transmission electron microscope</i>
EDX	<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>
TGA	<i>Thermal gravimetric analysis</i>
EA	<i>Elemental analysis</i>
PyMEs	Pequeñas y medianas empresas
GM	Rango intercuartil
GSD	Desviación estandar geométrica
IQR	Rango intercuartil
CPC	<i>Condensation Particle Counter</i>
OPS	<i>Optical particle sizer</i>
PSD	<i>Particle size distribution</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
WiFi	<i>Wireless Ethernet Compatibility Alliance</i>
RPi	<i>Raspberry Pi</i>
GPIO	<i>General purpose input/output</i>
HEPA	<i>High Efficiency Particulate Air</i>
PWM	<i>Pulse-width modulation</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
AC	<i>Alternating current</i>
DC	<i>Direct current</i>
FDM	<i>Fused filament fabrication</i>
PLA	<i>Polylactic acid</i>
SSH	<i>Secure Shell</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1. Principio físico que rige el funcionamiento del CPC.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2. Esquema de la arquitectura del dispositivo.</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3. NAQTS CPC V-1000.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4. Raspberry Pi 2 B.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5. Dos filtros HEPA PALL PN12144.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. Dos CTS Micro Diaphragm Pumps.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 7. Antena Raspberry Pi Ralink Chip Rt5370.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 8. GPS G-STAR IV BU-353S4.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 9. Placa de electrónica externa.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 10. Tanque externo de alcohol isopropílico.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 11. Botón de encendido.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 12. Interruptor de alimentación.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 13. Pasamuros tubo a tubo 6mm.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 14. Ventilador axial 80x80mm.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 15. Transformador AC-DC Condor / SL Power MB120S15K01.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 16. Convertidor DC-DC XL4016E1.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 17. Batería de ácido-plomo Yuasa Y4-12.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 18. Maletín Duratool MAX430</i>	<i>18</i>
<i>Figura 19. Leotec Supernova i3G96x.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 20. Modelo del sensor con sus componentes básicos dentro del maletín.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 21. Anclajes diseñados para los componentes básicos del sensor.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 22. Detalle de las tomas de entrada y salida.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 23. Detalle fuente de alimentación de AC-DC.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 24. Esquema eléctrico simplificado de alimentación del dispositivo.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 25. Detalle de batería, interruptor, ventilador y toma de corriente.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 26. Soportes exterior e interior para la tableta.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 27. Prototipo finalizado del dispositivo de medida de concentración de nanopartículas.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 28. Esquema comunicación dispositivo.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 29. Diseño de la pantalla de valores de entrada.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 30. Diseño de pantalla de salida de datos.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 31. Diseño de pantalla de evaluación de riesgo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 32. Diseño del informe generado en pdf.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 33. Comparación en laboratorio del funcionamiento del equipo desarrollado con otros comerciales.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 34. Comparación en campo del funcionamiento del equipo desarrollado con otros comerciales.</i>	<i>28</i>

Indice de tablas

<i>Tabla 1: Instrumentación utilizada para cuantificar la presencia de NMs en el aire.</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 2. Especificaciones NAQTS CPC V-1000.</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 3. Especificaciones Raspberry Pi 2 B.</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 4. Especificaciones transformador AC-DC Condor / SL Power MB120S15K01.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 5. Especificaciones convertidor DC-DC XL4016E1.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 6. Especificaciones maletín Duratool MAX430.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 7. Especificaciones Leotec Supernova i3G96x.</i>	<i>19</i>

1. Introducción

El desarrollo de este dispositivo se encuentra dentro del proyecto NanoIMPULSA financiado por las ayudas regionales de i+d IVACE. El proyecto tiene como objetivo principal el impulso de la inversión en nanotecnología en la Comunidad Valenciana asegurando la viabilidad técnica y uso sostenible y seguro de los procesos y productos basados en el uso de nanomateriales (NMs).

El trabajo con nanomateriales genera ciertas incertidumbres debido al desconocimiento existente hoy en día sobre sus posibles efectos adversos sobre la salud y el medio ambiente. Numerosos proyectos y estudios están enfocados a determinar los niveles de exposición que pueden suponer un riesgo para la salud, al igual que los estudios existentes para partículas de tamaños convencionales ($>2.5\mu\text{m}$). Sin embargo, algunas de las dificultades que se encuentran para realizar los estudios están relacionadas con la instrumentación para detectar nanomateriales en el ambiente.

El alto coste de estos equipos, junto con la dificultad de interpretación de los datos recogidos, supone una barrera para las empresas que deseen trabajar con nanomateriales, ya que no se resuelven sus incertidumbres sobre si los niveles de exposición son aceptables o no.

Por ello, con el propósito de facilitar el análisis y promover la confianza y el uso seguro con nanomateriales, se ha desarrollado un dispositivo de medición de nanomateriales de bajo coste, fácil de usar, ligero y portátil, capaz de obtener medidas de concentración en términos de número de partículas/cm³ en rangos de tamaño de partícula de 10 a 1000 nm.

El dispositivo se basará en la integración en un instrumento portátil de una bomba de caudal fijo para la captación de partículas, una cámara óptica, donde las partículas previamente cargadas por un cargador de tipo corona son contadas por un sistema de difracción laser, una placa de control regula el caudal de las bombas y recoge los valores de cuenta, después un ordenador, lo más pequeño posible, almacena todos los datos obtenidos por el dispositivo y permite el acceso a estos.

En el apartado 2 se estudia brevemente el problema que supone la medición de NMs, los equipos existentes, los objetivos que se buscan con el dispositivo y el sensor escogido para construir el dispositivo.

Los objetivos que se espera cumplir en este proyecto se definen en el apartado 3.

La arquitectura que se plantea inicialmente para realizar el dispositivo se recoge en el apartado 4 donde se describe brevemente la función de cada componente de manera genérica. Una vez se hace una selección de los componentes estos se describen más en detalle en el apartado 5.

En el apartado 6 se explica cómo se ha realizado el prototipo final del dispositivo.

El sistema de comunicaciones que permite visualizar los datos se describe en el apartado 7. La descripción del software de visualización de los datos se explica brevemente en el apartado 8.

Las pruebas realizadas para comprobar que el prototipo funcionaba acorde a lo esperado se encuentran en el apartado 9.

Por último, las conclusiones se encuentran en el apartado 10.

2. Estado del arte

De las posibles vías de exposición a NMs, la inhalación es la vía más crítica. Mientras que las partículas más grandes entran en el tracto respiratorio y se depositan en las vías respiratorias superiores, eliminándose rápidamente, los NMs se depositan en las profundidades del pulmón y pueden ingresar al torrente sanguíneo, pudiendo trasladarse a otros órganos.

Evaluar el impacto de los NMs en la salud no es fácil. Esto se debe a que las técnicas convencionales de monitorización de la exposición pueden no caracterizar los NMs adecuadamente debido al amplio rango de tamaño cubierto por el término nanomaterial, así como a la falta de técnicas adecuadas para recolectar, medir, preservar y almacenar muestras que contienen NMs.

2.1. Necesidades del sector

La alta concentración de nanopartículas de fondo en ambiente es un problema cuando se realiza un análisis cuantitativo debido a la dificultad de la diferenciación entre partículas de fondo, incidentales o intencionales. Además, existen múltiples métricas para medir la exposición (concentración en número o masa de partículas, distribución de tamaños, área superficial...), y la más apropiada para evaluar la exposición a NMs aún no está clara. Tradicionalmente se utilizaba la concentración másica, pero este parámetro es casi despreciable en el caso de nanopartículas, que tienen un área superficie mucho más alta que la misma masa de partículas más grandes, lo que las hace potencialmente más reactivas y más tóxicas.

Sin embargo, la tecnología actual tiene algunos aspectos en los que avanzar importantes:

- La determinación precisa del tamaño de partícula más pequeños (menos de 50 nm aproximadamente), presenta desafíos técnicos debido a la alta movilidad y fuerza de difusión de los NMs más pequeños cargados eléctricamente que conducen a importantes pérdidas de difusión y de partículas eléctricas en los tubos y, por lo tanto, baja sensibilidad de los dispositivos de medición.
- La instrumentación actual no distingue la especiación química, por lo tanto, dos tipos claros de instrumentos deben estar presentes en las evaluaciones de exposición para tener una imagen completa del escenario: monitores en tiempo real, que pueden proporcionar información sobre las características físicas de los NMs como número o concentración de masa, distribución de tamaño o área de superficie e instrumentos de muestreo, que recogen muestras de los NM suspendidos en el aire en filtros o cartuchos para su posterior análisis en laboratorio mediante técnicas de microscopía (SEM, TEM, STEM) para observar su morfología o agregación / estado de aglomeración, o técnicas de análisis elemental para examinar su composición (EDX, TGA, EA).
- La selección de la instrumentación y su ubicación dependen a su vez fuertemente de las características de los procesos que involucran NMs. Una corta duración requerirá una mayor resolución temporal de los instrumentos, también se debe tener en cuenta la posibilidad de cubrir los tamaños de partículas y los rangos de concentración esperados, así como el tipo de fondo o la proximidad de otros contaminantes o actividades, que podrían enmascarar los resultados.

Este último punto hace que la evaluación de la exposición requiera de múltiples equipos complejos y de uso profesional, en ocasiones casi en desarrollo experimental, para cubrir todos esos aspectos, elevando su coste y dificultando una interpretación sencilla y directa por un usuario no experto.

2.2. Equipos de medición de NMs actuales

La evaluación de la exposición a nanopartículas en el aire se lleva a cabo tradicionalmente con instrumentación dedicada a la clasificación de aerosoles. Por lo tanto, la estrategia de medición debe adaptarse en función del objetivo: exposición humana, ocupacional, urbana o ambiental.

Los estudios actuales ponen de manifiesto que la masa no es una medida adecuada para la exposición a los NMs, siendo el área superficial y el número de partículas los mejores indicadores, aunque todavía esto es objeto de investigación. Sin embargo, debido a que el área superficial depende del método de medición utilizado, la exposición a los nanomateriales se caracteriza en función de la masa (por comparación con estudios previos) y las concentraciones numéricas.

Las concentraciones de aerosol y las distribuciones de tamaños se miden utilizando instrumentación específica para la medición de nanomateriales en el aire, son dispositivos en tiempo real (método directo), que proporcionan características específicas en el momento del evento. Estos instrumentos se basan en diferentes principios físicos y por lo tanto miden diferentes propiedades y rangos en función de su alcance.

En la Tabla 1 aparecen los instrumentos más comunes para cuantificar los NMs en el aire, con su principio de operación y su rango de medida y métrica. Debido a que estos instrumentos no distinguen el origen de los nanomateriales, se complementan estas medidas con instrumentos de medida indirecta (método indirecto). Se trata de tomar muestras mediante filtros para su posterior análisis en microscopía electrónica (SEM).

SEM y Fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDX) se utilizan en conjunto para la identificación química de componentes de partículas. El SEM proporciona una representación visual de la forma, el tamaño y la estructura (partículas individuales o aglomerados) del NM a partir del cual se puede estimar el diámetro de partícula. EDX se utiliza para el análisis elemental de las partículas y proporciona cierta caracterización química de la muestra en el aire o en la superficie.

Estos filtros van conectados a unas bombas de aire que simulan la respiración humana, para captar el volumen de partículas que respiraría un trabajador medio.

Tabla 1: Instrumentación utilizada para cuantificar la presencia de NMs en el aire.

Instrumento	Principio de medida / Métrica	Método	Rango
Condensation Particle Counter (CPC – TSI 3007) 	Las partículas crecen en gotitas de alcohol más grandes y se cuentan a través de un detector óptico. No clasifica en tamaño de partícula.	Directo	6 - 1000 nm < 10 ⁵ part/cm ³
Optical Particle Sizer (OPS – TSI 3330) 	Basado en el diámetro equivalente de dispersión de la luz. Clasifica en concentración de número y tamaño de partícula.	Directo	300 – 10000 nm < 10 ³ part/cm ³
Nanotracer Philips Aerasense 	Basado en la carga eléctrica de las partículas de aerosol detectadas en dos etapas por electrómetros (una para partículas pequeñas, la segunda captura de todas las demás partículas) para dar la concentración y el tamaño medio y el área superficial depositada en pulmones (LDSA).	Directo	10 - 300 nm < 10 ⁶ part/cm ³
DISCmini (Testo AG) 	Monitor personal que se basa en la carga eléctrica de las partículas de aerosol. Los iones positivos se mezclan con el aerosol y las partículas cargadas son detectadas en dos etapas por electrómetros (una para partículas pequeñas, la segunda captura todas las otras partículas). El tamaño medio de partícula puede obtenerse mediante el análisis de las dos corrientes medidas en las etapas.	Directo	10-300 nm < 10 ⁶ part/cm ³ de 10-700 nm
Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) 	Mide el PSD con hasta 128 canales seleccionables por el usuario. A través de un proceso de ionización, establece una carga conocida en partículas individuales. Luego clasifica las partículas pasándolas a través de un campo eléctrico antes de introducirlas en una cámara de condensación miniaturizada donde se contar con un CPC.	Directo	5 - 500 nm < 10 ⁶ part/cm ³

Instrumento	Principio de medida / Métrica	Método	Rango
<p>Fast Mobility Particle Sizer (FMPS, TSI 3091)</p> 	<p>La clasificación de partículas resulta de las diferencias en la movilidad eléctrica de las partículas en función de su tamaño, densidad y carga a medida que viajan a través de un campo eléctrico antes de depositarse en electrómetros de alta sensibilidad. Los resultados se expresan como diámetro de movilidad eléctrica.</p> <p>Muy útil para proceso dinámicos, con tiempos de respuesta de 1 s.</p>	<p>Directo</p>	<p>5 - 560 nm < 10⁶ part/cm³</p>
<p>Sampling filters (Casella pump)</p> 	<p>SEM / EDX microscopía</p>	<p>Indirecto</p>	<p>3 - 5 lpm</p>
<p>Cassetes con filtros PVC/PC</p> 	<p>Microscopía SEM/EDX</p>	<p>Indirecto</p>	<p>Sin límite</p>
<p>Ciclón GK2.69</p> 	<p>Pesaje</p>	<p>Indirecto</p>	<p>PM4</p>

Los equipos de medida directa anteriormente citados abarcan rangos de precio desde los 12.000€ hasta los 85.000€, dependiendo de su tamaño (portables, para monitorización personal o estáticos, llegando a pesar 32 kg como el FMPS), lo cual dificulta su adquisición por parte de PyMEs (SMEs). Además, la toma de datos ha de realizarse de forma escalonada en diferentes puntos y fases de la actividad (fondo, actividad sin NMs y con NMs), y los datos de salida de estos equipos necesitan ser tratados mediante gráficas, análisis estadístico, es decir, media geométrica (GM), desviación estándar geométrica (GSD) y el rango intercuartil (IQR) durante la actividad, identificación de los picos en los gráficos utilizando la información contextual recopilada durante la actividad.

2.3. Características del dispositivo

En base al apartado anterior, hay tres criterios importantes que un instrumento debe cumplir para ser adecuado para la evaluación de la exposición a NMs:

- **Utilidad de campo:** el instrumento está orientado a la monitorización de la exposición profesional a NMs, por lo que debe ser práctico para mediciones de campo (portátil, autonomía, ligero).
- **Precisión de medición,** sin comprometer la resolución, siendo versátil tanto para caracterizar procesos de corta duración como continuados, y capaz de detectar los NMs de tamaños más pequeños por debajo de 20 nm.
- **Facilidad de lectura e interpretación de resultados** para una primera aproximación a la evaluación de la exposición. Se debe aclarar que, debido a la falta de protocolos estandarizados y valores límite, hecho que puede cambiar en un futuro próximo, la evaluación realizada es siempre informativa, y en caso de duda se pueden contrastar con un experto los resultados obtenidos.

2.4. Elección del sensor

La elección del sensor NAQTS CPC-V1000 para su uso en este dispositivo se debe a que cumple todas las características técnicas necesarias manteniendo la idea de que el dispositivo debe ser barato, portable y fiable.

Al estar basado en el conteo de partículas de condensación, o CPC de sus siglas en inglés *Condensation Particle Counter*, es una técnica estable y ampliamente testeada, que da resultados muy precisos para la concentración frente a otras técnicas de medida (las técnicas eléctricas requieren pre-cargar las partículas con una distribución de carga previamente conocida, y aun así existen múltiples pérdidas electrostáticas y es necesario aplicar complicadas correcciones de multiplicidad de cargas; las técnicas gravimétricas son muy imprecisas y en muchos casos incapaces de bajar de 500 nm aprox.). Esta técnica óptica se basa en la captación de partículas suspendidas en el aire por debajo de 2.5 μm pasándolas a través de un rayo láser y midiendo el pulso de luz dispersa que genera cada partícula al atravesarlo.

El principio físico que rige este funcionamiento viene dado porque muchas partículas son tan pequeñas que no son visibles bajo luz normal (las partículas por debajo de 50 nm son generalmente indetectables mediante las técnicas ópticas convencionales). Para hacerlas detectables, se hacen crecer hasta 10 -12 μm mediante la condensación de un solvente en la superficie (ver Figura 1). Este proceso es análogo a lo que sucede en una nube: el agua se condensa en partículas muy pequeñas en la atmósfera. De esta manera, se detectan convenientemente mediante técnicas ópticas habituales, como la medición de pulsos de luz láser dispersados por las partículas crecidas. La señal eléctrica producida en la cámara óptica es traducida en valores numéricos de concentración para visualizar los datos en tiempo real.

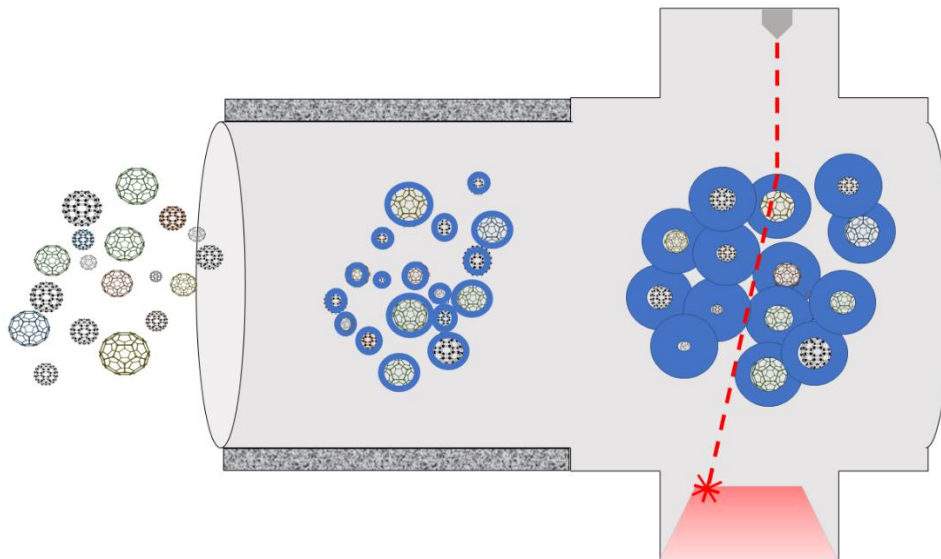


Figura 1. Principio físico que rige el funcionamiento del CPC.

Además de la precisión, el tamaño del sensor CPC V-1000 es reducido, y al ser la fabricante una compañía pequeña, es posible establecer contacto directo con los desarrolladores y así acceder y modificar tanto el código fuente del sensor como a los distintos componentes que lo conforman (bombas, filtros HEPA, R-Pi, etc..).

3. Objetivos del proyecto

El alcance de la memoria pretende cubrir los siguientes apartados:

1. El maletín está pensado como herramienta de trabajo para que el personal de prevención pueda realizar mediciones del nivel de exposición que sufre un trabajador durante su jornada laboral normal. Para ello el maletín debe integrar el sensor en un soporte transportable, que sea rígido, resistente y manejable.
2. El ámbito de aplicación y el lugar en que este nivel de exposición a nanopartículas puede ser medido varia enormemente. Este hecho conlleva que estas mediciones se puedan realizar en un lugar sin toma de corriente y, por tanto, es un objetivo importante, diseñar un sistema de alimentación con batería para aportarle autonomía al dispositivo
3. Para facilitar el trabajo y el análisis de los datos al técnico que esté utilizando el dispositivo se hace uso de las nuevas tecnologías. Permitiendo habilitar comunicaciones para transmitir los datos a un soporte de visualización en tiempo real, en este caso una tableta digital.
4. Como se trata de un prototipo se deberá realizar pruebas de funcionamiento del dispositivo en diferentes escenarios y bajo distintas condiciones.

4. Arquitectura y funcionamiento

Teniendo en cuenta los objetivos a conseguir, se define una arquitectura general del dispositivo teniendo en cuenta la función de cada parte en el sistema.

En la Figura 2 se recoge un esquema con los componentes que debe usar el dispositivo, así como la relación que existe entre las partes.

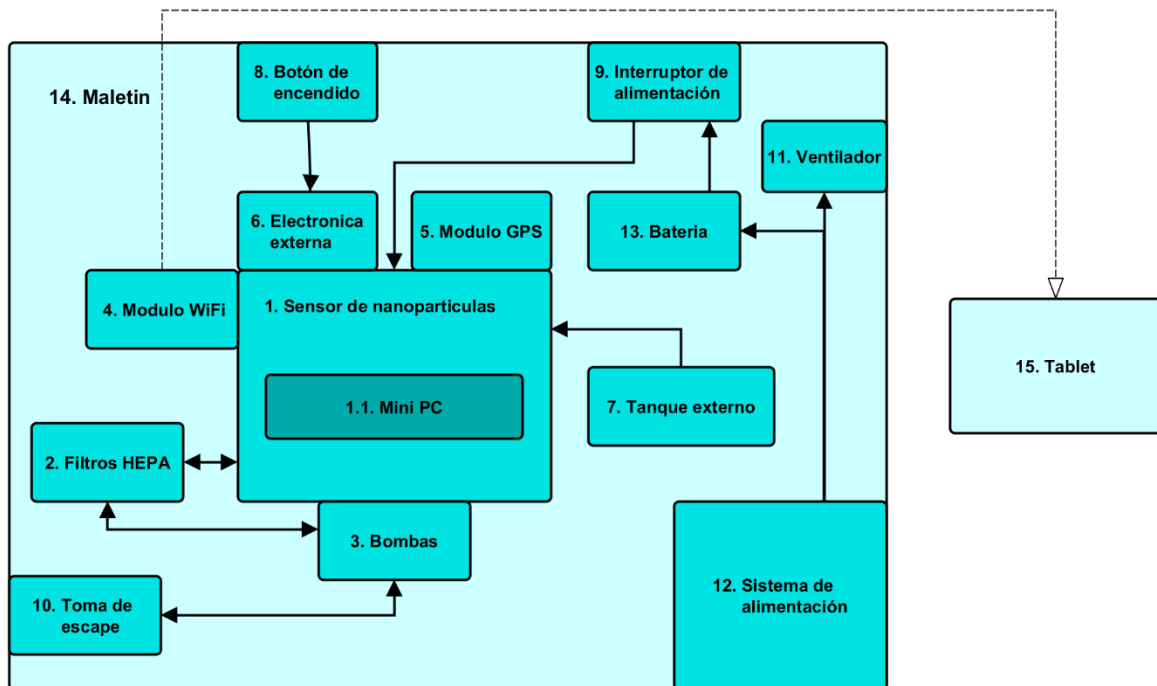


Figura 2. Esquema de la arquitectura del dispositivo.

Como se ve en la figura anterior el diseño se ha hecho alrededor del sensor escogido (Figura 2-1), que viene con un mini PC encapsulado en su interior, a su vez tiene una electrónica que regula el proceso de medida de nanopartículas, dicho proceso necesita alcohol isopropílico (IPA) para poder medir adecuadamente las partículas.

- El mini PC (Figura 2-1.1) se encarga de almacenar los datos que proporciona el sensor de NMs, el Módulo GPS y de las comunicaciones con el exterior a través del módulo WiFi.
- Los filtros HEPA (Figura 2-2) son necesarios para el funcionamiento del sensor, proporcionando aire limpio para diluir el flujo a medir.
- Las bombas (Figura 2-3) Fuerzan el flujo de aire limpio, aire exterior y escape del sensor.
- El módulo WiFi (Figura 2-4) le permite al mini PC establecer una conexión sin cables para leer los datos en un soporte exterior.
- El módulo GPS (Figura 2-5) proporciona la geolocalización de la medida a realizar.
- La electrónica externa (Figura 2-6) al sensor permite conectar el botón de encendido para el dispositivo, así como la duplicación de las señales luminosas de funcionamiento.
- El tanque externo (Figura 2-7) le aporta autonomía al sistema dado que el tanque interno es parte del circuito de funcionamiento y no como almacenaje.
- El botón de encendido (Figura 2-8) permite encender el dispositivo y apagar las bombas en caso de ser necesario.

- El interruptor de alimentación (Figura 2-9) sirve para abrir o cerrar el circuito eléctrico del dispositivo.
- La toma de escape (Figura 2-10) permite expulsar el vapor de alcohol hacia el exterior del maletín.
- El ventilador (Figura 2-11) fuerza la ventilación dentro del maletín para refrigerar el equipo.
- El sistema de alimentación (Figura 2-12) convierte la corriente alterna de la red a un voltaje en corriente continua adecuado al dispositivo.
- La batería (Figura 2-13) almacena energía para aportar autonomía al dispositivo cuando sea necesario desconectarlo de la red eléctrica.
- El maletín (Figura 2-14) protege los componentes delicados del dispositivo, permite su transporte y da soporte a cada componente.
- La tableta (Figura 2-15) se usa como soporte de tratamiento y visualización de datos.

5. Componentes hardware

En este apartado se describen tanto los componentes suministrados junto con el sensor, como los escogidos para construir el dispositivo.

5.1. Sensor de nanopartículas

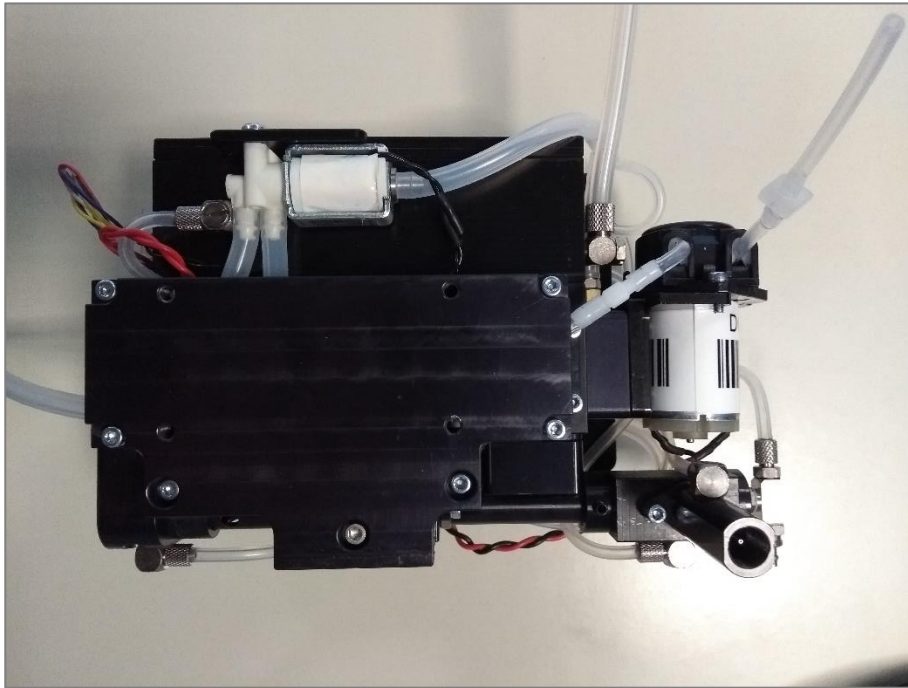


Figura 3. NAQTS CPC V-1000.

Se trata de un diseño experimental (Figura 3) desarrollado por la empresa NAQTS basado en la tecnología de conteo de partículas por condensación (CPC).

Tabla 2. Especificaciones NAQTS CPC V-1000.

Rango de medida	0 - 5000000 part/cm ³
Rango de tamaños detectables	10 nm – 2,5 μm
Rango de temperatura de operación	0 - 40 °C
Tiempo de respuesta	< 4s
Solvente condensador	n-butanol o alcohol isopropílico
Alimentación	De 10.5V a 14V

Los valores medidos se transmiten de la placa de control del sensor al mini PC que se encarga de tratarlos y almacenarlos.

Para su correcto funcionamiento el sensor incorpora una serie de componentes adicionales; dos filtros HEPA, dos bombas de caudal bajo, una placa de electrónica externa al bloque del sensor y una bomba peristáltica que le permite rellenar el tanque interno del dispositivo si se dispone de un tanque exterior.

5.1.1. Mini PC



Figura 4. Raspberry Pi 2 B.

Este mini PC forma parte del sensor NAQTS CPC V-1000, se trata de una Raspberry Pi 2 B (Figura 4. Raspberry Pi 2 B.Figura 4), en el que se usa una versión de Raspbian, un sistema operativo basado en Linux.

Esta Raspberry Pi (RPi) permite una gran versatilidad ya que dispone de pines de entradas y salidas digitales que se pueden programar en Python, permitiendo realizar cambios en su funcionamiento de manera sencilla. También tiene un consumo relativamente bajo lo que facilita su autonomía a la hora de instalar

una batería, así como puertos USB para poder instalar módulos adicionales como GPS, WiFi o incluso bluetooth.

La RPi se encarga de recibir los datos de la placa de control del sensor, almacenarlos en una base de datos, crear una red WiFi a la que conectarse y publicar a través de un websocket los datos a una página web local a la red creada.

Tabla 3. Especificaciones Raspberry Pi 2 B.

SoC	Broadcom BCM2836
CPU	900 MHz quad-core ARM Cortex A7
GPU	Broadcom VideoCore IV @ 250 MHz
RAM	1GB compartido con la GPU
Puertos USB	4
Periféricos	17 GPIO más funciones específicas
Consumo medio	350 mA

5.2. Filtros HEPA



Figura 5. Dos filtros HEPA PALL PN12144.

El sensor de NMs necesita un caudal de aire limpio auxiliar y los filtros HEPA consigue filtrar hasta el 99.97% de este aire.

5.3. Bombas

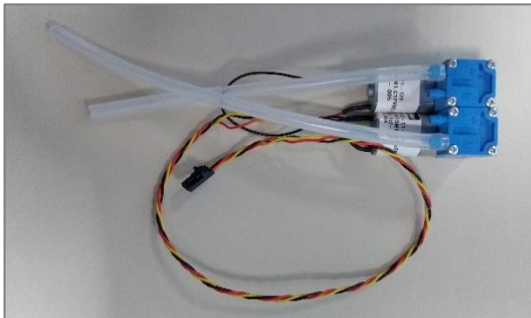


Figura 6. Dos CTS Micro Diaphragm Pumps.

Estas dos micro bombas de membrana se encargan de mantener el flujo de entrada y salida del sensor y su caudal es controlado desde la placa de control por medio de una señal PWM.

5.4. Módulo WiFi



Figura 7. Antena Raspberry Pi Ralink Chip Rt5370.

Ya que la RPi 2 modelo B no dispone de un módulo WiFi integrado en la propia placa es necesario utilizar un módulo USB externo para aportar al sensor la capacidad de utilizar comunicación por WiFi.

Esta conectividad WiFi permite a la RPi generar una red WiFi en la que publica los datos a través de un websocket.

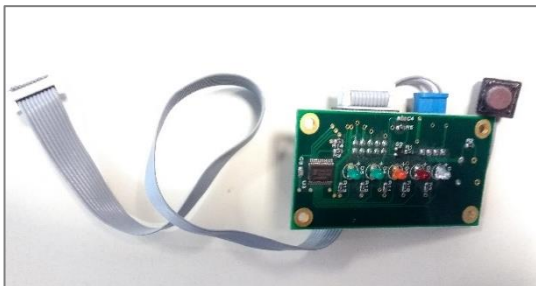
5.5. Módulo GPS



Localizador GPS conectado mediante USB necesario para dar la posición en usos en exterior. El módulo GPS se utilizará siempre que esté disponible la red, para grabar junto con los datos la localización del ensayo.

Figura 8. GPS G-STAR IV BU-353S4.

5.6. Electrónica externa



Esta placa de electrónica ha sido suministrada junto con el sensor para permitir la duplicidad de los pilotos LED del bloque sensor y habilitar una conexión para el botón de encendido del sensor

Figura 9. Placa de electrónica externa.

5.7. Tanque externo



El tanque interno del bloque sensor es relativamente pequeño (5 ml), el tanque externo se usa para aportar una cantidad de solvente superior a la del conducto interno del equipo y poder operar durante más tiempo.

Figura 10. Tanque externo de alcohol isopropílico.

5.8. Botón de encendido



Se sustituye el botón que se puede ver en la Figura 9 por uno de montaje en panel, más grande y resistente para un uso continuado.

Figura 11. Botón de encendido.

5.9. Interruptor de alimentación



Se usa para abrir el circuito de alimentación del dispositivo, pero manteniendo la batería conectada mientras esté conectado a la red permitiendo poder cargar la batería sin conectar el sensor.

Figura 12. Interruptor de alimentación.

5.10. Toma de escape



Es necesario evacuar el escape del sensor fuera del maletín para que no aumente la concentración de alcohol dentro del maletín y pueda suponer un riesgo.

Se usa como toma de escape un pasamuros con toma rápida de 6mm a ambos lados para facilitar el montaje.

Figura 13. Pasamuros tubo a tubo 6mm.

5.11. Ventilador



El ventilador se usa para forzar la ventilación en el interior del maletín para refrigerar el sensor y para evitar que la concentración de alcohol sea muy grande.

Figura 14. Ventilador axial 80x80mm.

5.12. Sistema de alimentación



Figura 15. Transformador AC-DC Condor / SL Power MB120S15K01.

Para poder realizar una solución con batería se necesitaba una fuente de alimentación que pudiera suministrar aproximadamente 13.6V en continua, pero con opción a variar el voltaje de salida entre 12V y 14V aproximadamente para poder cargar la batería.

Tabla 4. Especificaciones transformador AC-DC Condor / SL Power MB120S15K01.

Voltaje de entrada (AC)	80 V a 264V
Frecuencia de entrada	47 Hz a 63 Hz
Voltaje de salida (DC)	15VDC
Potencia máxima	120W



Figura 16. Convertidor DC-DC XL4016E1.

El transformador AC-DC que se ve en la Figura 15 se usa para obtener 15 V en continua estables y el convertidor de la Figura 16 que tiene una salida variable se usa para obtener los 13.6V necesarios para alimentar el sistema.

Tabla 5. Especificaciones convertidor DC-DC XL4016E1.

Voltaje de entrada (DC)	Broadcom BCM2836
Voltaje de salida (DC)	900 MHz quad-core ARM Cortex A7
Corriente máx. en continuo	5A
Corriente máx. de pico	8A

5.13. Batería



Se usa una batería de ácido-plomo ya que permite su uso en flotación y el circuito de carga es muy simple. El inconveniente que presenta es el peso.

Figura 17. Batería de ácido-plomo Yuasa Y4-12.

5.14. Maletín



Figura 18. Maletín Duratool MAX430

Se escoge este maletín dado que permite alojar todos los componentes necesarios para fabricar el dispositivo y es suficientemente rígido para aguantar golpes. A su vez al estar fabricado en polipropileno es fácil de modificar para realizar el montaje del dispositivo.

Tabla 6. Especificaciones maletín Duratool MAX430

Dimensiones externas	464 x 366 x 176 mm
Dimensiones internas	426 x 290 x 159 mm
Peso	2.78 Kg
Material	Polipropileno

5.15. Tableta



Figura 19. Leotec Supernova i3G96x.

El software de control del dispositivo se ha implementado en una tableta liviana y extraíble para operar a cierta distancia del equipo y visualizar los datos en tiempo real. Se ha escogido esta tableta de gama media por adecuarse al objetivo buscado, que es ejecutar una aplicación de recogida de datos que no requiere unas prestaciones mayores a las que se pueden ver en la Tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones Leotec Supernova i3G96x.

Pantalla	9.6" 16:9 IPS; 800 x 1280
CPU	QuadCore MT8321 Córtex A7 1.3Ghz
RAM	2GB LPDDR2 (900 MHz)
ROM	64GB (ampliable mediante microSD de hasta 32GB)
Conectividad	WiFi N; 3G; GPS; Bluetooth 4.0; puerto microUSB
Batería	interna no removible de 4.500mAh
Sistema Operativo	Google Android 6 Marshmallow (Android 7 actualizable)

6. Desarrollo final del prototipo

Una vez escogido el sensor NAQTS CPC V-1000.y con la ayuda de software CAD se planifica la distribución de los componentes para aprovechar el espacio dentro del maletín lo mejor posible. Esta distribución se hace alrededor de las necesidades del sensor: entradas y salidas de aire, conectores y orientación para el funcionamiento.

Tras modelar el maletín y el resto de los componentes, salvo el sensor, del que se disponía el modelo, la distribución aproximada es la que se puede ver en la Figura 20

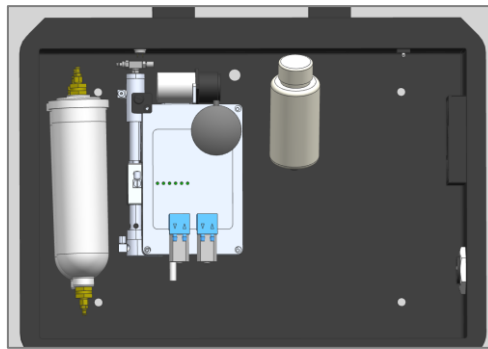


Figura 20. Modelo del sensor con sus componentes básicos dentro del maletín.

El equipo está diseñado para estar orientado verticalmente, como se ve en la Figura 20, se decide posicionar la toma de entrada de medida en la parte trasera del maletín y la toma de escape en la parte izquierda del dispositivo.

Se decide instalar los componentes sobre un panel de aluminio para facilitar su montaje. Los pernos de sujeción del panel cumplen al mismo tiempo la función de patas en caso de que se quiera almacenar el equipo.

Dado que se necesitan anclajes específicos a medida para los diversos componentes se decide usar técnicas de prototipado rápido y se usa una impresora 3D FDM modelo BCN3D+ del año 2015, y empleando como material PLA dada su facilidad de uso.

Como se ve en la Figura 21 se ha diseñado un panel sobre el propio cuerpo del sensor para anclar las bombas, la placa de electrónica externa donde se conectará el botón de encendido y el GPS. Los filtros HEPA se han posicionado uno encima del otro para aprovechar el espacio y el soporte del tanque auxiliar se ha diseñado en ángulo para facilitar el llenado y para evitar fugas en la parte del tapón incluso poniendo el maletín en posición de almacenaje.

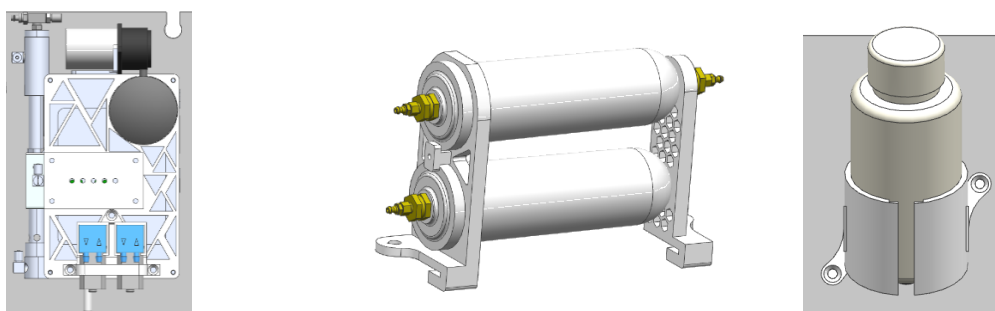


Figura 21. Anclajes diseñados para los componentes básicos del sensor.

Una vez colocados los componentes principales con sus anclajes se colocan las tomas de entrada y salida del dispositivo, así como el botón de encendido.



Las tomas de entrada, ambas con toma rápida para poder extender con tubos el alcance del dispositivo, se colocan en la parte trasera del dispositivo como se ve a la izquierda de la Figura 22. La toma de escape se coloca en la parte baja del lateral del maletín para evitar que interfiera con la toma de entrada (inferior derecha de la Figura 22). El botón de encendido del sensor se coloca en la parte superior del maletín junto al asa al estar protegido por la estructura del maletín y disponer de fácil acceso. Las patas para almacenaje (las piezas blancas de la imagen) se instalan para evitar golpear las tomas de entrada y salida al colocar el maletín en posición de almacenaje (horizontalmente).

Figura 22. Detalle de las tomas de entrada y salida.

Después se diseña el sistema de alimentación por batería, se diseña un soporte para el ventilador y se posiciona el interruptor de alimentación y la toma de alimentación.

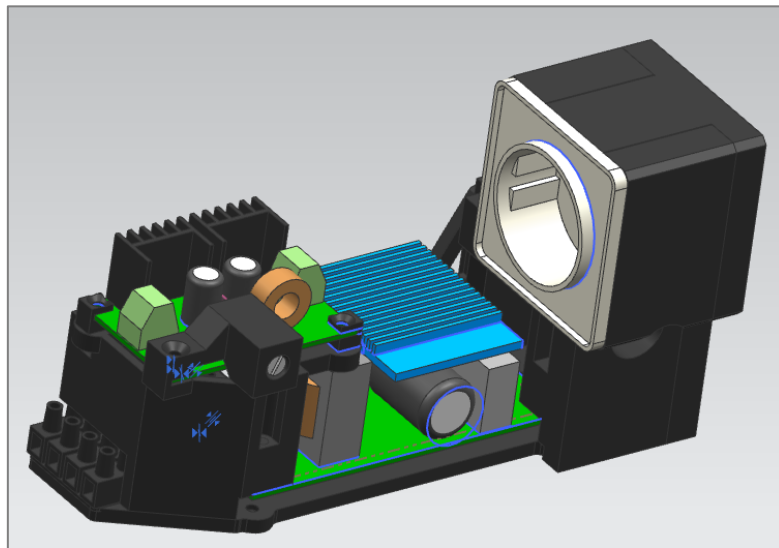


Figura 23. Detalle fuente de alimentación de AC-DC.

Por medio de un soporte impreso en PLA (Figura 23) se integran la fuente AC-DC y la fuente DC-DC para ocupar el menor espacio posible y se añade un enchufe de panel para poder cargar la tableta directamente desde el interior del maletín. La fuente de continua a continua presenta un potenciómetro regulable que se ha cubierto con una tapa para evitar modificar su valor accidentalmente.

El esquema eléctrico simplificado de alimentación se puede ver en la Figura 24.

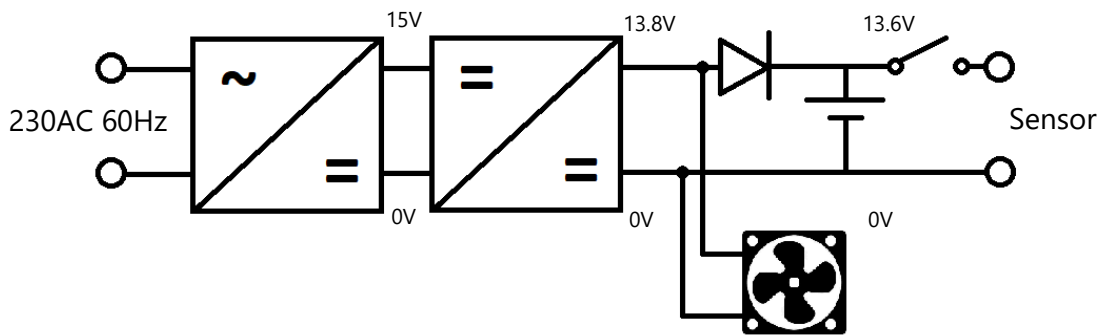


Figura 24. Esquema eléctrico simplificado de alimentación del dispositivo.

El dispositivo se conecta a cualquier enchufe de monofásica a 230V con toma *schuko*.

Tras pasar las dos fuentes se conecta el ventilador para que funcione solo cuando está conectado a la red, después lleva un diodo de potencia con una baja caída de potencial para proteger la fuente de alimentación y aislar la batería cuando no se esté cargando ni alimentando el sensor, al final resulta un circuito con una batería en flotación.

En la Figura 25 se puede ver el anclaje de la batería aprovechando uno de los pernos del panel, así como la posición del interruptor de encendido y el ventilador. La toma de corriente del maletín se ha escogido por su alta resistencia al desgaste y la tapa para evitar suciedad cuando la toma está en uso.

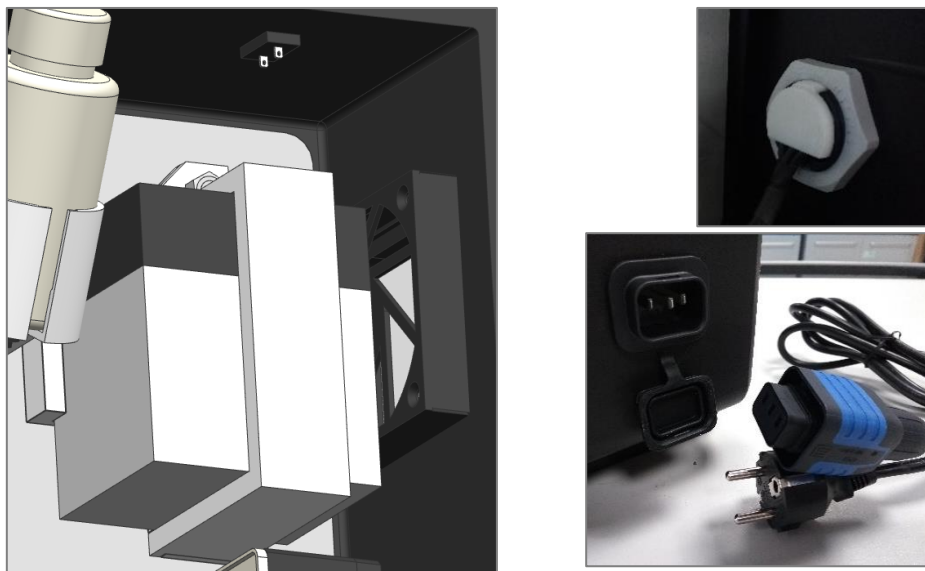


Figura 25. Detalle de batería, interruptor, ventilador y toma de corriente.

Por último, se diseña un soporte externo y otro interno (Figura 26, izquierda y derecha respectivamente) para almacenar la tableta ya que forma parte del dispositivo para visualizar y analizar los datos recibidos.

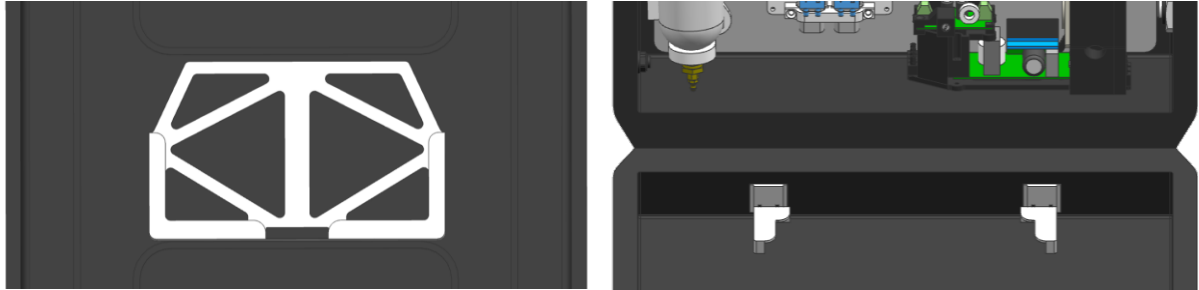


Figura 26. Soportes exterior e interior para la tableta.

El resultado final se puede ver en la Figura 27 con diferentes fotos del exterior y el interior del dispositivo.



Figura 27. Prototipo finalizado del dispositivo de medida de concentración de nanopartículas.

Para mayor información sobre como se ha construido el prototipo se puede consultar el Anexo A que contiene sus instrucciones de montaje.

7. Integración software

El funcionamiento de las comunicaciones del sensor se analiza para dar soporte al software que se ha realizado.

La RPi crea una red WiFi con la que poder conectarse al sensor remotamente, es una red privada sin acceso a internet, pero está preparada para que, en caso de tener una conexión a internet por cable, haga un puente entre la conexión por cable y la red WiFi dando acceso a internet a los dispositivos conectados a la red generada por la raspberry.

Es posible conectarse a la RPi del sensor mediante una conexión SSH (*Secure SHell*) y acceder al código en lenguaje Python que controla las comunicaciones del dispositivo mediante SFTP.

Se analiza el código y se obtiene que la RPi obtiene la trama de datos por medio de comunicación serie a través de sus pines GPIO (*General purpose input/output*), todos los datos obtenidos se graban en una base de datos *MySQL* para almacenarlos de forma segura. Estos datos se exportan periódicamente en un archivo con formato *csv* (*comma-separated values*) que se puede descargar a través de la conexión SSH, para su posterior procesado en caso de ser necesario.

Mediante el uso de un websocket, una vía de comunicación bidireccional a través de un puerto TCP, se publican los datos en una dirección web. De esta trama de datos se identifica la posición de los variables relevantes para nuestro proyecto que se quiere visualizar desde la aplicación.

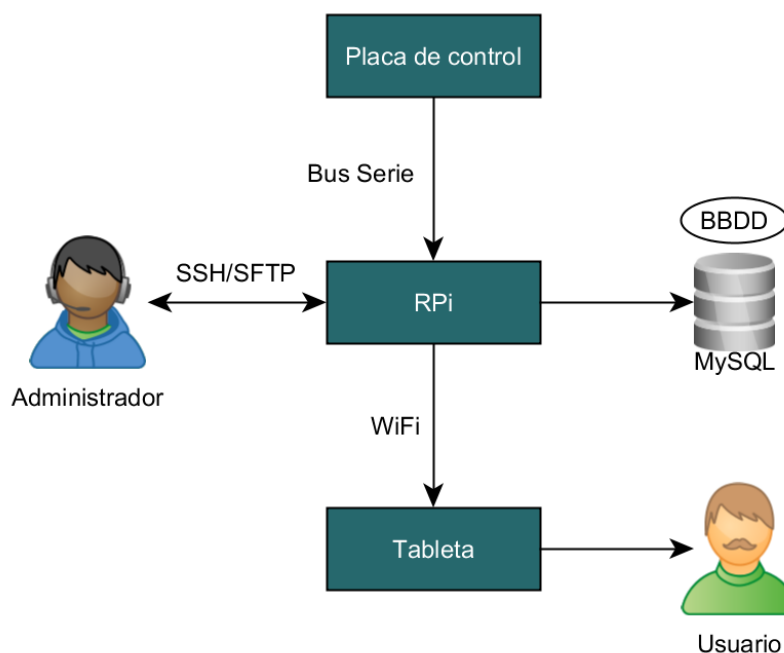


Figura 28. Esquema comunicación dispositivo.

8. Aplicación tableta

El objetivo final del equipo de medición es facilitar el acceso a la evaluación de la exposición a empresas o centros donde se trabaje con nanomateriales, así como la comprensión de los datos medidos. Para ello, se ha desarrollado un software de interacción con el usuario orientado a la evaluación global del riesgo para las características del nanomaterial y proceso concretos que sea intuitivo y de fácil manejo, y los valores de salida fácilmente interpretables.

El programa de operación se ha dividido en tres pantallas, donde el usuario interactuará con las diferentes opciones del software. En primer lugar, la pantalla de los valores de entrada donde el usuario introduce las características del escenario de exposición.

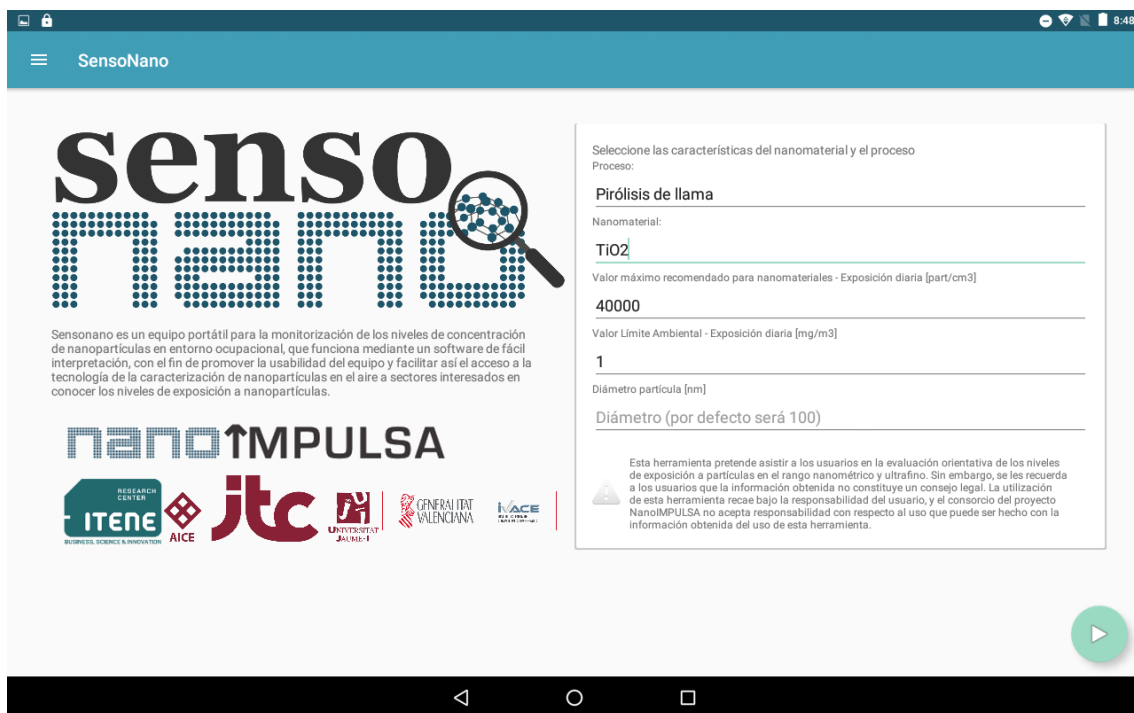


Figura 29. Diseño de la pantalla de valores de entrada.

En cuanto a las características del proceso, a pesar de ser opcionales, añadirán información valiosa para la posterior evaluación del riesgo y análisis de resultados de exposición. Por un lado, se pide seleccionar el tipo de proceso de un desplegable, que está relacionado con la fase del ciclo de vida y el nivel de energía de la actividad seleccionada.

En segundo lugar, se escoge el tipo de nanomaterial empleado, que determinará por defecto, si los hubiese, los Valores Máximos recomendados para nanomateriales (VMN-ED) así como los Valores Límite Ambientales de exposiciones diarias (VLA-ED) relativos al mismo material en escala micro o macro, dando la opción al usuario de introducirlos a mano si los conoce. Todos estos datos se guardarán como información de entrada del dispositivo.

La pantalla de salida de datos puede verse en la Figura 30. El equipo mide la concentración de nanomateriales en el ambiente en una línea temporal, lo que se representa en la gráfica adjunta, junto con el valor numérico de ese momento, la presión atmosférica, humedad relativa y factor de dilución del aire limpio respecto al caudal aspirado, así como otras características del equipo de medida que dan idea del correcto funcionamiento del mismo.

Se ha añadido un marcador de eventos para que en caso de que ocurra un proceso secundario que afecte a la medida (paso de vehículos diésel, obras, corrientes de aire por ventanas o puertas, o comienzo de un trabajo paralelo en el mismo recinto, por ejemplo), quede registrado exactamente la hora a la que comenzó y terminó. Asimismo, se ha añadido un clasificador de procesos en fondo, campo cercano y campo lejano para facilitar la clasificación y posterior comparación de tendencias y valores.



Figura 30. Diseño de pantalla de salida de datos.

La tercera pantalla (Figura 31) hace referencia a la evaluación del riesgo, obtenida en función de los datos anteriores. Mediante la selección de los datos de fondo y actividad de un mismo proceso, el software calcula el ratio de las concentraciones de actividad frente a fondo de las medidas escogidas anteriormente, así como el índice de exposición y el índice de caracterización del riesgo mediante la comparación de la concentración extraída a una jornada laboral con los valores límite ambientales introducidos en la primera pantalla, siempre que éstos estuvieran disponibles.

Se presenta asimismo el cálculo de los valores medio y desviación estándar de cada proceso. También adquiere datos anexos como la temperatura, humedad relativa del ambiente, duración de la medición y fecha y horas de inicio y finalización.



Figura 31. Diseño de pantalla de evaluación de riesgo.

En función de estos valores, se graficará en una escala de color tipo semáforo el índice de riesgo del proceso medido, donde verde es riesgo bajo y rojo riesgo probable de exposición. Debido a que para nanomateriales no existe una clasificación del riesgo estandarizada, hay que recordar que esta clasificación es siempre orientativa, y en caso de dudas hay que seguir el principio de máxima precaución y consultar con un experto.

Todas las evaluaciones se podrán exportar en pdf y guardar para reevaluar y comparar evaluaciones pasadas entre sí.



Figura 32. Diseño del informe generado en pdf.

9. Pruebas realizadas

Distintos ensayos han sido realizados, tanto en laboratorio como en campo, para observar la fiabilidad y reproducibilidad del dispositivo.

En primer lugar, para comprobar la calidad de las mediciones de nanopartículas, se han comparado los resultados obtenidos con el dispositivo con los de un CPC comercial ampliamente utilizado como referencia en comparación de instrumentos, el CPC 3007 de TSI Inc. Por completitud, se ha incluido también los resultados del OPS 3330 de TSI, otro equipo óptico pero que mide en un rango mayor, de 300 nm a 10 μm .

Los resultados pueden verse en las Figura 33 y Figura 34

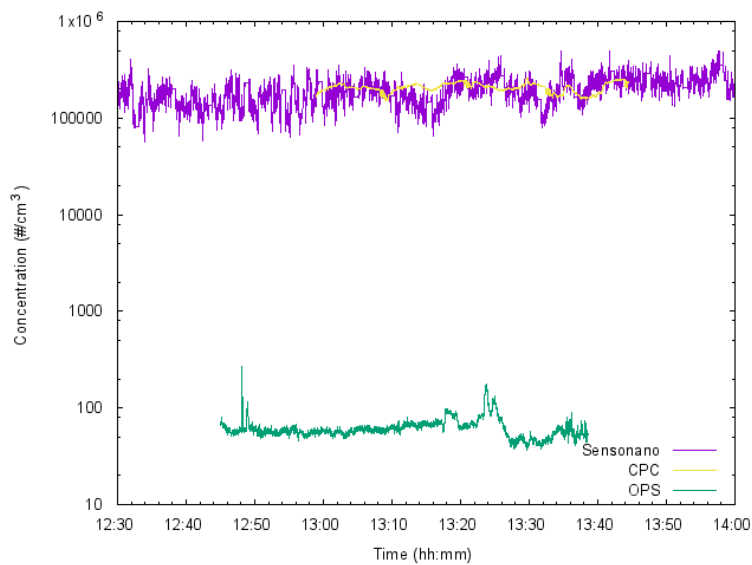


Figura 33. Comparación en laboratorio del funcionamiento del equipo desarrollado con otros comerciales.

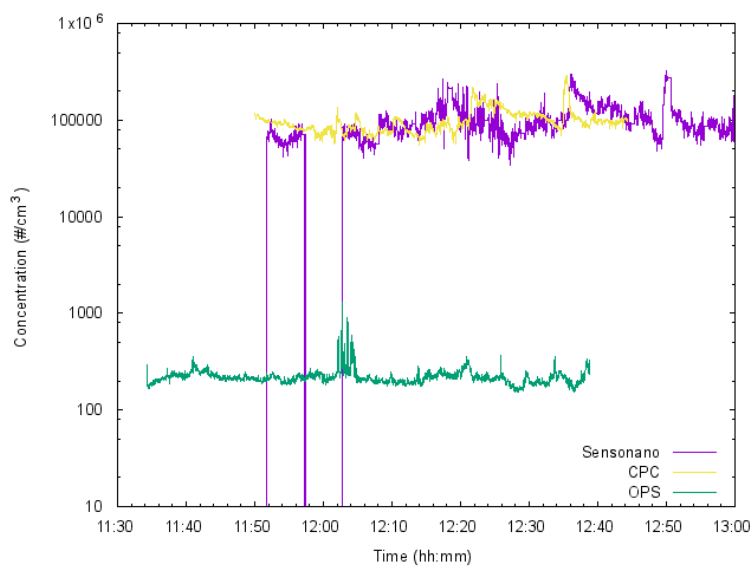


Figura 34. Comparación en campo del funcionamiento del equipo desarrollado con otros comerciales.

En las gráficas anteriores se pueden observar resultados muy parecidos al medidor comercial CPC, las caídas que se encuentran en la Figura 34 se deben a la purga del circuito interno del sensor que se realiza de forma automática periódicamente. Se puede observar que una vez finalizada la purga las mediciones recobran la normalidad.

Otro tipo de pruebas han sido realizadas para comprobar que el módulo GPS del que se disponía, GPS G-STAR IV BU-353S4, era compatible con el software de la RPi, para ello se accedió al archivo principal en Python y se añadió código que permita conocer el estado de la recepción de datos GPS, se comprobó que si la conexión con los satélites era parcial se descartaba la trama entera y se consideraba como no válida. En caso de que la trama del GPS se considerase como válida se almacena junto con el resto de información en la base de datos interna del sensor.

La autonomía del sensor es un punto importante, por lo que se llevó a cabo una prueba para medir el consumo de IPA del sensor y así comparar con el consumo según el fabricante (0.5 ml/h). Se llenó con 10ml y se dejó en funcionamiento registrando datos durante 24h, luego se analizaron los datos y se obtuvo que se había quedado sin IPA a las 16 horas aproximadamente, por lo que el consumo es algo mayor de lo esperado, pero dentro de límites aceptables. Dado que las medidas que se suelen llevar a cabo son de unas pocas horas y de forma continuada, con un tanque externo de 100 mL se tendría una autonomía de unos siete días.

El consumo eléctrico también se comprobó midiendo la corriente de pico (durante el calentamiento del sensor) es de 3.3A y la corriente consumida media (pasados al menos 20 minutos desde el encendido del sensor, cuando las temperaturas internas de sus componentes ya se han estabilizado por completo) es de 0.75A. La batería instalada tiene una capacidad de 4Ah por lo que la autonomía del dispositivo desconectado de la red sería de aproximadamente cuatro horas, teniendo en cuenta que se evita la descarga de la batería por completo, ya que esta podría sufrir un desgaste excesivo.

10. Conclusiones

La integración del sensor dentro del maletín aporta las funcionalidades requeridas inicialmente, es una solución resistente, pero no llega a ser tan manejable como otros equipos portátiles. Al tratarse de un prototipo parte del espacio interno del maletín no se optimiza al completo y tiene una masa de 9Kg, siendo seis de esos Kg del propio sensor.

El sistema de alimentación con una batería de ácido-plomo es funcional, pero presenta algunos inconvenientes, como la masa extra añadida y el volumen de la batería. Puede que una solución más apropiada hubiese sido una batería de *ion-litio* que suministrase directamente 12V, ahorrándose así pasos en el sistema de alimentación, sustituyendo los dos transformadores (AC-DC y DC-DC) por un solo sistema de carga de batería.

El código en Python de la RPi se pudo analizar completamente para el fin deseado, que era adquirir y poder visualizar los datos pertinentes en la tableta, cosa que se consiguió sin inconvenientes. Una posible ampliación sería el utilizar más datos de las variables de la trama de datos del sensor para ampliar la funcionalidad e información que se muestra en la tableta.

Se realizaron diferentes pruebas de funcionamiento tanto del GPS, como de consumo de alcohol y consumo eléctrico, obteniendo así datos importantes referentes a las capacidades y la autonomía del dispositivo, que se calcula de aproximadamente cuatro horas, limitado principalmente por la batería.

En definitiva, se puede considerar que se han cumplido los objetivos esperados para el proyecto.

11. Bibliografía

- [1] D. Brower, M. Berges, M. Virji, W. Fransman, D. Bello, L. Hodson, S. Gabriel and E. Tielemans, "Harmonization of measurement strategies for exposure to manufactured nano-objects; report of a workshop," *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 56, no. 1, pp. 1-9, 2012.
- [2] ECHA, "Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment - Chapter R.14: Occupational exposure assessment," European Chemical Agency, Helsinki, 2016.
- [3] ECHA, "Guidance on information requirements and Chemical Safety Assessment - Chapter R.16: Environmental exposure assessment," European Chemical Agency, Helsinki, 2016.
- [4] "Safenano," Medicine, Institute of Occupational, 2017. [Online]. Available: <http://www.safenano.org/news/intheknow/in-the-know-onexposure-assessment/>.
- [5] C. Ostiguy, M. Riediker, J. Triolet, P. Troisfontaines and D. Vernez, "Development of a specific Control Banding Tool for Nanomaterials," ANSES - French agency for food, environmental and occupational health and safety, 2010.
- [6] T. SÜD, "CENARIOS®- the first nanotechnology risk management and monitoring system," TÜV SÜD Industrie Service GmbH.
- [7] S. F. Hansen, A. Baun and K. Alstrup-Jensen, "NanoRiskCato - A Conceptual Decision Support Tool for Nanomaterials," Danish Environmental Protection Agency, 2011.
- [8] S. F. Hansen and B. Anders, "NanoRiskCat: a conceptual tool for categorization and communication of exposure potentials and hazards of nanomaterials in consumer products," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 16, no. 1, pp. 1-25, 2014.
- [9] K. Jensen, A. Saber, H. V. L. B. Kristensen, A. C. Jensen, I. K. Koponen and W. H., "NanoSafer vs. 1.1 Nanomaterial risk assessment using first order modeling," in *Topical Scientific Workshop on Regulatory Challenges in Risk Assessment of Nanomaterials*, Helsinki, 2014.
- [10] J. Höck, T. Epprecht, E. Furrer, M. Gautschi, H. Hofmann, K. Höhener, K. Knauer, H. Krug, L. Limbach, P. Gehr, B. Nowack, M. Riediker, K. Schirmer, K. Schmidt, C. Som, C. Studer, A. Ulrich, N. Von Gotz, A. Weber, S. Wengert and P. Wick, "Guidelines on the Precautionary Matrix for Synthetic Nanomaterials," Federal Office of Public Health and Federal Office for the Environment, Berne, 2013.
- [11] S. Y. Paik, D. M. Zalk and P. Swuste, "Application of a Pilot Control Banding Tool for Risk Level Assessment and Control of Nanoparticle Exposures," *Annals of work exposures and health*, vol. 52, no. 6, pp. 419-428, 2008.
- [12] M. D. Zalk, S. Y. Paik and P. Swuste, "Evaluating the Control Banding Nanotool: a qualitative risk assessment method for controlling nanoparticle exposures," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 11, p. 1685, 2009.

- [13] D. M. Zalk, R. Kamerzell, S. Paik, J. Kapp, D. Harrington and P. Swuste, "Risk Level Based Management System: A Control Banding Model for Occupational Health and Safety Risk Management in a Highly Regulated Environment," *Industrial Health*, vol. 48, pp. 18-28, 2010.
- [14] T. van Harmelen, E. K. Zondervan-van den Beuken, D. H. Brouwer, E. Kuijpers, W. Fransman, H. B. Buist, T. N. Ligthart, I. Hincapié, R. Hischer, I. Linkov, B. Nowack, J. Studer, L. Hilty and C. Som, "LICARA nanoSCAN - A tool for the self-assessment of benefits and risks of nanoproducts," *Environment International*, vol. 91, pp. 150-160, 2016.
- [15] B. Duuren-Stuurnan, S. Vinck, D. Browuer, D. Kroese, H. Heussen, K. Verbist, E. Tielemans, M. van Nitfrik and W. Fransman, "V9216: Stoffenanager Nano: Descriptio of the conceptual control banding model," TNO Report, 2011.
- [16] J. W. Cherrie and T. Schneider, "Validation of a new method for structured subjective assessment of past concentrations," *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 43, pp. 235-245, 1999.
- [17] A. D. Maynard and A. T. Zimmer, "Development and validation of a simple numerical model for estimating workplace aerosol size distribution evolution through coagulation, settling, and diffusion," *Aerosol Science and Technology*, vol. 37, pp. 804-817, 2003.
- [18] L. McCalman, A. Sanchez Jimenez, E. Belut, R. Guichard, M. van Tongeren, L. Tran and J. Cherrie, "Quantitative Modelling of Occupational Exposure to Airborne Nanoparticles," in *Indoor and Outdoor Nanoparticles - The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 48*, Springer, 2016, pp. 181-207.
- [19] M. Schoorl, A. Hollander and D. van der Meent, "SimpleBox 4.0 - A multimedia mass balance model for evaluating the fate of chemical substances," National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, 2015.
- [20] M. P. Tsang, D. Hristozov, A. Zabeo, A. J. Koivisto, A. C. O. Jensen, K. A. Jensen, C. Pang, A. Marcomini and G. Sonnemann, "Probabilistic risk assessment of emerging materials: case study of titanium dioxide nanoparticles," *Nanotoxicology*, vol. 11, no. 4, pp. 558-568, 2017.
- [21] F. Gottschalk and B. Nowack, "The release of engineered nanomaterials to the environment," *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 13, p. 1145, 2011.
- [22] A. Köhler, C. Som, A. Helland and F. Gottshalk, "Studying the potential release of carbon nanotubes throughout the application life cycle," *Journal of Cleaner Production*, vol. 16, no. 8-9, pp. 927-937, 2008.
- [23] J. R. Lead and K. J. Wilkinson, "Aquatic colloids and nanoparticles: current knowledge and future trends," *Environmental Chemistry*, vol. 3, pp. 159-171, 2006.
- [24] N. Senesi and B. Xing, *Engineered Nanoparticles and the Environment - Biophysicochemical Processes and Toxicity*, Wiley-IUPAC series in Biophysico-Chemical Processes in Environmental Systems, 2016.
- [25] R. Arvidsson, S. Molander and B. A. Sandém, "Particle Flow Analysis of Silver Nanoparticles," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 15, no. 6, pp. 844-854, 2011.

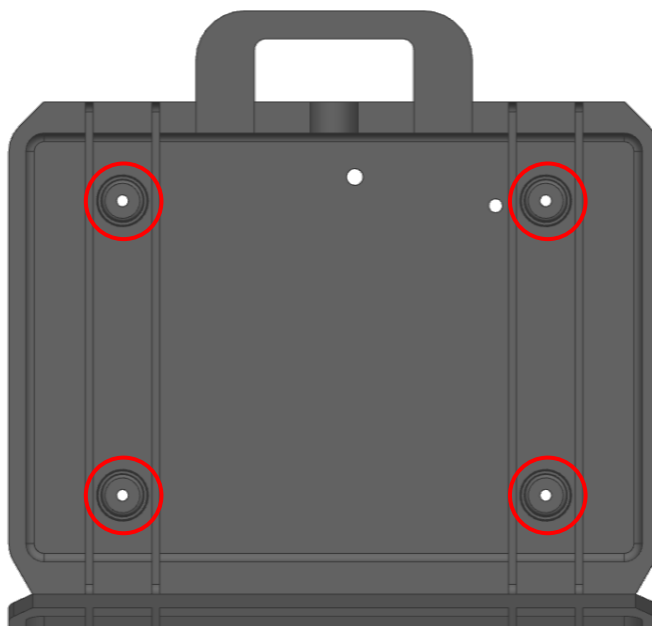
- [26] R. Arvidsson, S. Molander and B. A. Sandén, “Exploring Potential Use Phase Emissions of Titanium Dioxide Nanoparticles from Sunscreen, Paint, and Cement,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, no. 3, pp. 343-351, 2012.
- [27] A. B. A. Boxall, Q. Chaudry, C. Sinclair, A. Jones, R. Aitken, B. Jefferson and C. Watts, “Current and Future Predicted Environmental Exposure to Engineered Nanoparticles,” Central Science Laboratory, Sand Hutton, 2007.
- [28] N. C. Mueller and B. Nowack, “Exposure Modeling of Engineered Nanoparticles in the Environment,” *Environmental Science and Technology*, Vols. 4447-4453, p. 42, 2008.
- [29] F. Gottschalk, T. Sonderer, R. W. Scholz and B. Nowack, “Modeled environmental concentrations of engineered nanomaterials (TiO₂, ZnO, Ag, CNT, Fullerenes) for different regions,” *Environmental Science and Technology*, vol. 43, pp. 9216-9222, 2009.
- [30] F. Gottschalk, R. W. Scholz and B. Nowack, “Probabilistic material flow modeling for assessing the environmental exposure to compounds: methodology and an application to engineered nano-TiO₂ particles,” *Environmental Modeling and Software*, vol. 25, pp. 320-332, 2010.
- [31] N. O'Brien and E. Cummins, “Nano-scale pollutants: fate in Irish surface and drinking water regulatory system,” *Human and Ecological Risk Assessment*, vol. 16, pp. 847-872, 2010.
- [32] A. Keller, S. McFerran, A. Lazareva and S. Suh, “Global life-cycle of engineered nanomaterials,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 15, p. 1692, 2013.
- [33] H. H. Liu, M. Bilal, A. Lazareva, A. Keller and Y. Cohen, “Simulation tool for assessing the release and environmental distribution of nanomaterials,” *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 6, pp. 938-951, 2015.
- [34] B. N. A., T. Y. Sun, L. M. Hilty and B. Nowack, “A dynamic probabilistic material flow modeling method,” *Journal of Environmental Modelling and Software*, vol. 76, no. C, pp. 69-80, 2016.
- [35] T. Y. Sun, N. A. Bornhoft, K. Hungerbuhler and B. Nowack, “Dynamic Probabilistic Modeling of Environmental Emissions of Engineered Nanomaterials,” *Environmental Science and Technology*, vol. 50, no. 9, pp. 4707-4711, 2016.
- [36] T. Y. Sun, D. M. Mitrano, N. A. Bornhoft, M. Scheringer, K. Hungerbuhler and B. Nowack, “Envisioning Nano Release Dynamics in a Changing World: Using Dynamic Probabilistic Modeling to Assess Future Environmental Emissions of Engineered Nanomaterials,” *Environmental Science and Technology*, vol. 51, no. 5, pp. 2854-2863, 2017.
- [37] A. Praetorius, M. Scheringer and K. Hungerbuhler, “Development of Environmental Fate Models for Engineered Nanoparticles—A Case Study of TiO₂ Nanoparticles in the Rhine River,” *Environmental Science and Technology*, vol. 46, no. 12, pp. 6705-6713, 2012.
- [38] J. Meesters, A. A. Koelmans, J. T. K. Quik, A. J. Hendriks and D. van der Meent, “Multimedia Modeling of Engineered Nanoparticles with SimpleBox4nano: Model Definition and Evaluation,” *Environmental Science and Technology*, vol. 48, no. 10, pp. 5726-5736, 2014.

- [39] J. A. J. Meesters, J. T. K. Quik, A. A. Koelmans, A. J. Hendriks and D. van der Meent, "Multimedia environmental fate and speciation of engineered nanoparticles: a probabilistic modeling approach," *Environmental Science: Nano*, vol. 3, pp. 715-727, 2016.
- [40] A. L. Dale, G. V. Lowry and E. Casman, "Stream Dynamics and Chemical Transformations Control the Environmental Fate of Silver and Zinc Oxide Nanoparticles in a Watershed-Scale Model," *Environmental Science and Technology*, vol. 49, no. 12, pp. 7285-7293, 2015.
- [41] N. Sani-Kast, M. Scheringer, D. Slomberg, J. Labille, A. Praetorius, P. Ollivier and K. Hyngerbhuler, "Addressing the complexity of water chemistry in environmental fate modeling for engineered nanoparticles," *Science of The Total Environment*, vol. 535, pp. 150-159, 2015.
- [42] H. H. Liu and Y. Cohen, "Multimedia Environmental Distribution of Engineered Nanomaterials," *Environmental Science and Technology*, vol. 48, no. 6, pp. 3281-3292, 2014.
- [43] J. T. Quik, J. J. Klein and A. A. Koelmans, "Spatially explicit fate modelling of nanomaterials in natural waters.," *Water Research*, vol. 80, pp. 200-208, 2015.
- [44] T. Schneider, D. Brower, I. K. Koponen and e. al., "Conceptual model for assessment of inhalation exposure to manufactured nanoparticles," *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, vol. 21, pp. 450-463, 2011.
- [45] "ART (Advanced Reach Tool) User Guide," <https://www.advancedreachtool.com/>.
- [46] S. Kaluza, J. Kleine Balderhaar, B. Honnert, E. Jankowska, P. Pietrowski, M. G. Rosell, C. Tanarro, J. Tejedor and A. Zugasti, "Workplace Exposure to Nanoparticles," European Agency for Safety and Health at Work - Literary Review.
- [47] C. Ostiguy, G. Lapointe, L. Ménard, Y. Cloutier, M. Troitter, M. Boutin, M. Antoun and C. Normand, "Nanoparticles: actual knowledge about occupational health and safety risk and prevention measures," IRRST Report R-455, 2006.
- [48] raspberrypi.org, "raspberrypi," [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/help/faqs/#powerReqs>.
- [49] NAQTS, "NAQTS," [Online]. Available: <http://www.naqts.com/>.
- [50] "Condensation Particle Counter 3007," TSI, [Online]. Available: <http://www.tsi.com/condensation-particle-counter-3007/>.
- [51] "Optical Particle Sizer 3330," TSI, [Online]. Available: <http://www.tsi.com/optical-particle-sizer-3330/>.

12. Anexos

A. Assembly instructions.

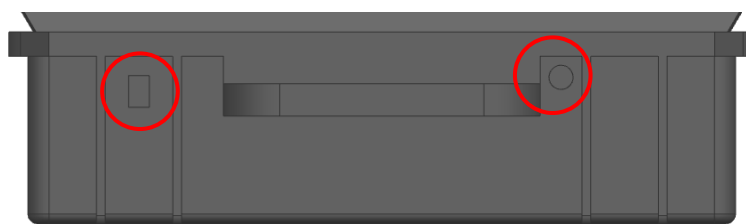
1. Make all the holes in the case needed for the assembly:
 - a. Drill an 8mm hole for the bolts that hold in place the inside panel. Attention is needed to carefully drill in alignment with the circular shapes in the back of the case.



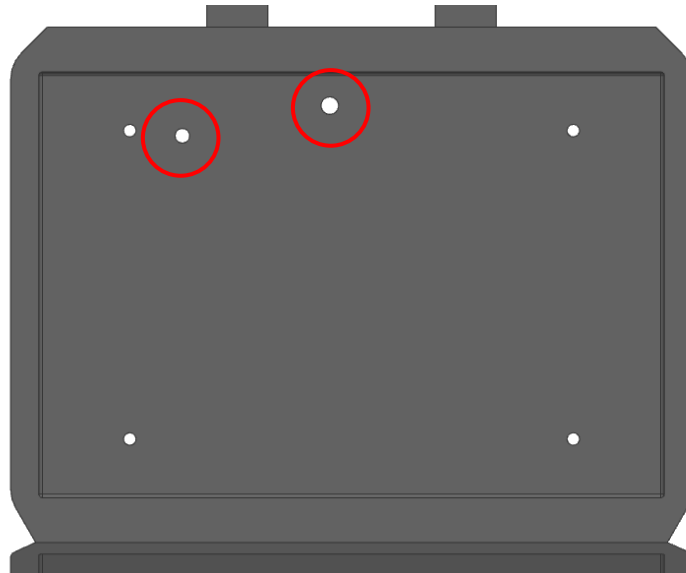
- b. In the right-hand side of the case make the holes needed for the fan and the power connector.



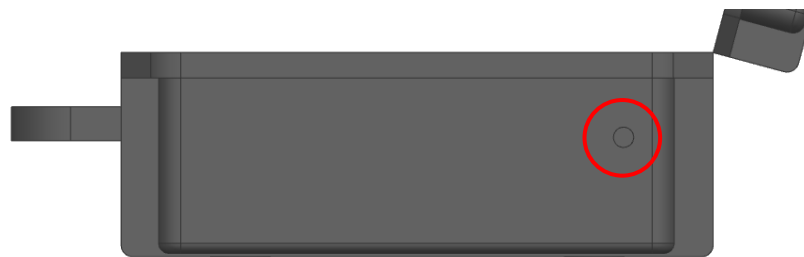
- c. In the top part make the holes for both the power switch and the start button.



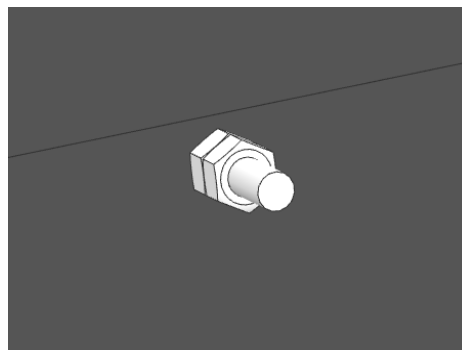
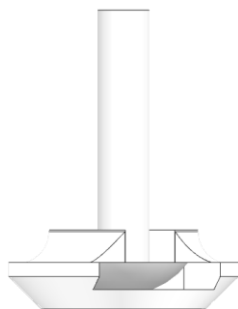
- d. In the back panel of the case make the necessary holes for the inlets (particles and clean air) paying special attention to properly align the inlet of the device with its hole in the panel.



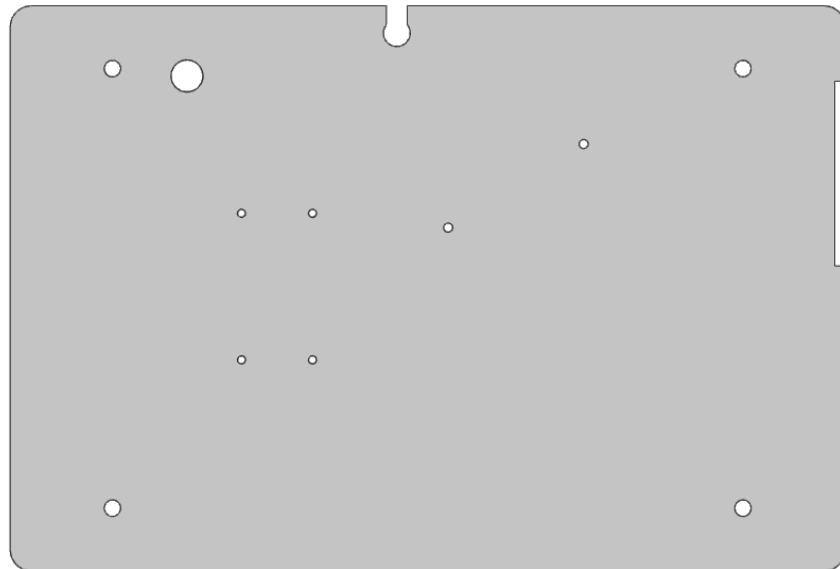
- e. Drill the hole for the device outlet.



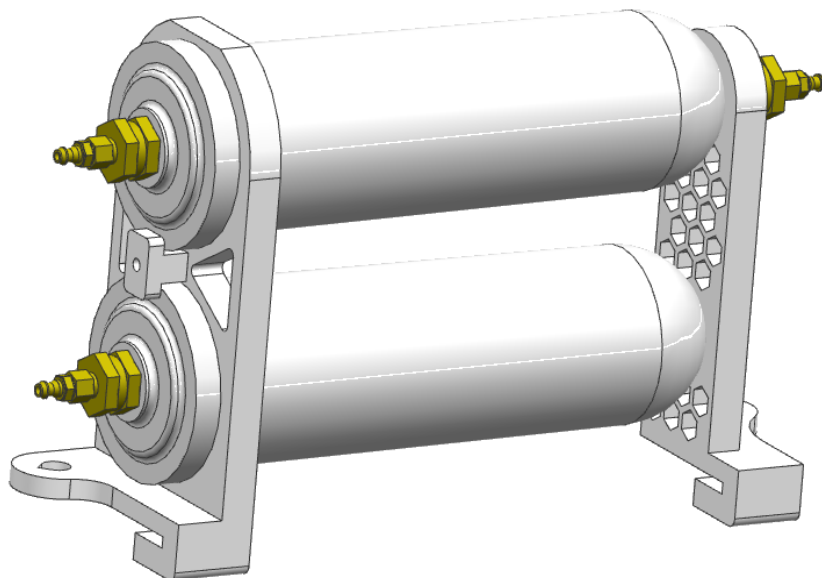
2. Print all the 3D parts and adjust as needed.
3. Prepare the legs and put them in place:



4. Prepare the panel and drill the holes in the inside panel:
 - a. 4mm holes for the external tank and the sensor.
 - b. 8mm holes for the legs' bolts.
 - c. Cut-out for the device inlet.

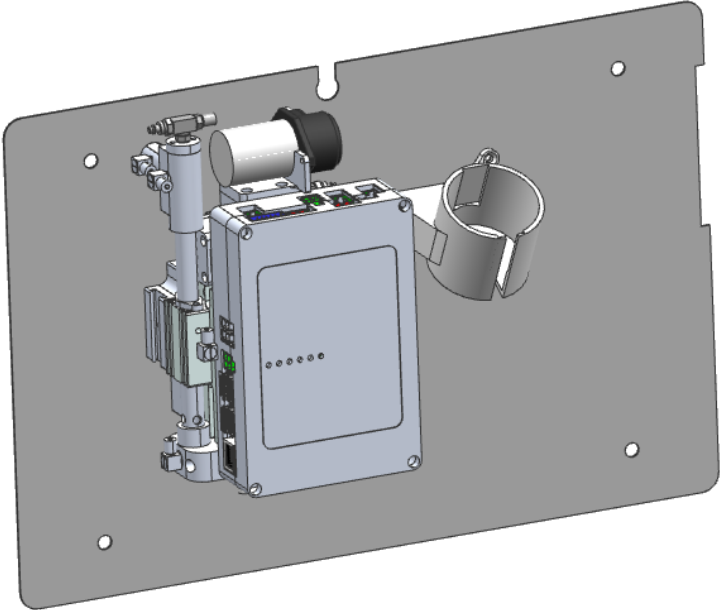


5. Put both HEPA filters in place, the one with 2 connectors goes on top.

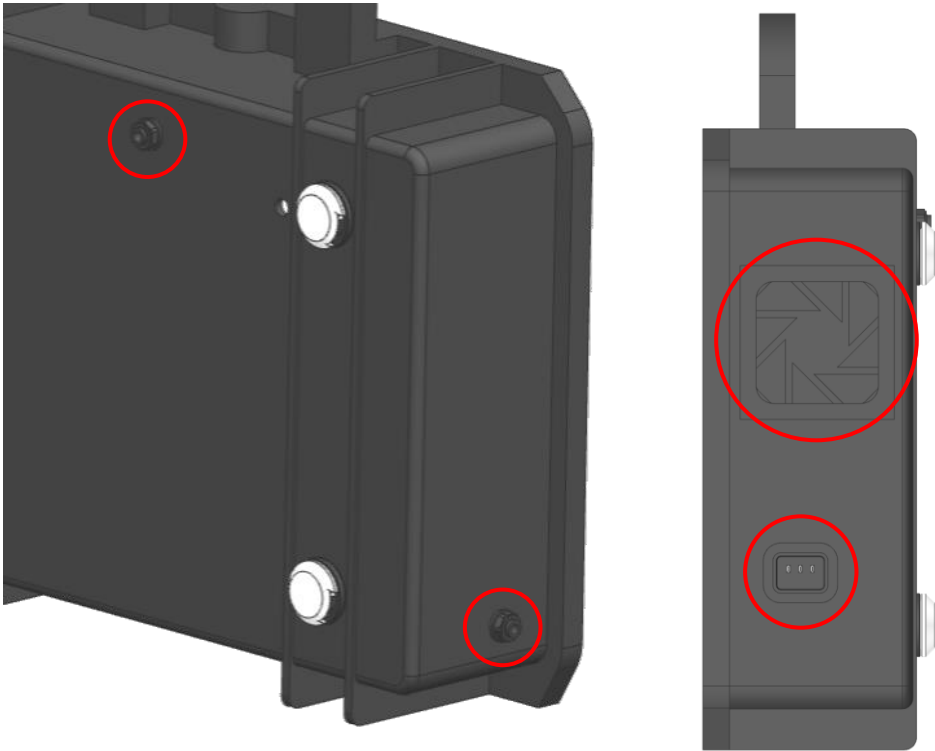


6. Insert a T connector in the peristaltic pump outlet to allow device purges easily.

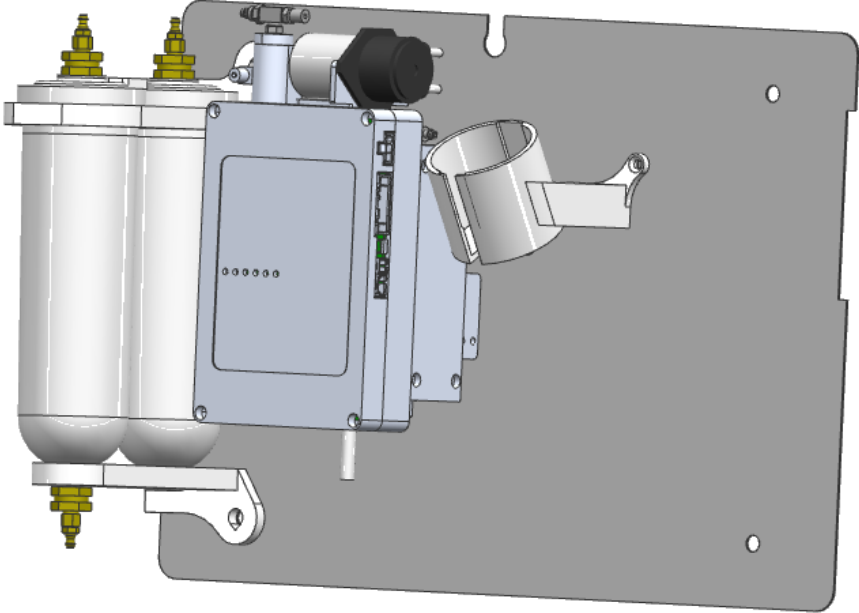
7. Bolt the sensor and the tank holder to the plate.



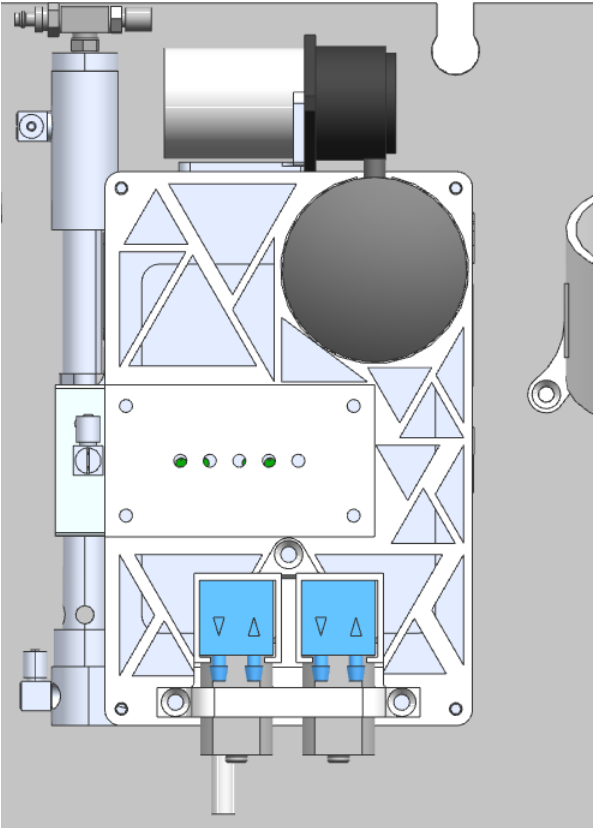
8. Put the fast connector for the inlets and outlets, the power connector and the fan in place.



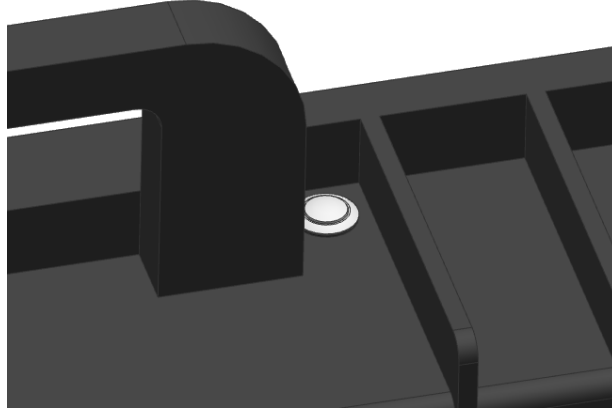
9. Putt he HEPA holder in its position on the plate.



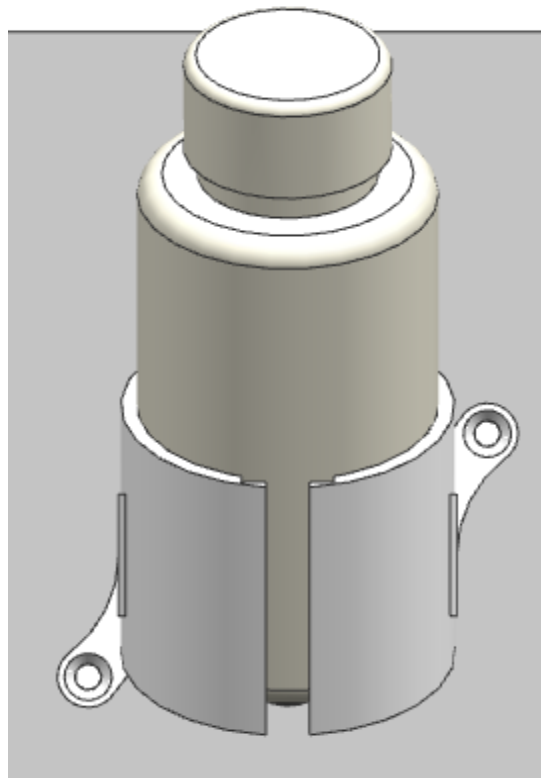
10. Put the pumps, GPS and electronics in place with the 3D printed part.



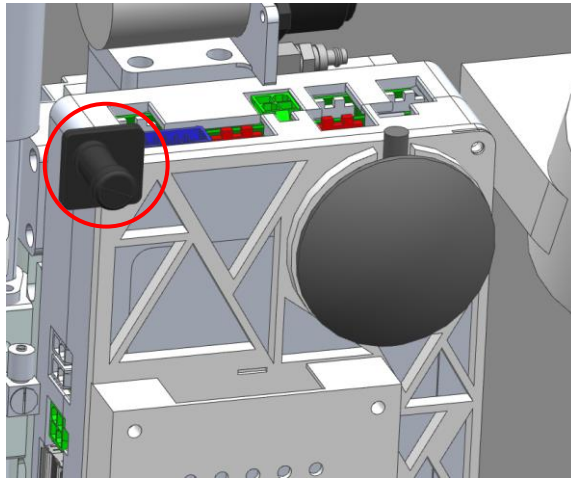
11. Make the connections from sensor to electronics, GPS, Wi-Fi dongle, electronics, pumps, and HEPAs to sensor.
12. Put the start button in place and connect it to the electronics.



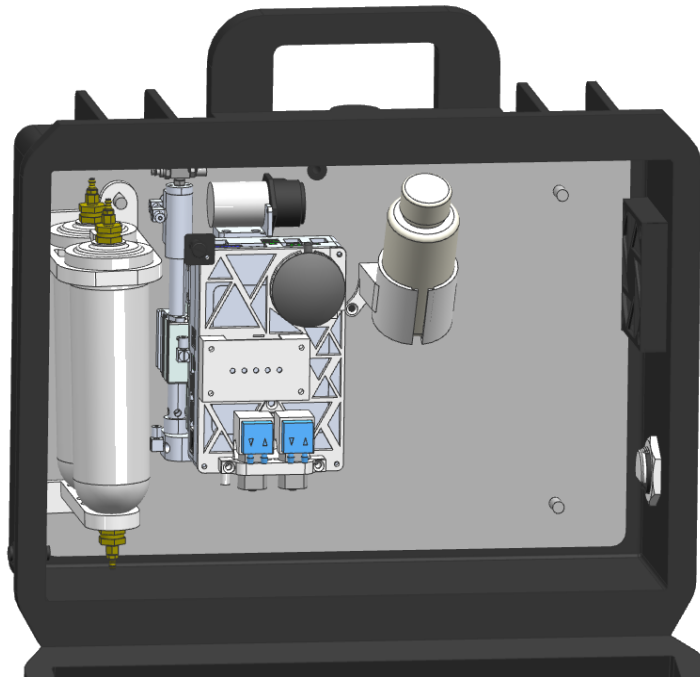
13. Put the external tank in place and connect it to the peristaltic pump.



- Put the purge line in place with its lid (this will be use rarely and must remain closed while the device is on).

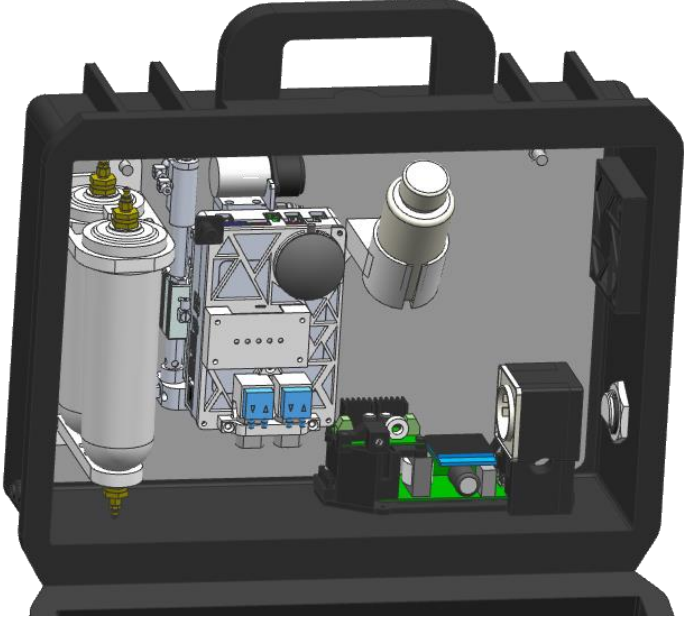


- Carefully place the plate with the HEPAs, sensor and tank holder attached to it.

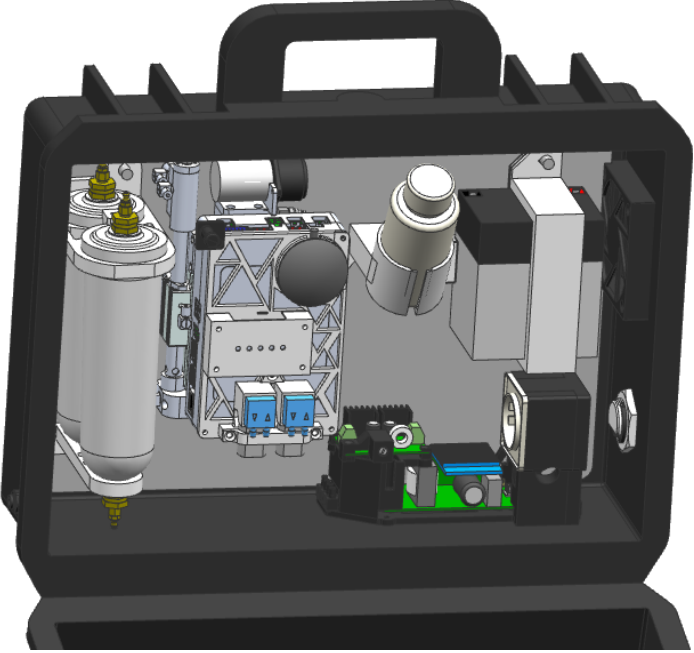


- Connect the outlet to its corresponding pump.
- Thread the fast connector to the sensor particle inlet.
- Wire the PSU

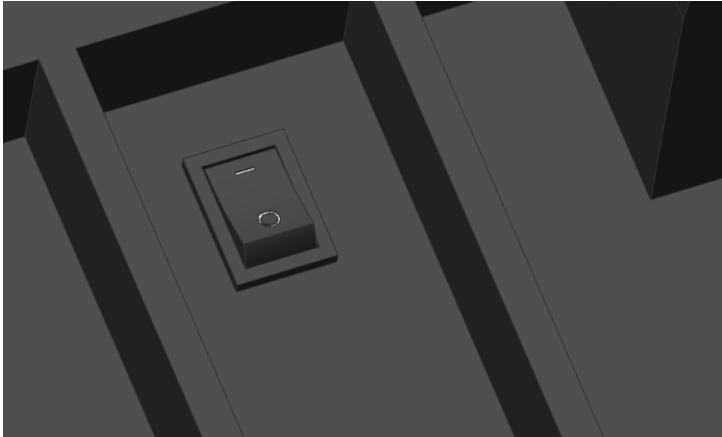
19. Put the PSU in place.



20. Put the battery in place.

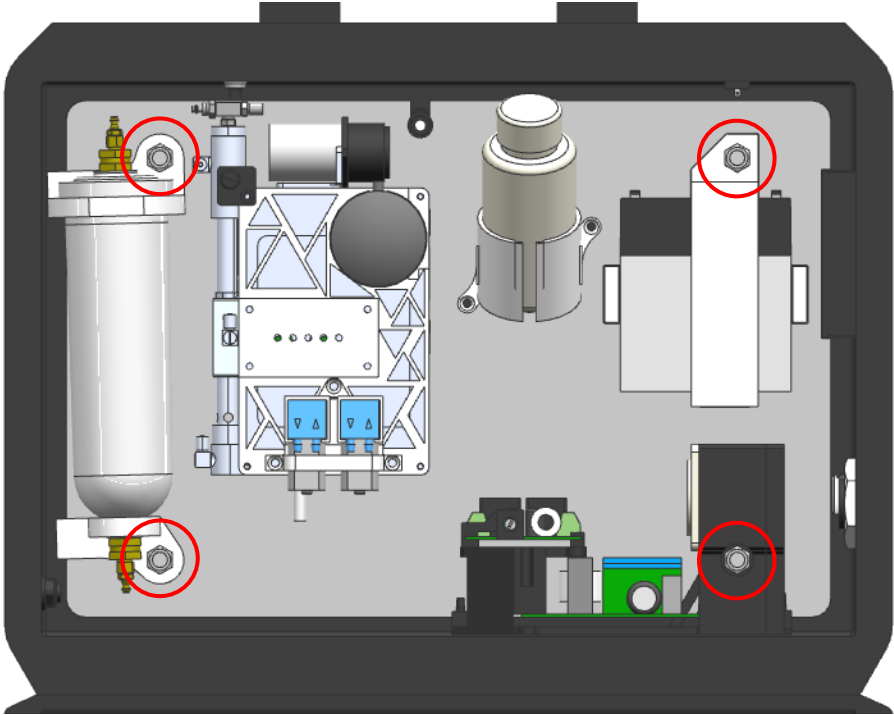


21. Put the power switch with the battery and power cable for the sensor in place and wire it.

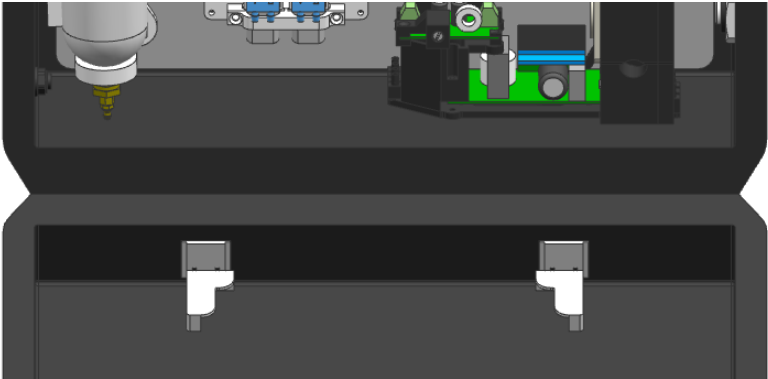


22. Wire the fan.

23. Bolt the panel in place.



24. Place the inside Tablet holder sliding the parts in the case groove.



25. Place the outside Tablet holder using a strong double-sided tape.

