

REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA EN SAN FERNANDO  
BOLETÍN ROA N.º 1/2016



# PROTOTIPO HARDWARE DE BAJO COSTE PARA LA ALERTA SÍSMICA TEMPRANA LOCAL

Fundación Alvargonzález  
Real Instituto y Observatorio de la Armada



MINISTERIO DE DEFENSA

Ángel Vera Herrera



---

# PROTOTIPO HARDWARE PARA LA ALERTA SÍSMICA TEMPRANA LOCAL

---

Proyecto ganador de la beca de ayuda a la investigación sobre temas de actividad científica y cultural del Real Instituto y Observatorio de la Armada  
Fundacion Alvargonzalez, año 2015

San Fernando, junio de 2016

Ángel Vera Herrera  
*en colaboración con*  
Real Instituto y Observatorio de la Armada



## CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

Edita:



<http://publicaciones.defensa.gob.es/>

© Autor y editor, 2016

NIPO: 083-16-358-7 (impresión bajo demanda)

NIPO: 083-16-359-2 (edición en línea)

Fecha edición: julio 2016

Las opiniones emitidas en esta publicación son de la exclusiva responsabilidad del autor de la misma.

Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de la Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del © *Copyright*.

Foto portada:

Fachada del Edificio Principal del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (siglo XVIII).

## **Nota del autor.**

El proyecto «Prototipo hardware para la alerta sísmica temprana local» ha sido bautizado finalmente como Pi-EEWS. Más información al respecto en el capítulo *El prototipo Pi-EEWS*, apartado *Sobre el nombre del prototipo*.

Dedicado a mi querida familia, amigos y compañeros.

Por soportarme durante los largos meses de trabajo.

Por las palabras de ánimo como «estás fatal».

Por ayudarme en todo lo que han podido.

Por mis ausencias físicas y mentales.

Por hacerme un hueco en el pañol.

Por la paciencia que han tenido. . .

. . .y por lo que les queda por aguantar.

# Agradecimientos

*«¡Quién hubiera dicho hace unos años que aplicaría los conocimientos que poseo en ingeniería informática al fascinante campo de la geodesia y la geofísica!»*

Considero este trabajo como mi primer proyecto de investigación real. Y no son pocas las personas que han hecho posible su desarrollo. Personas que, de una forma u otra, han impulsado mis esfuerzos por el camino adecuado. Personas con las que he sobrepasado multitud de obstáculos, muchos debidos a mi propia inexperiencia. Personas que han depositado su confianza en en mí y de las que he aprendido muchísimo en los más diversos aspectos.

Espero con las siguientes líneas poder expresar todo mi agradecimiento.



A la Fundación Alvargonzález, por la confianza que han depositado en mi al concederme la beca de ayuda a la investigación con la que este proyecto ha sido realizado.

A mis directores de Trabajo Fin de Grado, el Dr. Carlos Rioja del Río y el Dr. Arturo Morgado Estévez. Multitud de razones tengo para estar en deuda con ellos, entre las que destaco el haberme presentado al ROA, brindándome la oportunidad de trabajar con ellos, siendo el detonante de los enriquecedores años que estoy viviendo. También por guiarme por el camino adecuado, especialmente durante la fase de diseño del hardware.

A todo el personal del ROA, en especial a la Sección de Geofísica. Quisiera destacar al jefe de la Sección el Dr. Antonio Pazos, por su labor de seguimiento y corrección, aclarando las cuestiones teóricas que surgían durante el desarrollo. Es imposible olvidarse del resto de estupendos compañeros que forman el equipo. Mención especial merecen la ingeniera informática Mireya López Mesa y el técnico informático Javier Gallego Carrasco, las personas que más cercanas han estado al proyecto, en el que han participado activamente. Con ellos he trabajado codo con codo, y sin su excelente trabajo y las ideas que han aportado, este proyecto no habría salido adelante. Mencionar también a Jose Antonio Peña García, Jesús Quijano Junquera, Guillermo Muñoz-Delgado Serrano y José Prian Nieto. Muchas gracias a la Sección por atenderme aún teniendo una enorme carga de trabajo.

A los ingenieros informáticos Jesús Relinque Madroñal, Daniel Jesús Rosa Gallardo y José Alcántara Muñoz, compañeros con los que desarrollé el trabajo que ahora conforma las raíces de este proyecto.

A José Alcántara Muñoz, nuevamente, por la ayuda durante el proceso de documentación y realización de diagramas y esquemas del software, así como por sus consejos durante la implementación del sistema; y a José María Barba, por la ayuda ofrecida durante el desarrollo hardware.

A mi padre, por su ayuda en la elaboración de los planos, y al ingeniero técnico naval José Manuel Rodríguez Marabot por su colaboración en la fabricación de la plataforma nivelable.

A María Jesús González Álvarez, por no dudar en realizar el diseño del logotipo, y a mi hermana Lucía Vera Herrera, por encargarse de la fotografía durante el proyecto.

Finalmente a todos los compañeros, amigos y familiares que me han motivado y ayudado en todo momento, especialmente a mis padres el apoyo que me han brindado, no solo durante el desarrollo del proyecto, sino durante toda mi vida.

A todos, muchas gracias.

# Resumen

Con el propósito de alertar de forma temprana y local de la inminente llegada de las ondas destructivas de un seísmo, en el marco del proyecto ALERTES\_RIM se ha desarrollado un prototipo hardware con capacidad de adquisición y datación de datos de movimiento del suelo a partir de sensores de aceleración que, unido a un sistema software autónomo y siguiendo la filosofía de sistemas de alerta sísmica temprana (SAST, EEWs en inglés) como SeisComP, es capaz de detectar y analizar las ondas primarias de un seísmo (ondas P, no destructivas y primeras en llegar), y determinar de forma temprana un nivel de alerta.

El software, ejecutándose bajo Linux en el ordenador de placa reducida de código abierto Raspberry Pi, analiza de forma continua en tiempo real los datos en búsqueda de ondas primarias. Tras la detección, se data el momento de llegada de la onda P (pick), se filtran los datos, y se analizan los primeros instantes de tiempo para calcular los parámetros  $P_d$ ,  $\tau_c$ , y sus magnitudes relacionadas, así como la relación señal/ruido. Con estos parámetros y una tabla de decisión, se lanza la alerta mediante un socket, si procede. La novedad se encuentra en el análisis de datos en el momento de su adquisición (tiempo real), antes del empaquetado de la información sísmica (Mini-SEED), reduciendo el tiempo de generación de la alerta.

Como conclusión, se ha obtenido un prototipo que reduce el tiempo de generación de alertas sísmicas locales, y cuyas funcionalidades pueden ampliarse en un futuro. Este prototipo actualmente se encuentra en fase de pruebas y depuración.



Figura 1: Logotipo diseñado para el prototipo desarrollado: Pi-EEWS.

# Índice General

Agradecimientos	V
Resumen	VI
Índice General	VIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Motivación</b>	<b>3</b>
2.1. Limitaciones de los SAST regionales . . . . .	3
2.1.1. Latencia . . . . .	3
2.1.2. Zonas ciegas . . . . .	7
2.1.3. Conclusión . . . . .	8
2.2. Sistemas «in situ» . . . . .	8
<b>3. El prototipo Pi-EEWS</b>	<b>9</b>
3.1. Sobre el nombre del prototipo . . . . .	9
3.2. Sobre el prototipo . . . . .	9
3.3. Objetivos y líneas de trabajo . . . . .	11
3.3.1. Objetivos . . . . .	11
3.3.2. Líneas de trabajo . . . . .	11
3.4. Área aplicada . . . . .	12
<b>4. Metodología y fundamento teórico</b>	<b>13</b>
4.0.1. Algoritmo de detección . . . . .	13
4.0.2. Tabla de decisión . . . . .	15
4.0.3. Parámetros $\tau_c$ y $P_d$ . . . . .	15
4.0.4. Relación señal/ruido y fiabilidad de los resultados . . . . .	17
4.0.5. Cálculo de la magnitud momento a partir de $\tau_c$ . . . . .	18
<b>5. El desarrollo de Pi-EEWS como SAST local</b>	<b>19</b>
5.1. Arquitectura física . . . . .	19
5.1.1. Sistema computador . . . . .	21
5.1.2. Sistema de adquisición . . . . .	22
5.1.3. Sistema de datación . . . . .	24
5.1.4. Sistema de alimentación . . . . .	25
5.1.5. Sistema de encapsulado . . . . .	26
5.1.6. Sistema de indicadores . . . . .	30
5.1.7. Montaje del sistema hardware . . . . .	32
5.1.8. Ventajas del sistema hardware . . . . .	33
5.2. Arquitectura lógica . . . . .	34
5.2.1. Controladores de dispositivo . . . . .	34
5.2.2. El software PiEEWS-SW . . . . .	35
5.2.3. Cliente de visualización gráfica . . . . .	48

---

5.2.4. Ventajas del sistema software . . . . .	49
<b>6. Análisis de resultados</b>	<b>50</b>
6.1. Periodo de pruebas a tiempo real . . . . .	50
6.2. Perspectiva hardware . . . . .	51
6.3. Perspectiva software . . . . .	52
<b>7. Conclusiones</b>	<b>54</b>
<b>Epílogo</b>	<b>57</b>
<b>A. Planos de fabricación, desarrollo y montaje de aparamenta</b>	<b>57</b>
<b>B. Diseño de las placas de circuito impreso (PCB)</b>	<b>74</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>78</b>

# Índice de figuras

1.	Logotipo diseñado para el prototipo desarrollado: Pi-EEWS. . . . .	VI
1.1.	Forma de onda del seísmo del Cabo San Vicente del 12/02/2007 recogida en la estación PFVI, con la marca de la llegada de las ondas P y S y su diferencia de tiempo $t_{S-P}$ . . . . .	1
1.2.	Diagrama de los módulos que componen SeisComP (verde) [10], junto con el módulo del prototipo ALERTES-SC3 (amarillo)[9] . . . . .	2
2.1.	Gráfico de un posible camino que pueden seguir los datos. Primero se envían mediante satélite a un centro de datos desde una estación perteneciente al Instituto Geográfico Nacional (IGN) por ejemplo, y seguidamente a ALERTES mediante protocolo Seed-Link. Cada flujo (flechas negras) posee un retardo que sumados forman la latencia de transmisión. . . . .	3
2.2.	Histograma del tiempo de duración de los paquetes Mini-SEED en la estación EVO. . . . .	5
2.3.	Histograma del retardo entre la llegada real de la onda a la estación EVO y la posterior obtención del parámetro $P_d$ por ALERTES. . . . .	5
2.4.	Histograma del tiempo de duración de los paquetes Mini-SEED en la estación UCM. . . . .	6
2.5.	Histograma del retardo entre la llegada real de la onda a la estación UCM y su posterior datación por ALERTES. . . . .	6
2.6.	Histograma resumen del estudio. Se representa en el histograma la media del retardo entre las llegadas reales de las ondas P a las estaciones de la red WM y su posterior datación. . . . .	7
3.1.	Detalle del logotipo serigrafiado en la plancha delantera del módulo hardware principal. Se observan igualmente algunos indicadores led y conectores de panel. . . . .	9
3.2.	A la izquierda, perspectiva del módulo principal. A la derecha, perspectiva del módulo de instrumentación. Ambas corresponden a la versión finalizada de los módulos. . . . .	10
4.1.	Arriba, la señal original del canal HLZ con un pick asociado, detectado por el sistema de picado de Pi-EEWS. Abajo, la evolución del algoritmo detector de fase, donde se representan el umbral y la métrica respecto al tiempo. Pruebas con $k = 6$ . . . . .	14
4.2.	Componente vertical del desplazamiento para el terremoto del Cabo de San Vicente del 12/02/2007 registrado en PFVI (200km del epicentro), en una ventana de tiempo de $\tau_0 = 3$ segundos. Se señala la llegada de la onda P y el pico de desplazamiento máximo $P_d$ [5]. . . . .	16
5.1.	Representación gráfica de la arquitectura del sistema. . . . .	19
5.2.	Esquema de la arquitectura física dibujado sobre secciones de los módulos. . . . .	20
5.3.	Vista de planta del SBC Raspberry Pi 3 Modelo B, computador del prototipo. . . . .	22
5.4.	Perspectiva del módulo STEVAL-MKI161V1. . . . .	23
5.5.	Perspectiva de la placa Ultimate GPS Breakout V3. . . . .	24

5.6.	Perspectiva del SAI S.USV pi advanced. . . . .	25
5.7.	Soporte estructural del módulo del computador sin mecanizar, junto con sus accesorios. . . . .	26
5.8.	Composición con fotografías de las distintas fases de fabricación de la plataforma niveladora y su posterior integración con el sistema. . . . .	27
5.9.	Detalle de la circuitería del módulo del computador. A la izquierda las conexiones del panel frontal. A la derecha el interior de la caja de instrumentación. . . . .	27
5.10.	Proceso de mecanizado y serigrafiado de los paneles delanteros y traseros de las cajas de instrumentación. . . . .	28
5.11.	Detalle de los conectores de panel de los módulos hardware. Arriba a la izquierda el panel delantero del módulo principal con los conectores USB y HDMI. Abajo a la izquierda, el panel trasero del módulo principal con la toma de alimentación, la toma de red, y la toma para el módulo de instrumentación. A la derecha, el panel delantero del módulo de instrumentación. . . . .	29
5.12.	Cableado externo. De izquierda a derecha, cableado de interconexión del módulo de instrumentación con el principal, latiguillo con conector RJ45 macho, cable para alimentación, y cableado RG174 y antena GPS, junto con adaptadores SMA a TNC y BNC. . . . .	30
5.13.	Testigos encendidos durante el funcionamiento a tiempo real del prototipo en la estación SFS de la red WM. También observamos las conexiones del panel trasero. . . . .	31
5.14.	A la izquierda, piso compuesto por el módulo inercial y una PCB, junto con el módulo de instrumentación. A la derecha, piso de electrónica compuesto por el ordenador, el sistema SAI, PCB y batería, junto con el módulo principal. . . . .	32
5.15.	Captura tomada durante la implementación del driver de control del módulo inercial LSM6DS0 utilizando el sistema de programación distribuida que ofrece el IDE PyCharm. . . . .	35
5.16.	Diagrama de bloques de los módulos que componen el software de alerta sísmica temprana PiEEWS-SW, implementado para el prototipo Pi-EEWS. Observamos en cada bloque el nombre del módulo dentro del sistema, su funcionalidad y una breve descripción de las tareas que realiza. También se muestran las interfaces que proveen (círculos), las publicaciones (mensajes) y las peticiones (semicírculos). Los cuadrados blancos indican una interfaz al exterior mediante socket ZMQ, de tecnología TCP/IP. . . . .	38
5.17.	Diagrama de secuencia básico del funcionamiento del software PiEEWS-SW. El sistema operativo inicia el software en el arranque. Exceptuando el sistema de adquisición que recoge los datos directamente del sensor inercial, los módulos se encuentran a la escucha del publicador correspondiente que provee como datos de salida los datos de entrada requiere cada módulo (ver <i>Tabla 5.11</i> y <i>Tabla 5.12</i> ). . . . .	39
5.18.	Ventana de tiempo de 11 segundos. En rojo, la señal del canal HLZ original adquirida por el módulo PiEEWS-ACQM. En verde, la señal acondicionada tras aplicar diversos filtros en el módulo de detección. Las señales han sido dibujadas por un cliente desarrollado para el sistema (ver más adelante el apartado <i>Cliente de visualización gráfica</i> ). . . . .	40
5.19.	Diagrama de secuencia básico del funcionamiento del módulo de detección de ondas P PiEEWS-DETM. . . . .	41

5.20. Diagrama de secuencia básico del funcionamiento del módulo de análisis de ondas P PiEEWS-PWAM. El cálculo de la SNR se realiza de forma paralela al de $P_d$ y $\tau_c$ . . . . .	42
5.21. Principio del fichero plano con información sísmica adquirida el 26/05/2016, durante el periodo de pruebas a tiempo real junto a la estación SFS (San Fernando) de la red sísmológica WM. Se observa la cabecera del fichero, las muestras de cada componente y su datación. . . . .	45
5.22. Fichero de logs del módulo PiEEWS-HWCM del día 01/06/2016. Podemos observar información durante el despliegue del sistema (INFO), así como un evento de pérdida de la fuente de alimentación principal (WARNING). . . . .	47
5.23. Podemos observar el cliente de visualización gráfica adquiriendo datos a tiempo real del canal HLZ durante el periodo de pruebas del prototipo en la estación SFS de la red WM. Observamos también alguna de las opciones incorporadas en el visor. Se ha forzado la aparición de un pick mediante la aplicación de vibraciones cercanas al módulo de instrumentación. . . . .	48
6.1. A la izquierda, el módulo de telemetría junto a un acelerómetro del Instituto Geográfico Nacional (IGN), ubicado en la estación SFS (San Fernando) de la red WM. A la derecha, perspectiva de uno de los pasillos de la estación con el prototipo Pi-EEWS al fondo. . . . .	51
6.2. A la izquierda sismómetro STS-2.5 ubicado en la estación SFS. A la derecha, mensaje de alerta sísmica temprana mostrada por una terminal conectada a la interfaz del módulo PiEEWS-SWCM. Se ha simulado mediante el análisis de la forma de onda de la componente de datos HHZ de la estación UCM (Universidad Complutense de Madrid, Madrid) perteneciente a la red WM, del día 23 de febrero de 2015. La alerta corresponde a la detección del evento de magnitud real 5,2 acontecido esa fecha en Albacete . . . . .	53
7.1. Asegurar la protección de vidas humanas y de infraestructuras críticas, como lo son colegios, aeropuertos, refinerías, hospitales, redes ferroviarias o plataformas petrolíferas, forma parte fundamental de la motivación por la que se ha realizado este proyecto. . . . .	55

# Índice de tablas

3.1.	Resumen de los objetivos principales del proyecto. . . . .	11
3.2.	Resumen de las líneas de trabajo de desarrollo hardware. . . . .	11
3.3.	Resumen de las líneas de trabajo de desarrollo software. . . . .	12
4.1.	Niveles de alerta establecidos. . . . .	15
4.2.	Tabla de decisión con los umbrales establecidos para el suroeste de Iberia [5]. Los niveles umbrales se han tomado del estudio de A. Zollo [4]. . . . .	15
5.1.	Resumen de requisitos que debe cumplir el sistema computador. . . . .	21
5.2.	Características del ordenador de placa reducida Raspberry 3 Modelo B . . . .	21
5.3.	Resumen de requisitos que debe cumplir el sensor. . . . .	23
5.4.	Características del módulo inercial LSM6DS0. . . . .	23
5.5.	Características destacables de la placa Ultimate GPS Breakout V3. . . . .	24
5.6.	Características del sistema de alimentación ininterrumpida S.USV pi advanced.	25
5.7.	Tabla del comportamiento de los indicadores en función del estado del sistema.	31
5.8.	Algunas de las ventajas que presenta la arquitectura física seguida así como los componentes hardware seleccionados. . . . .	33
5.9.	Configuración aplicada al módulo GPS MTK3339. Destacar el contenido de las sentencias NMEA: PGTOP contiene información del estado de la antena, GPZ- DA contiene información de tiempo, GPZGA contiene información del estado de la conexión con los GPS. . . . .	34
5.10.	Configuración aplicada al módulo inercial LSM6DS0. Actualmente solo anali- zamos los datos de velocidad de la componente z, aunque la monitorización se aplica igualmente al resto de componentes y a los datos de velocidad angular, también en las 3 componentes. . . . .	35
5.11.	Resumen 1 de los datos de entrada y salida de los módulos que componen el software PiEEWS-SW, así como la actividad que lleva a cabo cada uno. Se tratan los módulos PiEEWS-ACQM, PiEEWS-DETM, PiEEWS-PWAM y PiEEWS- ALRM. . . . .	36
5.12.	Resumen 2 de los datos de entrada y salida de los módulos que componen el software PiEEWS-SW, así como la actividad que lleva a cabo cada uno. Se tratan los módulos PiEEWS-SWCM PiEEWS-HWCM, PiEEWS-BCKM y PiEEWS- STRM. . . . .	37
5.13.	Ejemplo real de un paquete JSON enviado por el módulo PiEEWS-SWCM du- rante una simulación realizada con la forma de onda correspondiente a la compo- nente de datos HHZ del día 11 de mayo de 2011 en la estación UCM (Universidad Complutense de Madrid, Madrid) perteneciente a la red WM. La alerta está aso- ciada al evento de magnitud 5.1 ocurrido esa fecha en Lorca (Murcia). Se ha utilizado la plantilla de la primera versión (y actual) del formato diseñado. A partir de esta plantilla, los clientes que escuchen del publicador pueden recom- poner los datos para utilizarlos. . . . .	43

- 
- 5.14. Ejemplo real de un paquete JSON enviado por el módulo PiEEWS-STRM el día 26/05/2016 a las 13:56:06.900 horas (UTC). Se ha utilizado la plantilla de la primera versión (y actual) del formato diseñado. A partir de esta plantilla, los clientes que escuchen del publicador pueden recomponer los datos para utilizarlos. 46
- 5.15. Algunas de las ventajas que presenta la arquitectura lógica seguida. . . . . 49



Los SAST presentan dos enfoques: regional (más ampliamente utilizado), y local o «in situ», que complementa al primero en las zonas más próximas al epicentro del sismo. La concepción regional se basa en la determinación de los parámetros  $\tau_c$  y  $P_d$  en varias estaciones, estimando la magnitud, hipocentro y tiempo de origen del evento; así como el «lead time» y una estimación del PGV, la intensidad esperada, etc [3]. Por otra parte, la concepción local se basa en la obtención de los parámetros a partir de los datos de una única estación, no siendo necesario realizar cálculos de localización ni de la magnitud exacta del evento [4]. La comparación de ambos parámetros haciendo uso de una tabla de decisión [4][5] permite conocer la amenaza real que supone el evento antes de la llegada de las ondas S destructivas [6], posibilitando la generación de alertas tempranas en zonas próximas a la estación.

En el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) se desarrolló un prototipo de SAST regional basado en el software SeisComP denominado ALERTES-SC3 (*Figura 1.2*) [7], y un prototipo de SAST local basado en el programa autopick de SeisComP [8]. Ambos fueron desarrollados en el marco de los proyectos de investigación ALERTES (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: aplicación al sur de España) (CGL2010-19803-C03-03) y ALERTES-RIM (Sistema de Alerta Sísmica Temprana: Sistema regional y onsite para la región Ibero-Mogrebí) (CGL2013-45724-C03-03-R) financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad [3][9].

En el presente trabajo, enmarcado en los citados proyectos de investigación ALERTES y ALERTES-RIM, y continuando la línea de desarrollo e investigación de sistemas SAST locales, se pretende desarrollar un prototipo hardware con capacidad de adquisición de datos a tiempo real, y que además integre las características de SAST «in situ», para permitir la generación de alertas sísmicas tempranas locales de forma rápida. Además, se procederá en un periodo de pruebas a la adquisición y recogida de datos a tiempo real que confirmarán la eficiencia del prototipo y ayudará a la modificación y mejora del sistema.

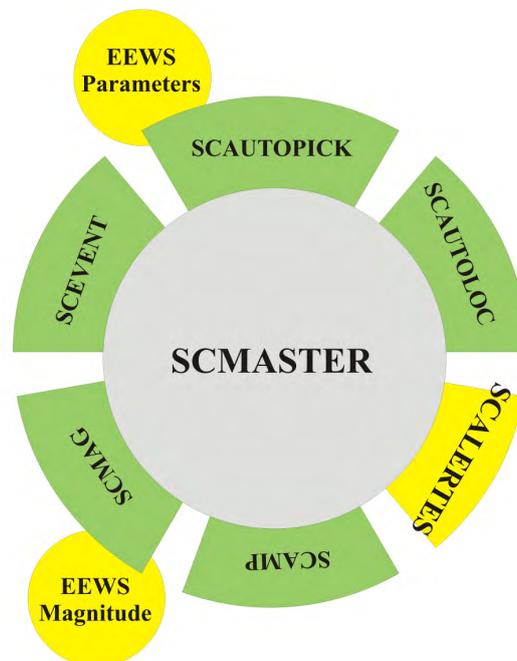


Figura 1.2: Diagrama de los módulos que componen SeisComP (verde) [10], junto con el módulo del prototipo ALERTES-SC3 (amarillo)[9]

## 2. Motivación

En el presente capítulo, a partir del análisis y estudio de las *limitaciones de los sistemas SAST regionales*, se expondrán los motivos por los que se ha llevado a cabo la investigación y desarrollo de este proyecto.

### 2.1. Limitaciones de los SAST regionales

Los sistemas de alerta sísmica temprana regionales no pueden llevar a cabo alertas rápidas en las zonas próximas al epicentro. En este hecho influyen tres factores: las *zonas ciegas*, el retardo en la transmisión de los paquetes de datos desde las estaciones sísmicas y el rango temporal de datos que se almacena en ellos. A continuación se analizarán estos factores.

#### 2.1.1. Latencia

Una limitación de estos sistemas es la *latencia* (retardos temporales) con la que los datos provenientes de las estaciones sísmológicas se reciben en el centro de datos. Influyen dos factores: el rango temporal de datos que se almacena en el paquete en la propia estación, y su posterior transmisión al computador del SAST en el que se realiza el análisis de los datos.

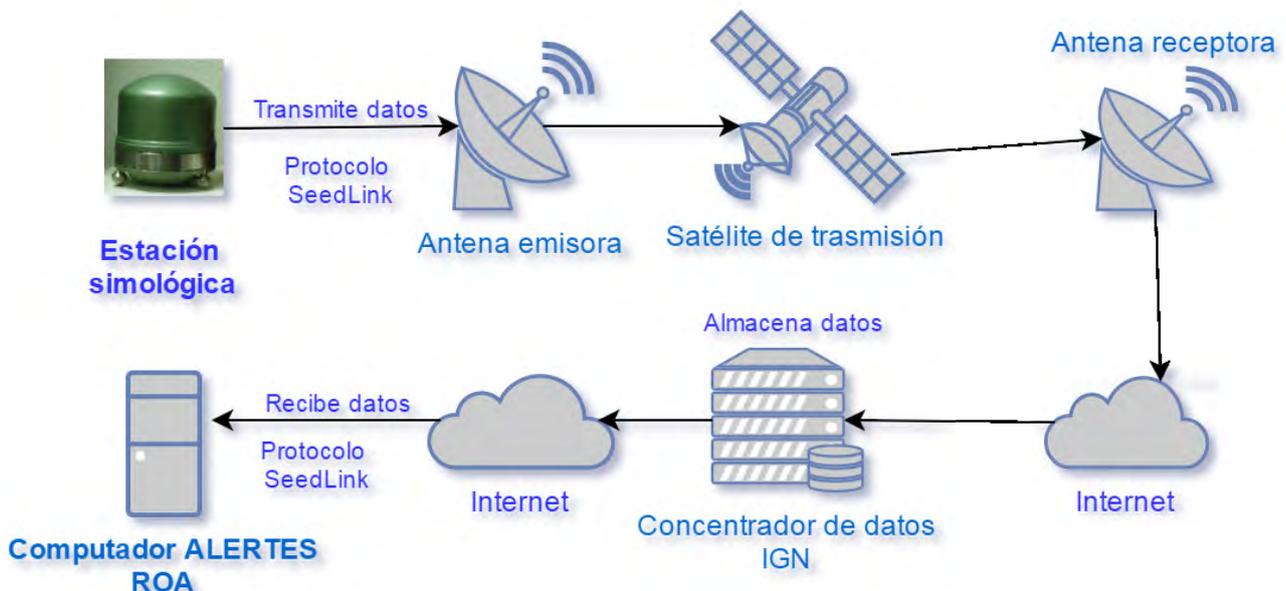


Figura 2.1: Gráfico de un posible camino que pueden seguir los datos. Primero se envían mediante satélite a un centro de datos desde una estación perteneciente al Instituto Geográfico Nacional (IGN) por ejemplo, y seguidamente a ALERTES mediante protocolo SeedLink. Cada flujo (flechas negras) posee un retardo que sumados forman la latencia de transmisión.

El retardo producido por la duración de los paquetes es debida al uso que hacen estos sistemas del protocolo *SeedLink* para la transmisión [11], lo cual implica que los datos obtenidos por la adquisición deben comprimirse en paquetes tipo *Mini-SEED* [12]. Estos paquetes están configurados para tener un tamaño fijo, por lo que la duración temporal de los paquetes varía dependiendo del ruido presente en la estación. El retardo se encuentra precisamente en la espera para que el paquete alcance el tamaño definido y entonces pueda ser enviado al centro de datos.

Como se ha indicado, cuando el paquete alcanza el tamaño definido debe enviarse al computador encargado del análisis de los datos (usualmente ubicado en instituciones alejadas de la estación pertinente) a través de un sistema de telecomunicaciones como módem, ADSL, radiofrecuencia, GSM, etc. En este tipo de redes de comunicaciones existen retardos considerables, que además se incrementan si existen intermediarios (por ejemplo, si los paquetes se transmiten desde la estación a una base de datos remota, y el sistema SAST regional se ha de conectar a dicha base de datos) (*Figura 2.1*).

## Estudio de latencias

Se ha realizado un estudio de latencias a partir del análisis de 8000 picks datados por ALERTES-SC3 en diversas estaciones sismológicas de la red geodésica Western Mediterranean (WM), pertenecientes al proyecto ALERT-ES [9].

Para ello, se han estudiado los tiempos de duración de los paquetes Mini-SEED asociados a los picks, los cuales están definidos para alcanzar un tamaño de 512 *bytes*. Además, se han calculado los tiempos de retardo entre la llegada real de la onda P a la estación y el momento de datación en el computador de ALERTES-SC3, ubicado en el ROA. En esta diferencia temporal no solo influye la duración de los paquetes y el retardo de la red, sino además el hecho de que es probable que toda la información sísmica que necesita el sistema para datar un pick y realizar los análisis no se encuentre en un solo paquete, siendo necesario esperar a la creación y llegada de todos los paquetes necesarios, acumulando los retardos producidos por la duración de los paquetes y la red.

Veamos un ejemplo:

Un pick se encuentra al principio de un paquete de 3 segundos ( $\text{pick} = 1\text{ s}$ ). Se produce un retardo por la duración del paquete ( $3\text{ s} - 1\text{ s} = 2\text{ s}$ ) y por su transmisión al computador encargado del cálculo (2 s por ejemplo) acumulando 4 segundos. El sistema necesita de tres segundos después del pick para el análisis, por lo que es necesario esperar la llegada de otro paquete. Entonces al cúmulo se les suma el tiempo restante para que el nuevo paquete alcance el tamaño definido (1,5 s por ejemplo, ya que depende del ruido existente), y 2 s por la transmisión, acumulando 7,5 segundos de retardo entre la llegada real del pick y su datación.

En las *Figuras 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5* podemos observar como ejemplo los resultados los análisis de latencias aplicados en las estaciones EVO (Évora, Portugal) y UCM (Valdilecha, Madrid), respectivamente.

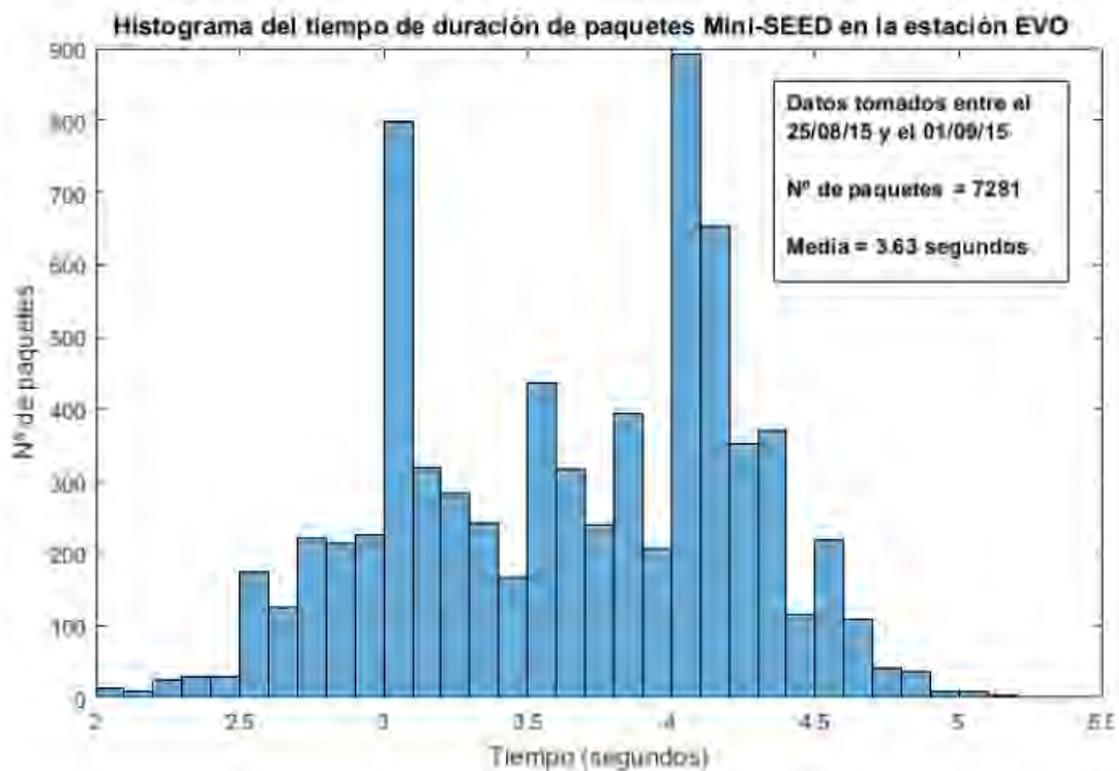


Figura 2.2: Histograma del tiempo de duración de los paquetes Mini-SEED en la estación EVO.

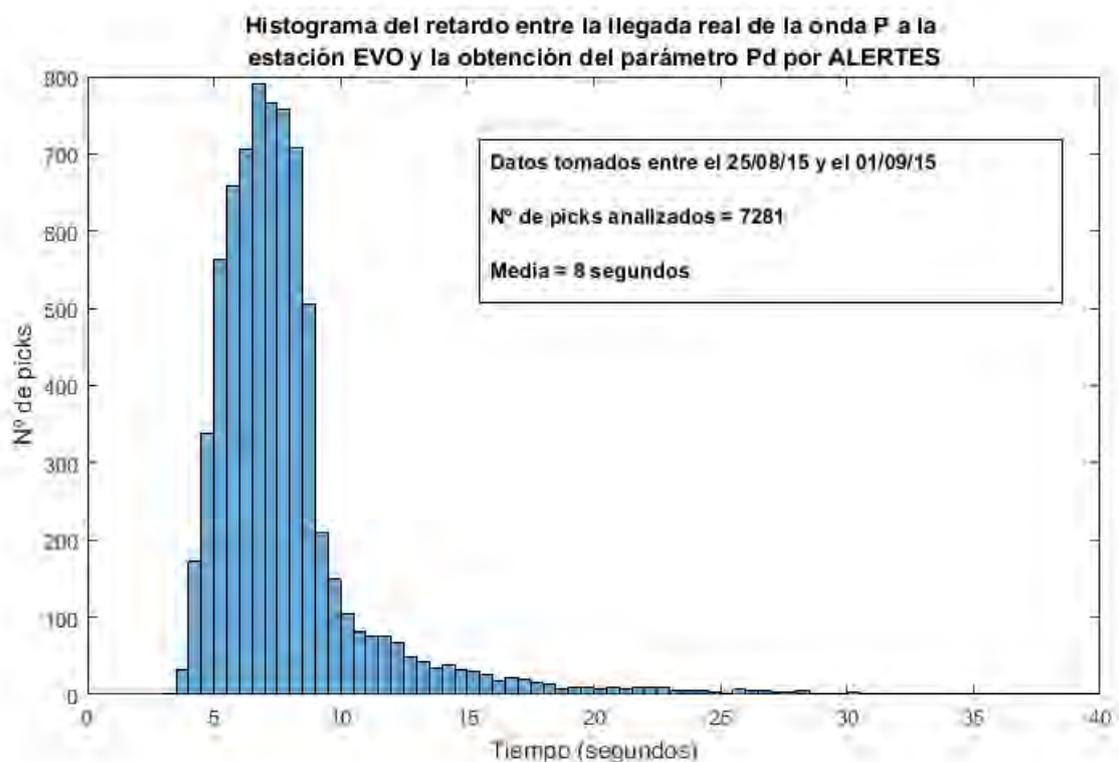


Figura 2.3: Histograma del retardo entre la llegada real de la onda a la estación EVO y la posterior obtención del parámetro  $P_d$  por ALERTES.

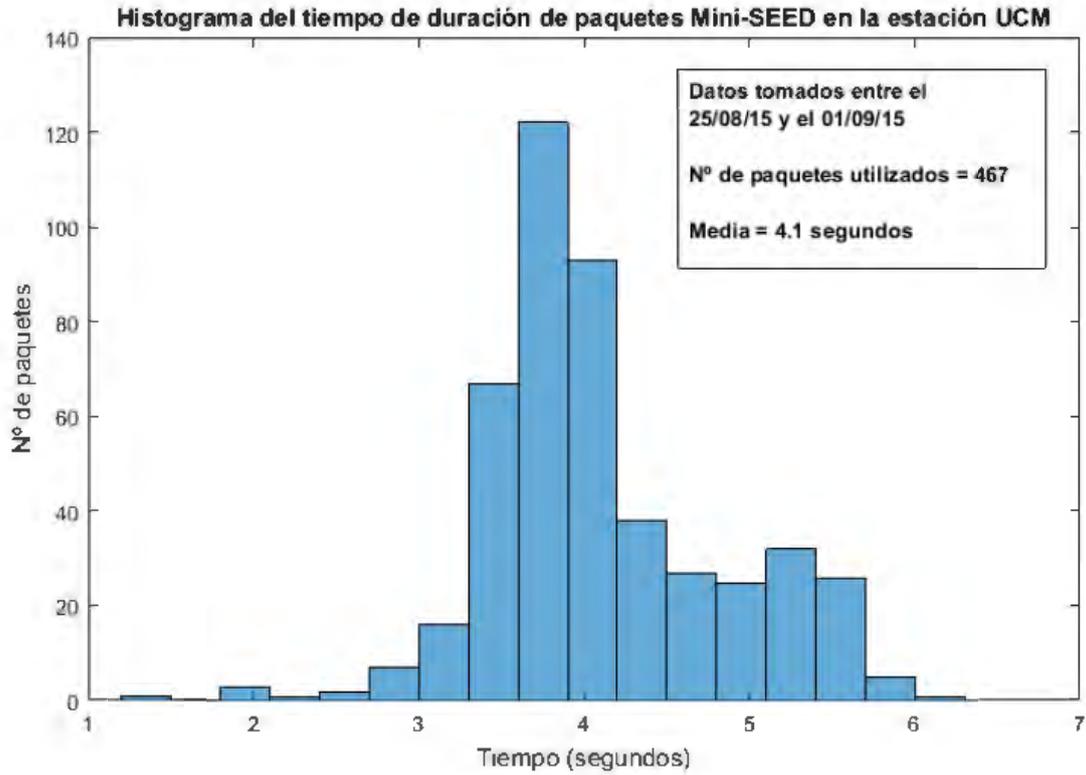


Figura 2.4: Histograma del tiempo de duración de los paquetes Mini-SEED en la estación UCM.

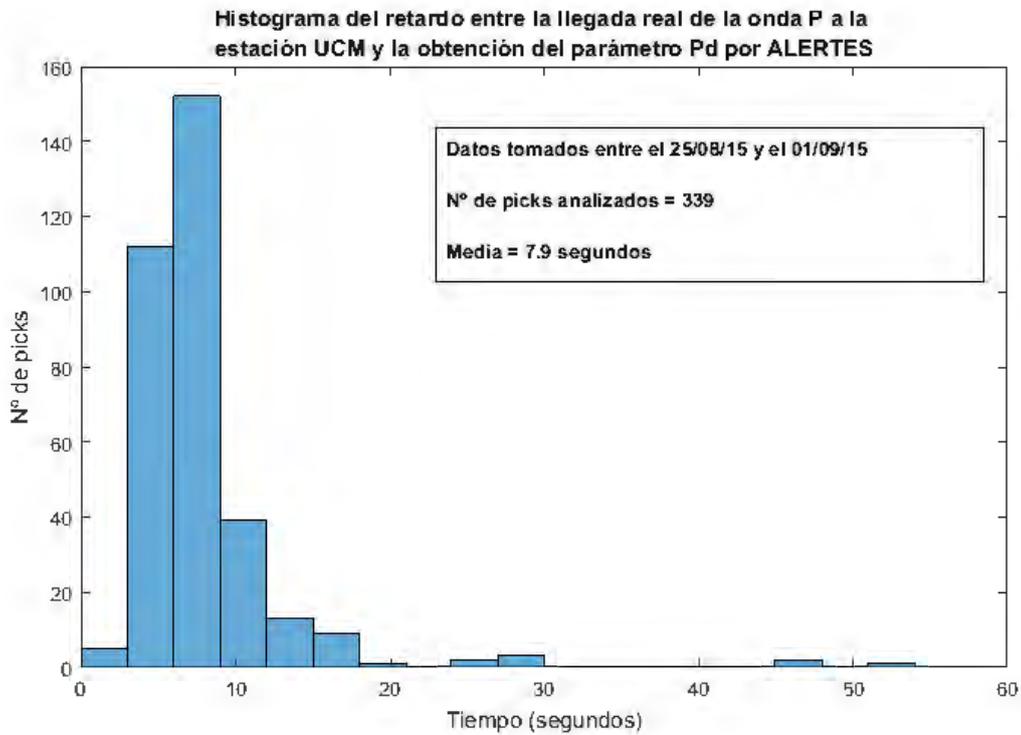


Figura 2.5: Histograma del retardo entre la llegada real de la onda a la estación UCM y su posterior datación por ALERTES.

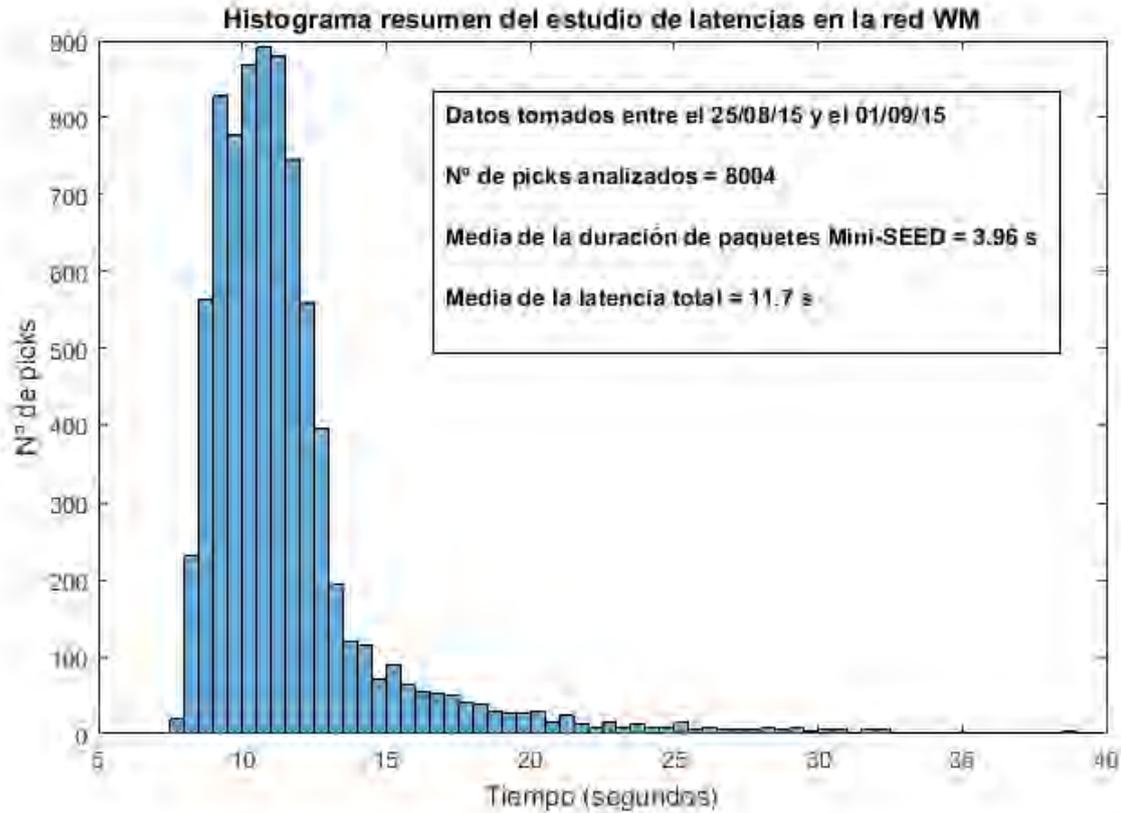


Figura 2.6: Histograma resumen del estudio. Se representa en el histograma la media del retardo entre las llegadas reales de las ondas P a las estaciones de la red WM y su posterior datación.

El estudio ha determinado que en promedio la duración de los paquetes Mini-SEED es de 3,96 segundos y la latencia entre el tiempo real de llegada de la onda a la estación y su posterior análisis y datación por el SAST regional ALERTES-SC3 es de 11,7 segundos. Observamos un histograma con los resultados en la *Figura 2.6*.

En definitiva, estos sistemas trabajan a *tiempo real acrítico* (tiempo real suave). Aunque la respuesta de estos sistemas es casi inmediata en el momento en el que disponen de los paquetes Mini-SEED de forma local (dependiendo de las ventanas de tiempo para la estimación de parámetros [3]), el sistema de picado debe esperar a la creación y llegada de estos paquetes, retrasando todo el proceso de detección y generación de alertas en una media de 12 segundos.

### 2.1.2. Zonas ciegas

En los SAST regionales hay que esperar a que la onda P alcance a un determinado número de estaciones. Por este motivo y añadiendo el problema de las latencias, otra de las limitaciones de estos sistemas se encuentra en la aparición de las denominadas *zonas ciegas* alrededor de los epicentros de los eventos donde no es posible hacer llegar una alerta temprana, es decir, zonas que ya han sido alcanzadas por la onda S (destructiva) en el momento de emisión de la alerta. Pazos et al. (2015) presenta el estudio de la zona ciega para terremotos del cabo de San Vicente y el golfo de Cádiz [13].

### 2.1.3. Conclusión

Las anteriores limitaciones repercuten directamente en el incremento de las zonas ciegas y, por consiguiente, en la eficiencia de los sistemas SAST regionales. El considerable tiempo crítico entre la llegada real de la onda P a una estación sismológica y su posterior detección puede provocar un «lead time» nulo e incluso negativo que, sumado al hecho de que las zonas ciegas no puedan ser alertadas con anterioridad a la llegada de las ondas destructivas, implica situaciones en las que no se puede reaccionar de forma rápida y eficaz ante seísmos. Esta situación pone en peligro vidas humanas e infraestructuras críticas como hospitales, colegios, refinerías, sistemas ferroviarios, etc.

En conclusión, los sistemas SAST regionales por sí solos no son totalmente óptimos para la generación de alertas tempranas en un tiempo real crítico, al no poder cubrir de forma eficaz los puntos ciegos de una región.

## 2.2. Sistemas «in situ»

Las limitaciones planteadas en el anterior apartado se solucionarían cubriendo las zonas ciegas con estaciones sismológicas de banda ancha con un sistema de alerta sísmica temprana local integrado. En definitiva, la solución se encuentra en la densificación de estas zonas mediante el añadido de estaciones «in situ».

Siguiendo la perspectiva, al procesar los datos de forma local, la latencia de red se puede considerar nula y la alerta local se generaría en la propia zona que va a ser afectada por las ondas destructivas. Sin embargo, este camino plantea dos inconvenientes. Por una parte, el coste de desplegar estaciones de banda ancha con un sistema SAST local tradicional integrado es elevado; por otra parte, estos sistemas siguen haciendo uso del protocolo SeedLink, por lo que la latencia considerable que produce la creación de los paquetes Mini-SEED sigue estando presente.

Este proyecto, el desarrollo de un prototipo hardware para la alerta sísmica temprana local, ha sido planteado para paliar los problemas que los SAST regionales plantean y como complemento a estos sistemas. El prototipo, con capacidad de análisis de datos en el momento de su captación y de generación de alertas tempranas locales en zonas ciegas a tiempo real crítico, permitiría la rápida densificación de las zonas con estaciones eficientes. Además, mantendría a su vez la capacidad de comunicación con los SAST regionales tradicionales para asegurar de esta forma la utilidad científica del prototipo en el ámbito de la geofísica.

## 3. El prototipo Pi-EEWS

### 3.1. Sobre el nombre del prototipo

El prototipo para la alerta sísmica temprana local ha sido bautizado como **Pi-EEWS**, y en adelante haremos uso de este término para hacer referencia al proyecto. El nombre procede de la unión del ordenador de placa reducida utilizado para el despliegue del proyecto, Raspberry Pi; y de las siglas EEWS (Earthquake Early Warning System), nombre que se le da en inglés a los Sistemas de Alerta Sísmica Temprana (SAST).

El logotipo diseñado para el sistema (*Figura 3.1*), consiste en la unión de las palabras Pi y EEWS, separadas por una onda en forma de pico que representa la onda P. Además, la P de la palabra Pi está formada por el anagrama de una frambuesa, elemento representativo del ordenador de placa reducida utilizado en el proyecto.



Figura 3.1: Detalle del logotipo serigrafiado en la plancha delantera del módulo hardware principal. Se observan igualmente algunos indicadores led y conectores de panel.

### 3.2. Sobre el prototipo

Como se ha indicado anteriormente, se presenta el prototipo Pi-EEWS como un sistema complementario a los SAST regionales con el objetivo de paliar las limitaciones de estos, desarrollado siguiendo la filosofía de sistemas tradicionales como SeisComP. Se mencionarán a continuación las características básicas que definen al prototipo. En el capítulo *El desarrollo de Pi-EEWS como SAST local* se tratará con detalle y se profundizará en todos los aspectos mencionados en este apartado.

El prototipo lo integran inicialmente dos módulos hardware independientes, y el sistema software que opera sobre ellos. El primer módulo (o módulo principal) es el contenedor del ordenador de placa reducida Raspberry Pi (computador escogido como cerebro del sistema), el sistema de alimentación ininterrumpida y el GPS (*Figura 3.2, izquierda*). El segundo módulo (o módulo de instrumentación) consiste en una plataforma preparada para ser nivelada y fijada al suelo, y es el contenedor de sensores de aceleración triaxiales de tecnología MEMS (Microelectromechanical Systems, sistemas microelectromecánicos en español). Ambos módulos se encuentran interconectados mediante una manguera de cables blindada (*Figura 3.3, derecha*).

El software está formado por diversos módulos de ejecución independiente programados como demonios en lenguaje Python. La comunicación entre ellos se realiza por medio de la tecnología ZMQ, basada en la infraestructura TCP/IP. Cada uno de los módulos software del sistema cumple una función específica, como la adquisición y almacenamiento de datos, el control del hardware, el sistema de detección y análisis, etc.

En su conjunto, el sistema software operando en la Raspberry Pi contenida en el módulo principal, es capaz de adquirir datos de movimiento del suelo a partir de los sensores del módulo de instrumentación, datar las muestras mediante GPS, analizarlas en búsqueda de ondas primarias (no destructivas y primeras en llegar), y determinar así como difundir niveles de alerta locales si procede; todo lo anterior a tiempo real y mediante ventanas de tiempo para el análisis de 3 segundos [5]. Además, el sistema realiza el envío de los datos de adquisición a tiempo real mediante publicadores ZMQ y un servidor SeedLink. Esta funcionalidad puede ser usada para la monitorización datos, la realización de análisis por parte de otras entidades que así lo deseen, o para añadir el prototipo como una estación más de un SAST regional.



Figura 3.2: A la izquierda, perspectiva del módulo principal. A la derecha, perspectiva del módulo de instrumentación. Ambas corresponden a la versión finalizada de los módulos.

### 3.3. Objetivos y líneas de trabajo

#### 3.3.1. Objetivos

A continuación y basándonos en el anterior apartado, se resumen en la *Tabla 3.1* los objetivos principales del proyecto.

<b>Objetivos principales del proyecto</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo de un sistema hardware de adquisición y análisis.</li> <li>• Detección y datación de ondas P en tiempo real.</li> <li>• Estimación de diversas magnitudes a partir de los primeros segundos de la onda P.</li> <li>• Establecimiento del nivel de alerta, si procede.</li> <li>• Mantener la compatibilidad con ALERTES-SC3.</li> <li>• Asegurar la rapidez, fiabilidad, escalabilidad y robustez del sistema.</li> </ul>

Tabla 3.1: Resumen de los objetivos principales del proyecto.

#### 3.3.2. Líneas de trabajo

##### Líneas de trabajo correspondientes al desarrollo hardware

El proyecto requiere del desarrollo de un hardware modular y escalable (ampliable mediante el añadido de más sensores, por ejemplo) que asegure los objetivos finales del proyecto. Se resumen en la *Tabla 3.2* las líneas de trabajo correspondientes a este desarrollo.

<b>Líneas de trabajo de desarrollo hardware</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño teórico del sistema hardware de adquisición y análisis de requisitos.</li> <li>• Selección de componentes a partir de los requisitos. Podemos destacar el análisis de sensores, ordenadores de placa reducida, sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI), caja envolvente de los componentes, conectores de panel, indicadores, etc.</li> <li>• Globalización de todos los componentes mediante circuitería electrónica.</li> <li>• Traslado de esquemáticos a placas de circuito impreso (PCB).</li> <li>• Mecanización y montaje del sistema hardware.</li> <li>• Pruebas, ajustes y optimización del sistema hardware.</li> </ul>

Tabla 3.2: Resumen de las líneas de trabajo de desarrollo hardware.

## Líneas de trabajo correspondientes al desarrollo software

El proyecto requiere del desarrollo de un software escalable propio (ampliable mediante el añadido de módulos, por ejemplo) que se adecue a las características hardware del sistema y que se integre con el sistema operativo del ordenador de placa reducida Raspberry Pi. Se resumen en la *Tabla 3.3* las líneas de trabajo correspondientes a este desarrollo.

---

<b>Líneas de trabajo de desarrollo software</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño teórico del sistema software y análisis de requisitos.</li> <li>• Configuración del ordenador de placa reducida.</li> <li>• Programación de drivers y módulos para el control de hardware (sensores, SAI, leds, etc). Esto incluye sistemas de control ante anomalías que pueda presentar el propio hardware, así como anomalías eléctricas y en las comunicaciones en red.</li> <li>• Programación de un sistema software de adquisición ininterrumpida a tiempo real.</li> <li>• Programación de un sistema de detección de ondas P a tiempo real. Actualmente se ha trabajado con el algoritmo de Savvaidis y el algoritmo de Lomax. [14] [15].</li> <li>• Programación de un sistema de análisis de ondas P a tiempo real, mediante parámetros con información sobre el seísmo, denominados <math>\tau_c</math> y <math>P_d</math> y sus magnitudes asociadas [5][7].</li> <li>• Desarrollo de un módulo de persistencia y comunicación con el exterior. Esto incluye la difusión y gestión de las alertas locales, difusión de los datos de movimiento del suelo a tiempo real, gestión externa del sistema, almacenamiento seguro de datos, creación y gestión de logs, etc.</li> <li>• Asegurar la rapidez, estabilidad y escalabilidad del sistema.</li> <li>• Mantener la compatibilidad con los sistemas SAST actuales mediante el uso del protocolo SeedLink y el uso de paquetes de datos sísmicos Mini-SEED [11][12].</li> <li>• Desarrollo de un cliente visor de datos a tiempo real, para visualizar el estado del sistema y las formas de onda en el momento de adquisición.</li> </ul>

---

Tabla 3.3: Resumen de las líneas de trabajo de desarrollo software.

## 3.4. Área aplicada

El software se ha diseñado para ser configurado de acuerdo al área a cubrir. La configuración abarca desde el propio sistema operativo hasta los parámetros de funcionamiento con los que trabaja el sistema de picado y el sistema de análisis de ondas P, entre otros.

Es necesario indicar que durante el periodo de pruebas, la configuración del software se aplica al área del sudoeste de la Península, para así realizar comparativas con los datos proporcionados por las estaciones de la red sísmica Western Mediterranean (WM). Esta configuración está basada en el estudio de parámetros realizado por M. Carranza et al. (2012) [5].

## 4. Metodología y fundamento teórico

La adquisición de datos a tiempo real se realiza a partir de sensores de movimiento del suelo (en nuestro caso acelerómetros triaxiales de tecnología MEMS), y su datación a partir del tiempo dado por un sistema de posicionamiento global (GPS). Existen multitud de algoritmos que aplican diferentes técnicas sobre las muestras para detectar ondas P en ellas, llamados algoritmos de detección. En este proyecto se ha trabajado con un algoritmo basado en el sesgo y la curtosis como algoritmo de detección principal [14][2].

Una vez detectada la onda P, se procede a su análisis para determinar la amenaza real que supone el evento. Los dos principales parámetros que utilizan los SAST para el análisis son el pico de desplazamiento del suelo ( $P_d$ ) y el periodo predominante ( $\tau_c$ ) de los primeros segundos de la onda P [5]. El primero es dependiente de la distancia del foco del evento al sismógrafo (cuanto más cerca se encuentre, más grande será  $P_d$ ) y del tamaño del terremoto, mientras que el segundo solo depende del tamaño del evento (cuanto mayor sea el sismo o el ruido, más grande será  $\tau_c$ ) [6], independientemente de la distancia hipocentral. Estos parámetros son contrastados mediante una tabla de decisión para determinar finalmente el nivel de alerta [4]. Además, se realiza el cálculo de la magnitud momento asociada a  $\tau_c$  [18].

La estimación en el cálculo de estos datos depende de la claridad de la señal analizada, es decir, del nivel de ruido. Registros con alto nivel de ruido pueden dar resultados erróneos [16], por lo que se hace necesario añadir una funcionalidad para la obtención de la relación *señal/ruido* ( $SNR$ ) que indique la fiabilidad del nivel de amenaza determinado.

Aunque en el sistema se han utilizado unos algoritmos concretos para pruebas y desarrollo, el software sobre el que opera el prototipo Pi-EEWS está preparado para integrar nuevos algoritmos en el futuro mediante un sencillo añadido de módulos gracias a su escalabilidad.

### 4.0.1. Algoritmo de detección

A partir de un algoritmo detector de fase desarrollado por Savvaidis et al. (2002) basado en las propiedades estadísticas del sesgo y la curtosis para estaciones de tres componentes [14], Pazos et al. (2003) ensaya un algoritmo diferente pero basado en las mismas ideas [2]. Este algoritmo ha sido utilizado en el proyecto como algoritmo de detección principal, pero adaptado a la adquisición en tiempo real. El motivo de trabajar con este algoritmo se encuentra en el alto porcentaje de aciertos que este presenta [2].

$$\gamma_3 = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j - m_x)^3}{(N - 1) * \sigma_x^3} \quad (4.1)$$

$$\gamma_4 = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j - m_x)^4}{(N - 1) * \sigma_x^4} - 3 \quad (4.2)$$

El sesgo ( $\gamma_3$ ) y la curtosis ( $\gamma_4$ ) de una serie finita de muestras se calcula mediante la *Expresión 4.1* y la *Expresión 4.2* respectivamente, donde  $m_x$  es la media de la serie de muestras, y  $\sigma_x$  su desviación estándar. Es importante indicar que en la práctica, en el cálculo de la curtosis, no sustraeremos 3 (valor de la curtosis de la Normal), para que esta siempre sea positiva.

En el algoritmo implementado, se realiza el cálculo del sesgo y la curtosis utilizando la media y la desviación estándar calculada para una ventana de tiempo móvil de 10 segundos del registro. A continuación se calculan para una ventana móvil de un segundo. La métrica se forma multiplicando el valor absoluto del sesgo por la curtosis, suavizando por la media de 16 puntos. La duración de las ventanas se han obtenido mediante experimentación.

El umbral se establecerá en  $k$  veces la mediana de la métrica de la ventana móvil de 10 segundos, donde suponemos que no hay presencia de señal. El factor  $k$  será determinado previo estudio de la relación señal/ruido en la ubicación del sensor. Las pruebas se han realizado con valores para  $k$  comprendidos entre 5 y 8. Además, para evitar falsos disparos por espurios, se añade un criterio de duración mínima, fijado en un 90% de votos para una ventana de medio segundo. Durante el periodo de pruebas del prototipo se determinará mediante experimentación un nivel umbral fijo para el caso de un promedio muy bajo. En el caso de que se detecte un pick, no se actualizará el umbral hasta que la señal se encuentre de nuevo por debajo de este durante unos segundos. En la *Figura 4.1*, observamos un claro ejemplo del funcionamiento del detector aplicado a una forma de onda captada por el sistema de adquisición de Pi-EEWS, en la que se ha forzado mediante vibraciones la aparición de lo que puede considerarse un pick.

Por otra parte, se está investigando por su fiabilidad el uso del algoritmo de envolvente desarrollado por Lomax et al. (2012) para un futuro sistema de repicado, que afine la datación proporcionada por el algoritmo principal cuando este detecte una posible onda P [15].

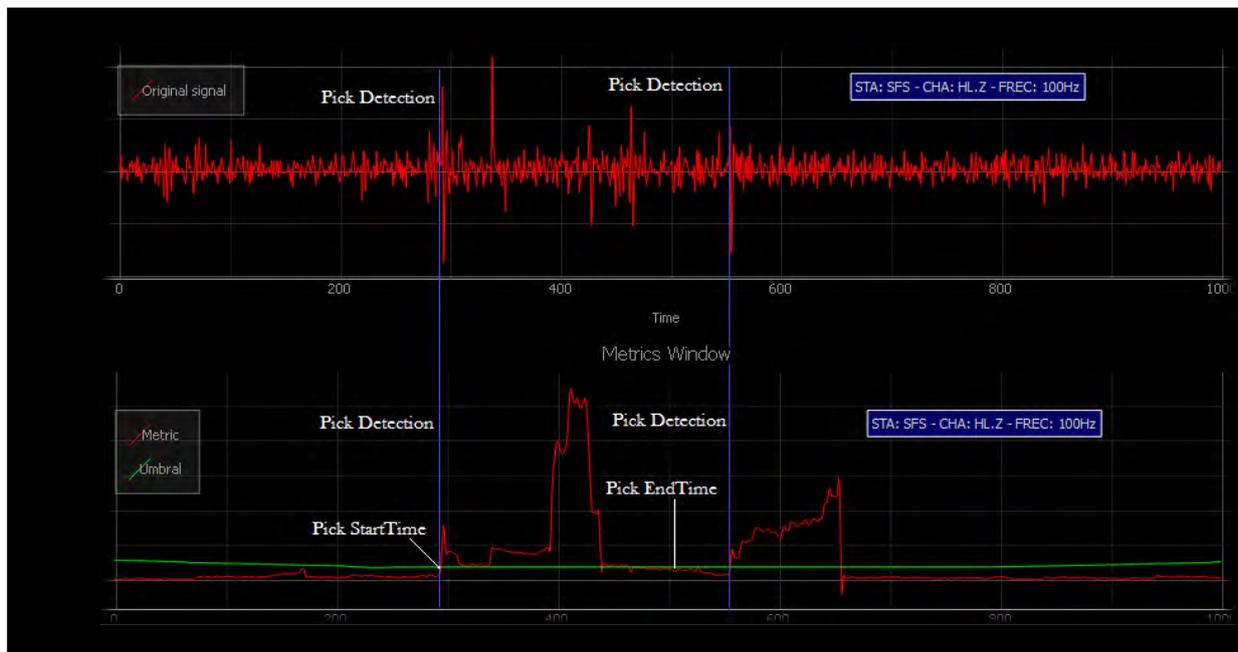


Figura 4.1: Arriba, la señal original del canal HLZ con un pick asociado, detectado por el sistema de picado de Pi-EEWS. Abajo, la evolución del algoritmo detector de fase, donde se representan el umbral y la métrica respecto al tiempo. Pruebas con  $k = 6$ .

### 4.0.2. Tabla de decisión

A partir de unos umbrales establecidos para ambos parámetros en diversos estudios, se genera un sistema de alerta sísmica temprana basado en una *tabla de decisión de cuatro entradas* (Tabla 4.2) [4]. Los niveles de alerta establecidos se encuentran descritos en la Tabla 4.1.

Niveles de alerta establecidos	
•	Nivel 0: No existe ninguna amenaza. Puede producirse por ruido en la señal o ser eventos de baja magnitud, entre otros motivos.
•	Nivel 1: El periodo predominante $\tau_c$ es elevado, pero el pico de $P_d$ no supera el umbral, lo que indica la posibilidad que se haya producido un evento de considerable tamaño (superior a magnitud 3,5), pero lejos de la zona a proteger, por lo que no supone una amenaza.
•	Nivel 2: El periodo predominante $\tau_c$ no supera el umbral, pero el pico de desplazamiento $P_d$ es elevado, lo que significa que se ha producido un evento de una magnitud no muy grande pero que, por su cercanía a la zona a proteger, supone una amenaza a considerar.
•	Nivel 3: Ambos parámetros superan el umbral, lo que indica que se ha producido un evento de gran magnitud y que supone amenaza en una zona amplia.

Tabla 4.1: Niveles de alerta establecidos.

	$P_d = 0,2$	
$\tau_c$	2	3
	0	1
0		$\tau_c = 0,6$

Tabla 4.2: Tabla de decisión con los umbrales establecidos para el suroeste de Iberia [5]. Los niveles umbrales se han tomado del estudio de A. Zollo [4].

### 4.0.3. Parámetros $\tau_c$ y $P_d$

Como se ha mencionado, ambos parámetros se determinan a partir de los primeros segundos de la onda P. El periodo predominante promedio  $\tau_c$ , en segundos, se determina a partir de los datos de velocidad ( $\dot{u}(t)$ ) y desplazamiento del suelo ( $u(t)$ ) en la componente vertical del registro sobre una ventana de tiempo ( $\tau_0$ ) (fijada normalmente en 3 segundos [5]), a partir de la llegada de la onda P [6] (*expresión 4.3*).

$$\tau_c = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^{t_0} u^2(t) dt}{\int_0^{t_0} \dot{u}^2(t) dt}} \quad (4.3)$$

El otro parámetro que necesitamos, denominado  $P_d$ , es el pico de desplazamiento máximo inicial del suelo en la onda P. Se define como el valor del mayor desplazamiento, en centímetros, que sufre el suelo en la ventana de tiempo seleccionada ( $\tau_0$ ) (Figura 4.2).

Como la instrumentación utilizada ofrece datos de aceleración, es necesario efectuar la integral respecto al tiempo para obtener la velocidad. Así mismo, los datos se encuentran en unidades digitales ( $(a(t))$  en cuentas), por lo que antes hay que corregirlos por la respuesta instrumental, que en la banda de interés podemos considerar plana. Asumiendo la corrección como constante, basta con multiplicar el vector de datos de aceleración ( $a(t)$ ) por la sensibilidad o factor de escala del instrumento (S en  $mg/LSb$ ) y aplicar un factor de conversión de  $mg$  a  $m/s^2$ , obteniendo los datos corregidos ( $\ddot{u}(t)$ ) (Expresión 4.4), que serán integrados para la obtención de la velocidad ( $\dot{u}(t)$ ) (Expresión 4.5).

A partir de los datos de velocidad ( $\dot{u}(t)$ ), obtenemos el desplazamiento efectuando de nuevo la integral respecto al tiempo, almacenando los datos en un nuevo vector ( $u(t)$ ) (Expresión 4.6). El pico de desplazamiento máximo,  $P_d$  en cm, de la ventana de tiempo seleccionada será el máximo en valor absoluto del vector desplazamiento ( $u(t)$ ) (en metros) multiplicado por 100 (Expresión 4.7). En la Figura 4.2 observamos el pico de desplazamiento máximo en una ventana de tiempo correspondiente a los tres primeros segundos de la onda P.

Para todos estos análisis, se obviarán 0,2 segundos de la ventana de tiempo (equivalente a 20 muestras si trabajamos a 100  $Hz$ ) después del momento de detección del pick, para evitar de esta forma el intervalo de error en la detección y procesar únicamente los datos plenamente característicos de la onda P.

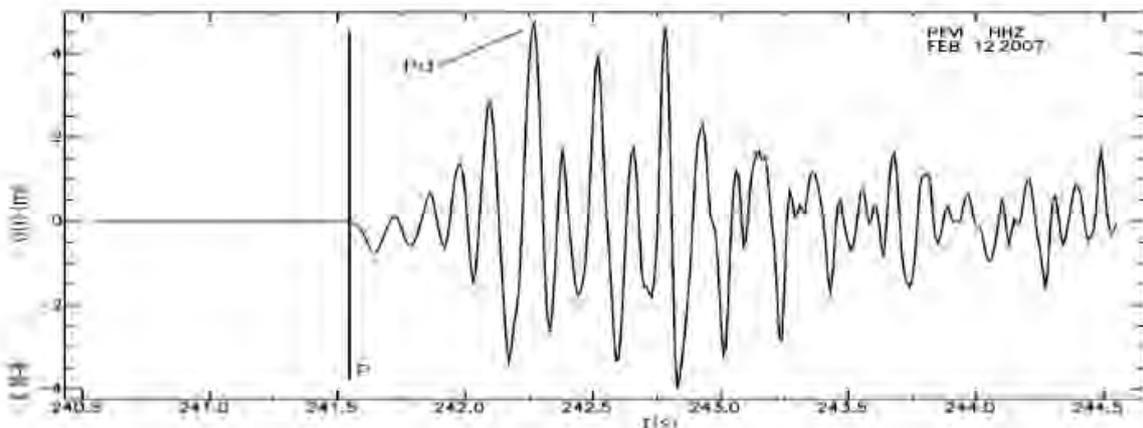


Figura 4.2: Componente vertical del desplazamiento para el terremoto del Cabo de San Vicente del 12/02/2007 registrado en PFVI (200km del epicentro), en una ventana de tiempo de  $\tau_0 = 3$  segundos. Se señala la llegada de la onda P y el pico de desplazamiento máximo  $P_d$  [5].

$$\ddot{u}(t) = \frac{a(t) * S}{1000 * 9,81} \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (4.4)$$

$$\dot{u}(t) = \int_0^{t_0} \ddot{u}(t) dt \text{ (m/s)} \quad (4.5)$$

$$u = \int_0^{t_0} \dot{u}(t) dt \text{ (m)} \quad (4.6)$$

$$P_d = \max(u) * 100 \text{ (cm)} \quad (4.7)$$

#### 4.0.4. Relación señal/ruido y fiabilidad de los resultados

Entendemos como ruido a toda señal no deseada que se mezcla con la señal útil, resultado de diversos tipos de perturbaciones que enmascaran la información. Aunque el ruido afecta tanto al pico de desplazamiento como al periodo predominante,  $\tau_c$ , el cálculo de este último puede verse gravemente afectado pudiendo elevarse considerablemente, dando lugar a falsas alarmas.

La relación señal/ruido (SNR) se define como la proporción existente entre la potencia de la señal y la potencia del ruido que la corrompe, pudiendo ser expresada en escala logarítmica, en decibelios. Una SNR pequeña indica la existencia de un ruido sísmico considerable que puede elevar el periodo  $\tau_c$ , dando lugar a falsas alarmas y resultados erróneos.

Durante el desarrollo de anteriores proyectos [8], se determinó que una ventana de tiempo correspondiente a los 3 segundos anteriores y posteriores a la detección de la onda P es suficiente para estimar la SNR. De esta muestra se obviarán 0,2 segundos antes y después del momento de picado, para procesar los datos anteriores a la llegada de la onda P plenamente característicos.

$$n = \sum_{\tau_0=-3}^0 x_i^2 \quad (4.8)$$

$$s = \sum_{\tau_0=0}^3 x_i^2 \quad (4.9)$$

$$SNR = \frac{s}{n} \quad (4.10)$$

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} SNR \quad (4.11)$$

La potencia del ruido la estimaremos mediante el sumatorio de las muestras al cuadrado desde  $\tau_0 = -3$  segundos hasta el momento del picado de la onda donde  $\tau = 0$  segundos (*Expresión 4.8*). Igualmente realizamos el sumatorio  $s$  desde  $\tau_0 = 0$  hasta  $\tau = 3$  segundos (*Expresión 4.9*). Dividimos el resultado de esta fórmula entre el resultado de la *Expresión 4*, obteniendo así la SNR (*Expresión 4.10*). Para realizar la comparativa con el límite, en decibelios, es necesario expresar la SNR utilizando dicha escala, para lo cual aplicaremos la definición logarítmica de esta unidad (*Expresión 4.11*).

Estudios realizados en el sur de Italia [16] determinan que una SNR superior a 5 dB proporciona cierta fiabilidad de las estimaciones. Durante el desarrollo de anteriores proyectos [8] se determinó que el límite SNR a partir del cual considerar un resultado como fiable varía entre los 5 y 18 decibelios, dependiendo este valor de la localización del módulo de instrumentación.

La fiabilidad vendrá dada por la comparativa de la SNR y el *límite SNR* fijado tras previo estudio del ruido en la localización del módulo de instrumentación. Si la SNR supera el umbral, los análisis serán tomados como fiables.

#### 4.0.5. Cálculo de la magnitud momento a partir de $\tau_c$

M. Carranza, siguiendo los trabajos de A. Zollo para seísmos de Japón, Taiwán e Italia [4] [17], y como actualización a su anterior estudio [5], propone la ley de escalamiento dada por la *Expresión 4.12*, regresión que determina la relación entre el periodo  $\tau_c$  (en segundos) y la magnitud momento  $M$  para seísmos sucedidos en la zona sur de Iberia, estando en promedio la estación más cercana al epicentro del terremoto a 200 km [18]. Es importante indicar que esta magnitud, al estar estimada mediante un ajuste del estudio realizado en el sur de Iberia [5][18], se adecua a dicha zona de aplicación.

$$\log_{10}(\tau_c) = 0,30 * M - 1,6 \Rightarrow M = \frac{\log_{10}(\tau_c) + 1,6}{0,30} \quad (4.12)$$

Durante el desarrollo de anteriores proyectos [8], se determinó que en un alto número de casos es posible obtener una estimación cercana a la realidad a partir de la *Expresión 4.12*, siempre que la SNR indique una calidad de señal adecuada [16].

De forma similar, existen leyes de escalamiento que relacionan el pico de desplazamiento  $P_d$  con la magnitud momento  $M$ , pero es dependiente de la distancia instrumental, motivo por el cual se aplica en sistemas regionales pero no en sistemas locales.

## 5. El desarrollo de Pi-EEWS como SAST local

La arquitectura que se ha seguido en el desarrollo del prototipo Pi-EEWS integra una *arquitectura física* (hardware) que comprende dos módulos independientes, y una *arquitectura lógica* (software) que opera sobre la anterior (*Figura 5.1*).

En el capítulo *El prototipo Pi-EEWS* se resumieron las características principales de este sistema. En este capítulo se tratará en profundidad el diseño y desarrollo de la arquitectura del prototipo Pi-EEWS como un sistema de alerta sísmica temprana local.

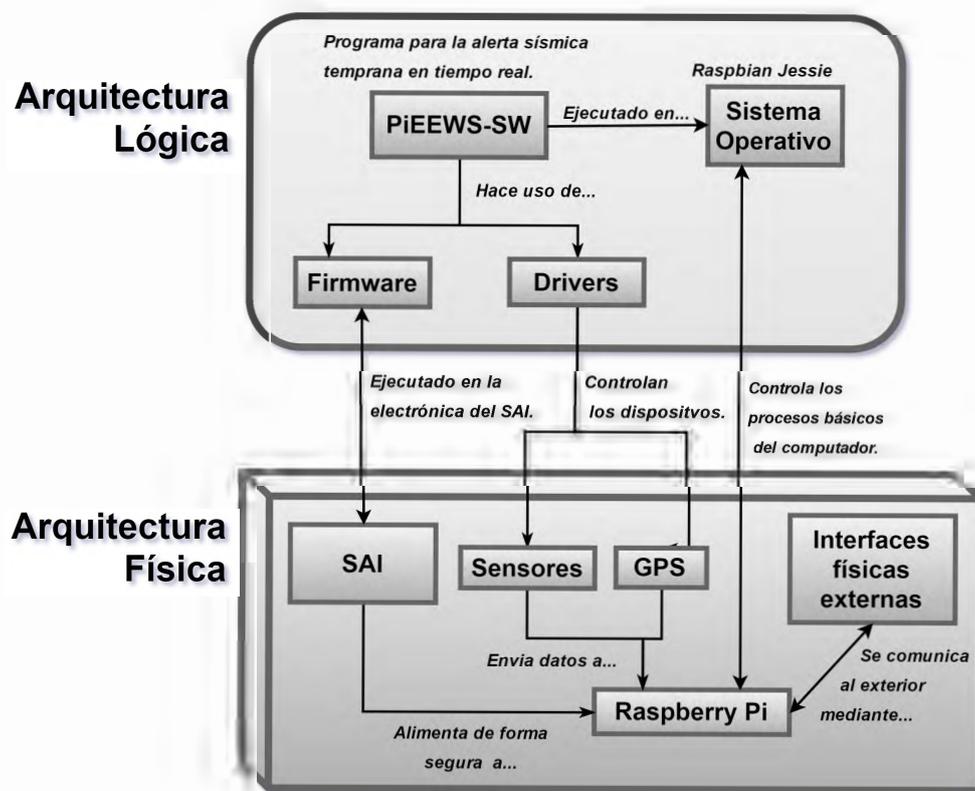


Figura 5.1: Representación gráfica de la arquitectura del sistema.

### 5.1. Arquitectura física

La *arquitectura física* del prototipo engloba el sistema de adquisición de datos (captación de movimiento del suelo), el sistema de datación, el sistema de alimentación ininterrumpida, el sistema computador (ordenador de placa reducida sobre el que trabaja el software), el sistema de indicadores (panel de testigos de estado del sistema) y el sistema encapsulado del prototipo. Este último se compone de las placas de circuito impreso y la circuitería interna, el soporte estructural del sistema, la interfaz con los dispositivos externos (conectores y cableado), etc.

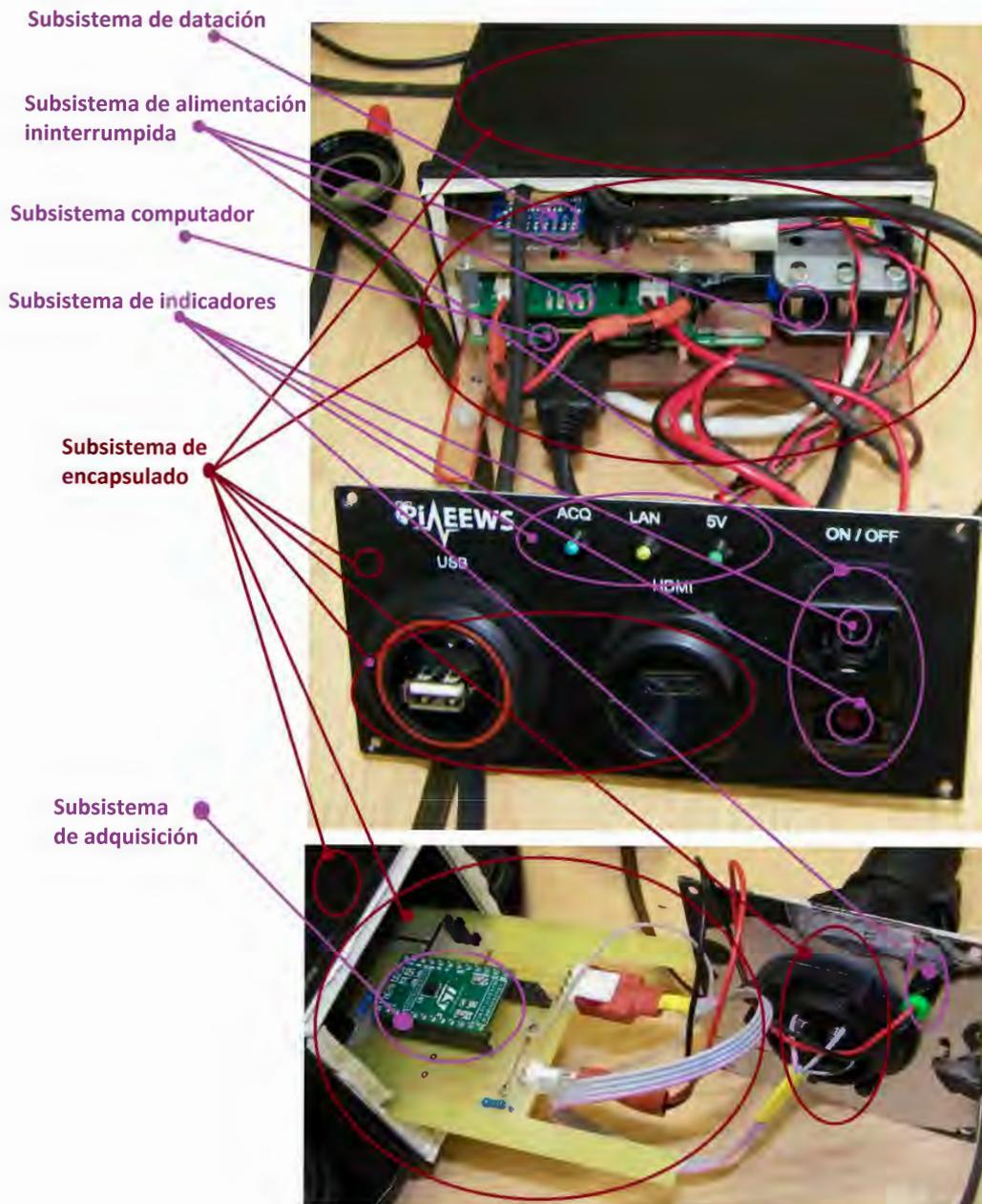


Figura 5.2: Esquema de la arquitectura física dibujado sobre secciones de los módulos.

Los anteriores sistemas se engloban componiendo dos módulos hardware independientes: el módulo principal como contenedor del sistema computador, el sistema de alimentación y el sistema de datación; y el módulo de instrumentación como contenedor del sistema de adquisición. Los soportes estructurales de ambos módulos, así como la circuitería interna, los conectores y el cableado, compondrían el sistema de encapsulado. Los testigos led de los paneles delanteros de ambos módulos y un zumbador compondrían el sistema de indicadores. Observamos un esquema de esta disposición en la *Figura 5.2*.

A continuación, se detallarán los sistemas mencionados integrantes de la arquitectura física, así como su desarrollo y montaje, describiendo los componentes hardware y las ventajas que presentan. Además, en el *Epílogo A* se presentan los planos de fabricación, desarrollo y montaje de aparamenta, y en el *Epílogo B* el diseño de las placas de circuito impreso.

### 5.1.1. Sistema computador

Este sistema engloba el ordenador que actúa como cerebro del sistema implementado. Los requisitos que este computador debía cumplir incluían factores de todo tipo. Se resumen en la *Tabla 5.1* las características más relevantes que el sistema debía tener.

<b>Requisitos del sistema computador</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ser un computador de placa reducida (SBC).</li> <li>• Ser de uso libre.</li> <li>• Ser asequible.</li> <li>• Admitir un sistema operativo de código abierto.</li> <li>• Poseer una potencia adecuada para el análisis de datos en tiempo real.</li> <li>• Poseer interfaz de red.</li> <li>• Poseer puertos serie/GPIO o similares para la conexión de sensores.</li> <li>• Poseer una amplia comunidad de desarrollo.</li> </ul>

Tabla 5.1: Resumen de requisitos que debe cumplir el sistema computador.

<b>Características de Raspberry 3 Modelo B</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• CPU de 1.2GHz 64-bit quad-core ARMv8.</li> <li>• Tarjeta gráfica VideoCore IV 3D.</li> <li>• Adaptador de red inalámbrica 802.11n.</li> <li>• 1GB de memoria RAM.</li> <li>• 4 puertos USB.</li> <li>• 1 puerto de conexión ethernet.</li> <li>• 40 pines GPIO.</li> <li>• 1 puerto Full HDMI.</li> <li>• 1 ranura para tarjetas micro SD.</li> <li>• Jack combinado de 3,5mm para audio y vídeo compuesto.</li> <li>• Bluetooth 4.1.</li> <li>• Bluetooth Low Energy (BLE).</li> <li>• Interfaz para cámara(CSI).</li> <li>• Interfaz para display (DSI).</li> </ul>

Tabla 5.2: Características del ordenador de placa reducida Raspberry 3 Modelo B

Una vez desarrollado el análisis de requisitos y tras considerar diversas opciones como la familia NUC de Intel o placas BeagleBoard, se decidió hacer uso del ordenador de placa reducida de bajo coste y uso libre Raspberry Pi 3 Modelo B (*Figura 5.3*), desarrollado en Reino Unido por la fundación Raspberry Pi [19], al poseer este todos los requisitos listados anteriormente [20]. El modelo escogido pertenece a la tercera generación de Raspberry Pi, y posee las características más avanzadas de la gama (*Tabla 5.2*) [20]. Además, se le ha añadido una memoria SD de 32GB y una memoria USB de 64GB para el almacenamiento de datos.

El sistema operativo GNU/Linux que se ha instalado en el ordenador es Raspbian Jessie, basado en Debian. Entre los motivos que han influido en la elección de este sistema, se encuentra su gran estabilidad (al ser un sistema desarrollado precisamente para operar sobre Raspberry Pi) y la comunidad de continuo desarrollo que se encuentra entorno a este sistema.

Por último, relativo al sistema computador, aunque es frecuente la realización de overclocking en las placas Raspberry Pi (aumentar el rendimiento aumentando las velocidades de reloj), esta práctica no ha sido necesaria. Durante el periodo de pruebas, se ha comprobado que el rendimiento normal que ofrece el ordenador es suficiente para llevar a cabo de forma ágil las tareas a tiempo real que el sistema software de Pi-EEWS precisa.

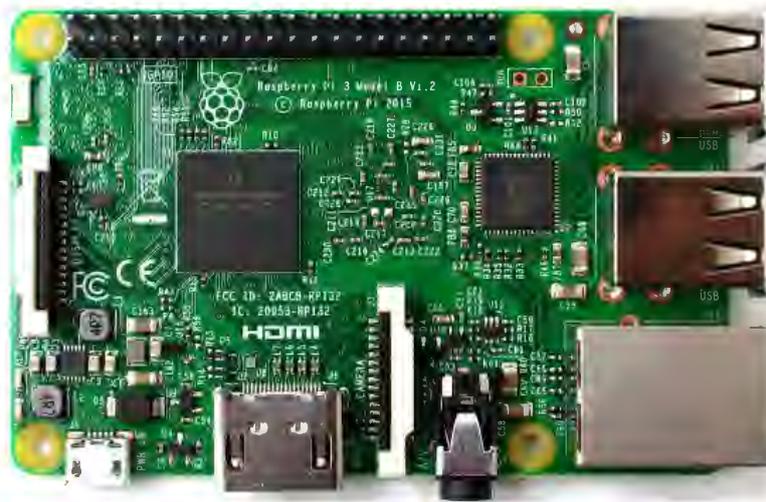


Figura 5.3: Vista de planta del SBC Raspberry Pi 3 Modelo B, computador del prototipo.

### 5.1.2. Sistema de adquisición

Este sistema engloba a los sensores utilizados para la adquisición de datos de movimiento del suelo. Los requisitos mínimos que los sensores debían cumplir eran diversos; era necesario que cumplieran determinados criterios que aseguraran la capacidad de adquisición de ondas P de sismos de magnitud considerable (que realmente pudieran suponer una amenaza).

Diversos estudios realizados sobre el rendimiento sensores de aceleración de bajo coste determinaban ciertas características que debían cumplir para su aplicación en el ámbito de la geodesia y geofísica [21]. Basándonos en esos estudios, se determinó utilizar sensores de aceleración triaxiales de tecnología MEMS (Microelectromechanical Systems) que cumplieran los requisitos recogidos en la *Tabla 5.3*.

Tras el análisis de diversos sensores candidatos, se optó por el módulo inercial digital **LSM6DS0** por cumplir los requisitos anteriores. Este módulo, de tecnología MEMS, integra un acelerómetro y giroscopio, ambos triaxiales (ofrecen las tres componentes). Las características destacables de este módulo se recogen en la *Tabla 5.4* [22].

Por razones de operabilidad, se decidió adquirir la placa **STEVAL-MKI161V1**, diseñada para adaptar el módulo MEMS inercial LSM6DS0 a un socket estándar DIL24, facilitando así la evaluación del dispositivo (*Figura 5.4*). Se ha optado por el uso del bus de datos serial  $I^2C$  para comunicar el módulo con el ordenador Raspberry Pi.

---

### Requisitos del sistema de adquisición

---

- Ser sensores asequibles.
  - Permitir la adquisición de aceleración en el eje de coordenadas  $z$  a una frecuencia de muestreo de 100 veces por segundo ( $100Hz$ ) como mínimo.
  - Poseer un modo de alta resolución configurable al menos a  $2g$  full scale.
- 

Tabla 5.3: Resumen de requisitos que debe cumplir el sensor.

---

### Características del módulo inercial LSM6DS0

---

- Voltaje de alimentación de  $1,71V$  a  $3,6V$ .
  - 3 canales de aceleración independientes y 3 canales de velocidad angular independientes.
  - $\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16 g$  full scale.
  - $\pm 245, \pm 500, \pm 2000 dps$  full scale.
  - Interfaz serial SPI e  $I^2C$ .
  - Sensor embebido de temperatura.
- 

Tabla 5.4: Características del módulo inercial LSM6DS0.

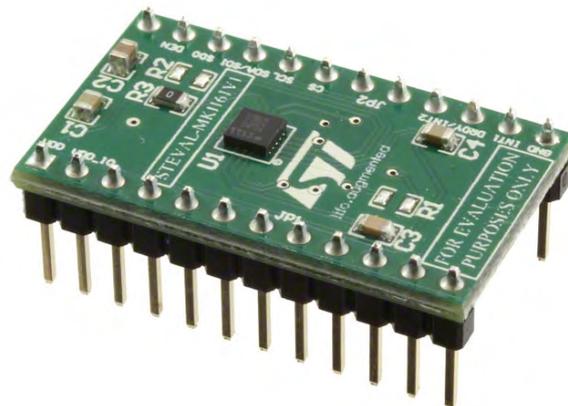


Figura 5.4: Perspectiva del módulo STEVAL-MKI161V1.

### 5.1.3. Sistema de datación

El sistema de datación engloba al sistema de posicionamiento global (GPS) utilizado para asociar a cada muestra recogida por el módulo inercial una fecha de adquisición correspondiente al preciso momento de su captación. Este proceso lo denominamos datación de muestras.

De esta forma, al estar cada muestra datada, es posible llevar un control preciso del momento de llegada de las ondas P. Además, nos permite sincronizar la hora del computador. Por último, también es utilizado para producir una señal de reloj exacta de  $10Hz$  mediante los pulsos por segundo (PPS) que produce cada fix (llegada de una sentencia GPS). A partir de esta señal crearemos la frecuencia de muestreo del módulo inercial ( $100Hz$ ).

Se decidió hacer uso de la placa Ultimate GPS Breakout V3 (Figura 5.5), que integra el módulo GPS de alta calidad **MTK3339**. Entre los motivos de la selección, se encuentran su asequibilidad, su bajo consumo, la libertad que ofrece para su programación a bajo nivel (para ser adaptado a nuestras necesidades), y el hecho de que integre un reloj a tiempo real con batería (RTC). Este último nos permitirá sincronizar la hora del computador aunque este sea apagado completamente. Las características más destacables de la placa se resumen en la Tabla 5.5 [23].

---

#### Características de la placa Ultimate GPS Breakout V3

---

- Sensibilidad de  $-165$  dBm.
  - Actualizaciones a  $10$  Hz.
  - Seguimiento de hasta  $22$  satélites en  $66$  canales.
  - Voltaje de alimentación de  $3,3V$  a  $5V$ .
  - Reloj a tiempo real (RTC) integrado.
  - Salida PPS en cada fix.
  - Conector u.FL para la conexión de una antena activa externa.
- 

Tabla 5.5: Características destacables de la placa Ultimate GPS Breakout V3.

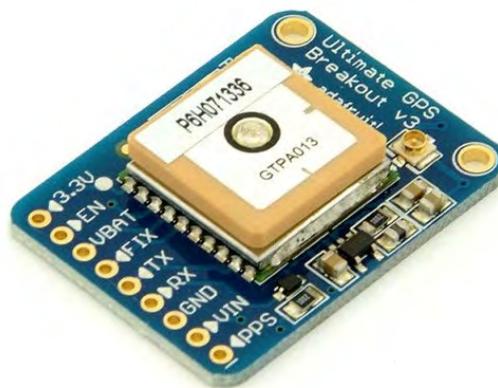


Figura 5.5: Perspectiva de la placa Ultimate GPS Breakout V3.

#### 5.1.4. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación comprende los componentes necesarios para abastecer el prototipo de corriente eléctrica, y asegurar el continuo funcionamiento del sistema incluso durante fallas en la red eléctrica (al menos durante unas horas).

Para garantizar el continuo funcionamiento del prototipo, se ha utilizado el sistema de alimentación ininterrumpida para Raspberry Pi **S.USV pi advanced** (*Figura 5.6*). Este sistema está compuesto por una placa SAI alimentada a 12 voltios que, entre otras funciones, alimenta el ordenador Raspberry Pi (5V) y el resto de componentes de forma segura, y gestiona de forma eficaz las caídas de la red eléctrica mediante una monitorización continua. A esta placa le ha sido conectada una batería de polímero de litio (LiPo) de 3000mAh que permite el funcionamiento autónomo del sistema durante 4 horas aproximadamente. Las características más destacables del SAI se resumen en la *Tabla 5.6* [24]. En este sistema además, se integra un interruptor de panel IP-68 para el encendido o apagado del prototipo.

---

#### Características del SAI S.USV pi advanced

---

- Voltaje de entrada extendido de 7V a 24V.
  - Sistema de monitorización continua.
  - Compatible con baterías LiPo.
  - Función de carga ajustable.
  - Monitorización del estado de carga de la batería.
  - Reloj a tiempo real (RTC) integrado.
  - Apagado y encendido automático de Raspberry Pi.
  - Apagado seguro de Raspberry Pi.
- 

Tabla 5.6: Características del sistema de alimentación ininterrumpida S.USV pi advanced.

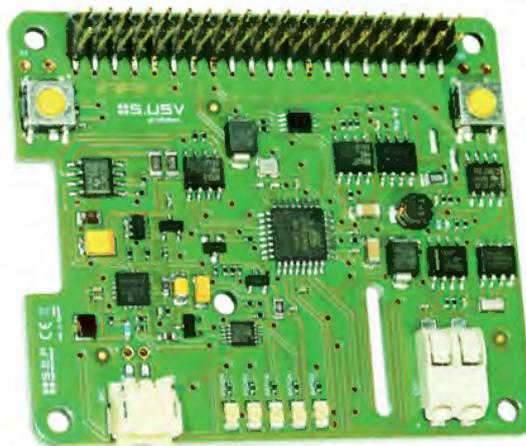


Figura 5.6: Perspectiva del SAI S.USV pi advanced.

### 5.1.5. Sistema de encapsulado

El sistema de encapsulado del prototipo Pi-EEWS esta formado por los soportes estructurales de los módulos hardware principal y de instrumentación, las placas de circuito integrado (PCB) y la circuitería interna, los conectores de panel, y el cableado externo.

#### Soportes estructurales

El soporte estructural del módulo del computador es una caja de instrumentación para montaje en rack de material pirorretardante, reforzada con fibra de vidrio, y de dimensiones  $72x138x144mm$  (Figura 5.7). Su interior está moldeado en guías para albergar placas de circuito impreso de  $1,6mm$  de grosor. Se ha procedido al sellado de las juntas de los paneles para asegurar un índice de protección IP-64.



Figura 5.7: Soporte estructural del módulo del computador sin mecanizar, junto con sus accesorios.

El soporte estructural del módulo de instrumentación está formado por una caja de similares características a la utilizada para el módulo principal, pero de dimensiones  $72x72x116mm$ . Esta caja se ha integrado mediante una abrazadera de aluminio a una plataforma niveladora diseñada específicamente para el prototipo Pi-EEWS y fabricada en acero galvanizado de  $3mm$  de espesor (Figura 5.8). De esta forma, el sistema puede nivelarse fácilmente en unos segundos mediante la plataforma antes de proceder a la fijación del módulo al suelo. Los planos de fabricación de esta plataforma se encuentran en el *Epílogo A: Planos de fabricación, desarrollo y montaje de aparamenta*, al final de este documento.



Figura 5.8: Composición con fotografías de las distintas fases de fabricación de la plataforma niveladora y su posterior integración con el sistema.

### Placas PCB y circuitería interna

Para la globalización e interconexión de los componentes ha sido necesario el diseño y fabricación de diversas placas de circuito impreso (PCB), así como planificar y desarrollar una circuitería interna para la integración de todos los elementos en el interior de las dos cajas de instrumentación (*Figura 5.9*). En el *Epílogo B: Diseño de las placas de circuito impreso (PCB)*, al final de este documento, se encuentran los diferentes esquemáticos y diseños que se han realizado de las PCB.

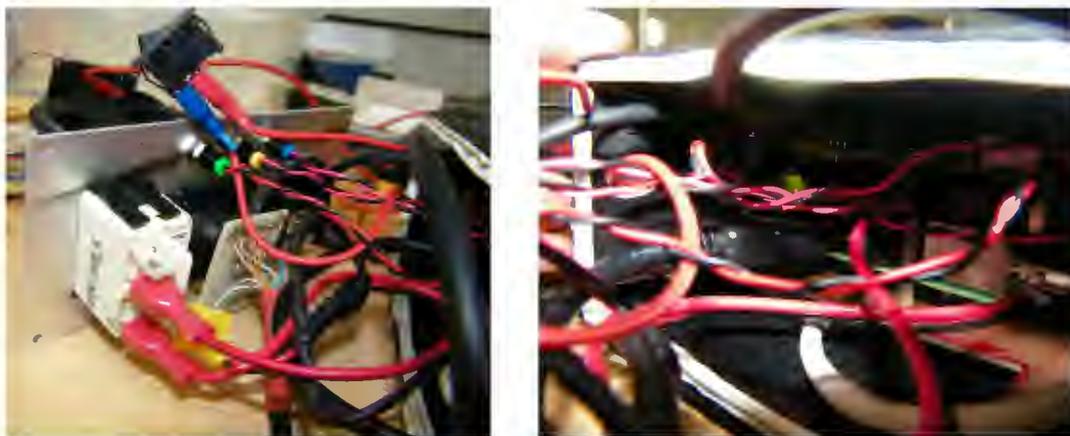


Figura 5.9: Detalle de la circuitería del módulo del computador. A la izquierda las conexiones del panel frontal. A la derecha el interior de la caja de instrumentación.

## Conectores de panel

Los conectores de panel delanteros del módulo principal cumplen la función de interfaz con el exterior para la conexión de dispositivos hardware al sistema, como teclado, ratón, monitor, discos duros, etc. Lo conforman un conector USB tipo A hembra y un conector HDMI hembra, ambos con índice de protección IP-68 y con tapa cubre polvo. Mencionar que actualmente se está experimentando con la conexión de sismógrafos de banda ancha al prototipo mediante el conector USB.

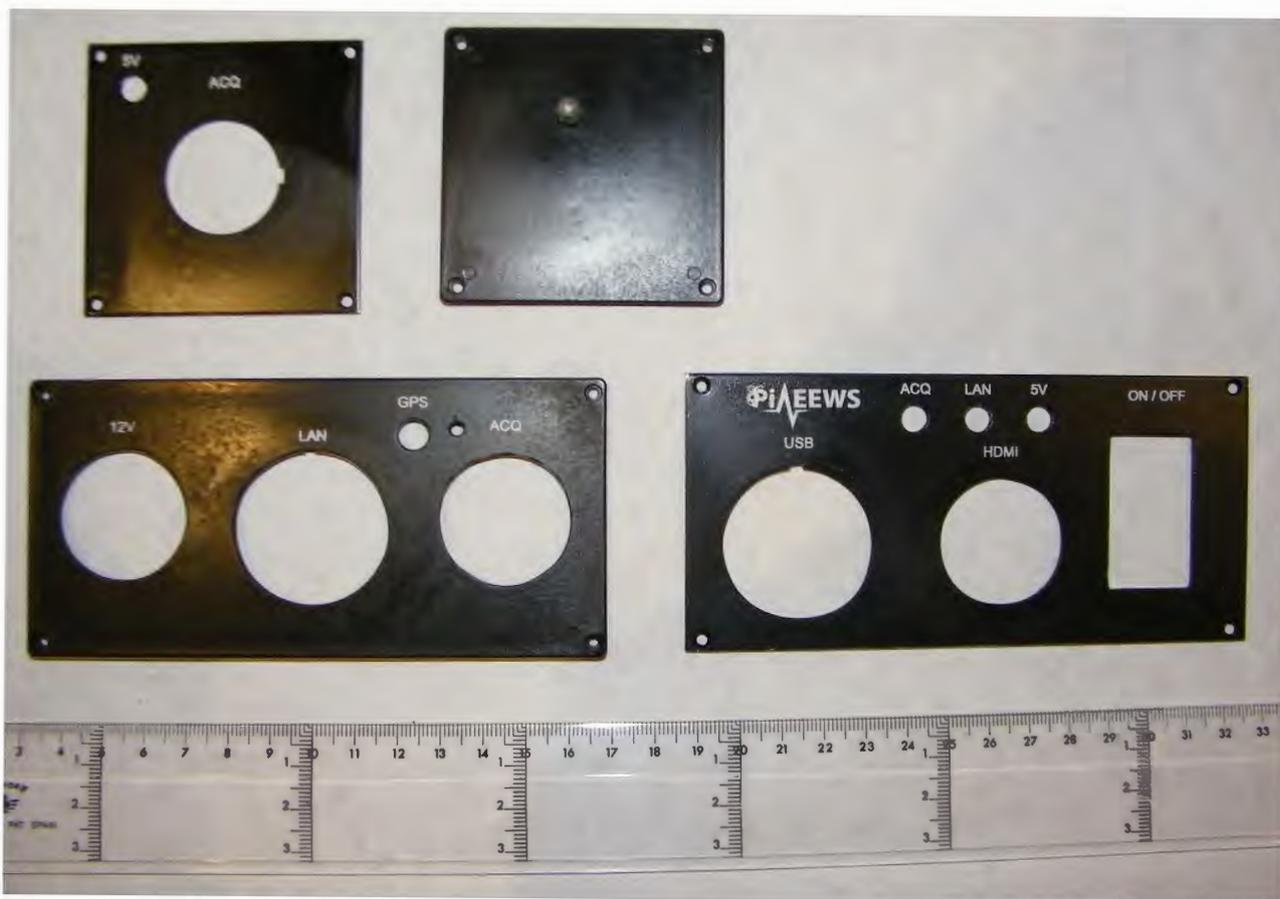


Figura 5.10: Proceso de mecanizado y serigrafiado de los paneles delanteros y traseros de las cajas de instrumentación.

Los conectores de panel traseros del módulo principal tienen la función de conectar elementos indispensables para el funcionamiento del sistema, como lo son una antena GPS, un cable de red, la alimentación o los sensores. Lo conforman un conector SMA macho (el otro extremo se encuentra conectado al conector u.FL del GPS), un conector de 4 pines para conectar el módulo de instrumentación (señal SDA y señal SCL de la conexión  $I^2C$ , positivo y masa), un conector de 2 pines (positivo y masa) para la alimentación a 12V, y un conector RJ45 hembra para la conexión a la red. Todos estos conectores de panel poseen un índice de protección IP-68 y una tapa cubre polvo para mantener el índice cuando las interfaces no se están utilizando.

Al final de este documento, en el *Epílogo A: Planos de fabricación, desarrollo y montaje de aparamenta*, se encuentran los planos de fabricación y serigrafiado de los paneles, así como las especificaciones concretas de los conectores utilizados.



Figura 5.11: Detalle de los conectores de panel de los módulos hardware. Arriba a la izquierda el panel delantero del módulo principal con los conectores USB y HDMI. Abajo a la izquierda, el panel trasero del módulo principal con la toma de alimentación, la toma de red, y la toma para el módulo de instrumentación. A la derecha, el panel delantero del módulo de instrumentación.

## Cableado externo

El cableado externo comprende el cableado (incluyendo los conectores en los extremos de los cables) para la conexión de los diferentes elementos ajenos al módulo principal de Pi-EEWS, pero necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo.

Tanto la conexión de la fuente de alimentación como la interconexión de los módulos principal e instrumentación (mediante los conectores de pines de los paneles de ambos módulos), se realiza por medio de mangueras de cables blindadas. Ambas mangueras poseen en sus extremos conectores de pines (2 y 4 respectivamente) que permiten, una vez conectados, mantener el índice de protección IP-68. La conexión de red (mediante el conector RJ45 hembra del panel trasero) se realiza mediante un latiguillo especial que igualmente asegura el índice de protección. La conexión de la antena activa externa para el GPS se realiza mediante un cable RG174, en cuyo extremo se encuentra un conector SMA hembra. Para el uso de antenas activas con otros conectores (TNC, BNC o similares), se provee de adaptadores para tal efecto.

Al final de este documento, en el *Epílogo A: Planos de fabricación, desarrollo y montaje de aparamenta*, se encuentran detalles específicos de los conectores utilizados, la antena GPS y los adaptadores; así como un esquema genérico de montaje.



Figura 5.12: Cableado externo. De izquierda a derecha, cableado de interconexión del módulo de instrumentación con el principal, latiguillo con conector RJ45 macho, cable para alimentación, y cableado RG174 y antena GPS, junto con adaptadores SMA a TNC y BNC.

### 5.1.6. Sistema de indicadores

El sistema de indicadores está estrechamente relacionado con el de encapsulado, al depender del soporte estructural (paneles de los módulos), la circuitería interna, etc. Sin embargo, por la función característica que posee, merece ser nombrado como un sistema aparte.

Este sistema lo componen los testigos led (diodos emisores de luz) de los paneles delanteros de ambos módulos y un zumbador interno, y su función es la de informar al operario mediante señales luminosas el estado del prototipo. Esto, entre otras ventajas, permite reducir el tiempo de detección de problemas, como lo pueden ser la falta de red o la pérdida de la señal GPS. Todos los testigos del prototipo poseen un índice de protección IP-68. Al final de este documento, en el *Epílogo A: Planos de fabricación, desarrollo y montaje de aparamenta*, se encuentran detalles específicos de los testigos led utilizados.

En el panel delantero del módulo principal encontramos cinco indicadores, un zumbador y cuatro leds. El primero se encuentra en el interior de la caja y no posee una funcionalidad definida. Un led rojo se encuentra integrado en el interruptor, y estará encendido siempre que el prototipo se encuentre conectado a la red eléctrica (independientemente al estado en el que se encuentre el computador). El led azul indica el estado de la adquisición. El led amarillo indica el estado de conexión a la red. Finalmente el led verde indica el estado de la alimentación (si es interna mediante batería, o externa). Por otra parte, en el panel delantero del módulo de instrumentación solo encontramos un testigo verde, que se encenderá inmediatamente si el ordenador Raspberry Pi se encuentra encendido.

Los códigos utilizados para alertar o informar al usuario mediante los indicadores de los posibles estados del sistema se describen en la *Tabla 5.7*.

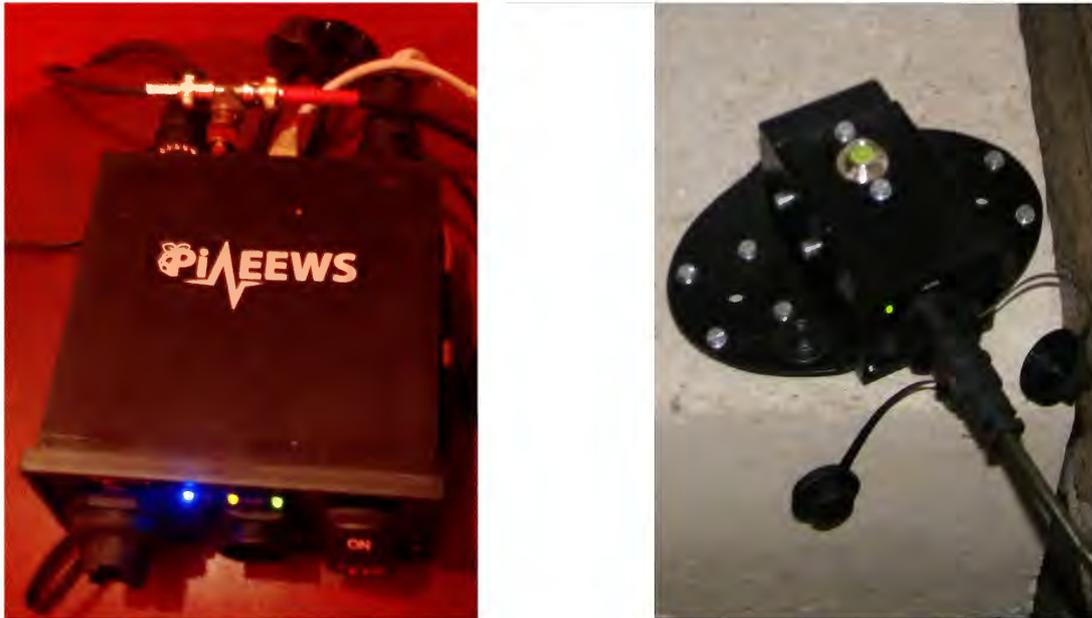


Figura 5.13: Testigos encendidos durante el funcionamiento a tiempo real del prototipo en la estación SFS de la red WM. También observamos las conexiones del panel trasero.

Comportamiento de indicadores led		
Indicador	Situación	Comportamiento
5v	Alimentación externa	Encendido.
5v	Alimentación interna (batería)	Parpadeo lento.
LAN	Conexión al receptor de alertas e Internet	Encendido.
LAN	Conexión solo al receptor de alertas	Parpadeo lento.
LAN	Conexión solo a Internet	Parpadeo rápido.
LAN	Sin conexión.	Apagado.
ACQ	Adquisición correcta.	Encendido.
ACQ	Sin adquisición.	Apagado.
ACQ	Esperando encendido del módulo.	Parpadeo rápido.
ACQ	Pérdida de señal GPS.	Parpadeo lento.
ON/OFF	Presencia de alimentación externa.	Encendido.
ON/OFF	Ausencia de alimentación externa.	Apagado.
Zumbador	Secuencia de encendido del sistema.	Pitidos rápidos continuos.
Zumbador	Secuencia de apagado del sistema.	Tres pitidos lentos.

Tabla 5.7: Tabla del comportamiento de los indicadores en función del estado del sistema.

### 5.1.7. Montaje del sistema hardware

Para el montaje del módulo de instrumentación se han unido la plataforma nivelable, la caja y la abrazadera mediante tornillería. A esta plataforma se le han añadido los tornillos de regulación. A continuación se ha fijado en el panel delantero de la caja el indicador led de presencia de voltaje y el conector de panel de 4 pines. Seguidamente se ha insertado el módulo STEVAL-MKI161V1 en la placa de circuito impreso correspondiente, y esta se ha introducido en los raíles internos de la caja, procediendo al cableado interno. Finalmente se ha procedido al cierre sellado del módulo.

Para el ensamblaje del módulo principal, en primer lugar se han montado los conectores de panel, los indicadores y el interruptor en los paneles de la caja. A continuación se ha unido el ordenador Raspberry Pi al módulo SAI y a la placa de circuito impreso pertinente, conformando de esta forma un piso único. Este, junto con la batería, se ha unido mediante tornillería a una plataforma fabricada a tal efecto (*Figura 5.14*). Seguidamente se ha introducido la plataforma en los raíles internos de la caja, procediendo al cableado interno. Finalmente se ha procedido al cierre sellado del módulo.

En el *Epílogo A: Planos de fabricación, desarrollo y montaje de aparatación* y en el *Epílogo B: Diseño de las placas de circuito impreso (PCB)* se encuentran más detalles del montaje del sistema, así como esquemas de la interconexión de componentes y elementos necesarios para el funcionamiento del prototipo Pi-EEWS.

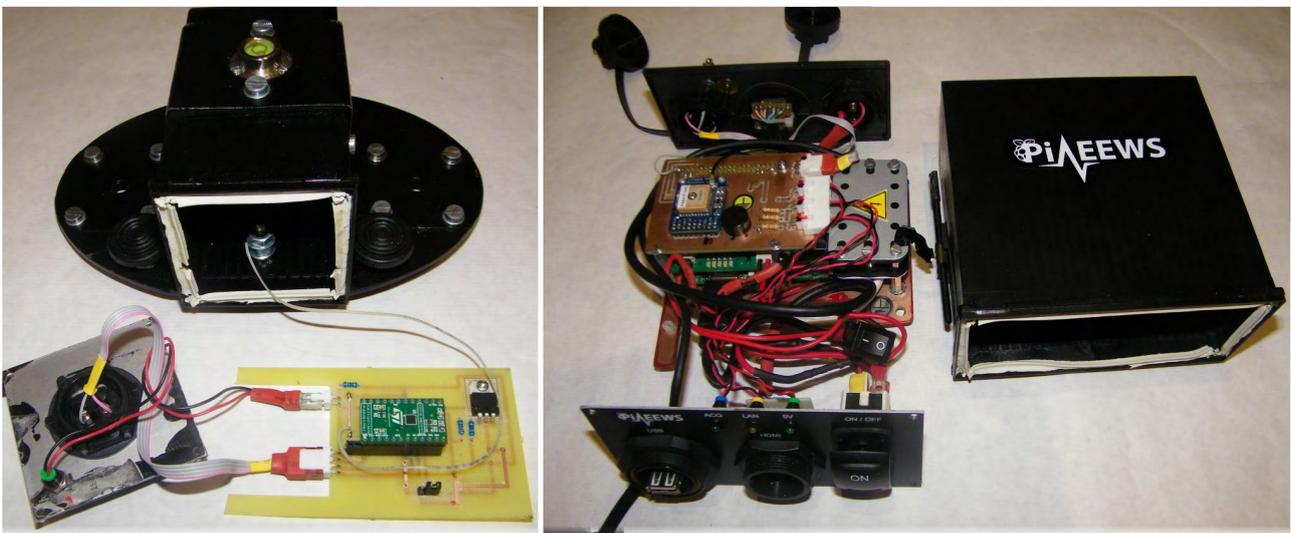


Figura 5.14: A la izquierda, piso compuesto por el módulo inercial y una PCB, junto con el módulo de instrumentación. A la derecha, piso de electrónica compuesto por el ordenador, el sistema SAI, PCB y batería, junto con el módulo principal.

### 5.1.8. Ventajas del sistema hardware

La arquitectura física seguida para la realización del prototipo así como los componentes hardware seleccionados a partir del análisis de requisitos, ofrecen una serie de ventajas.

En la *Tabla 5.8* se destacan y explican algunas de las ventajas más significativas.

---

#### Ventajas del sistema hardware

---

- Robustez. Mediante el sistema de alimentación ininterrumpida incorporado y el reloj a tiempo real del módulo GPS, se asegura la continuidad de funcionamiento del prototipo en caso de pérdida de señal GPS o caída de la red eléctrica, asegurando su robustez.
  - Fiabilidad. Los componentes seleccionados para el envoltorio del prototipo junto con el sellado de las cajas de instrumentación, aseguran un índice de protección IP-64, que evita la entrada de polvo y agua en el interior de los módulos. Además, el prototipo es resistente gracias al refuerzo de las cajas de instrumentación. El cableado blindado y sellado asegura la no entrada de polvo y agua, evita pérdida de señal, y aísla de interferencias.
  - Asequibilidad. El coste global de todos los componentes hardware no es elevado en comparación con el despliegue de una estación sísmica de banda ancha, lo que facilita la asequibilidad del prototipo.
  - Escalabilidad. El prototipo es fácilmente ampliable mediante el añadido de nuevos módulos de instrumentación, sin afectar por ello el rendimiento del sistema. La placa ordenador Raspberry Pi, en continuo desarrollo, es fácilmente sustituible si aparecen modelos más potentes en el futuro.
  - Capacidad. La memoria física permite el almacenamiento de meses de información. Además esta puede ser fácilmente ampliada.
  - Rendimiento. La velocidad de respuesta del ordenador y la instrumentación utilizada se adecua a las necesidades del sistema.
  - Mantenibilidad. El mantenimiento del sistema hardware es sencillo y ágil.
  - Operabilidad. El hardware es fácilmente operable gracias a la plataforma nivelable y su nivel integrado. El despliegue y montaje del prototipo de forma fija en una ubicación preparada es rápido y sencillo. Los indicadores también facilitan la operabilidad.
  - Portabilidad. El hardware es fácilmente transportable de una ubicación a otra gracias a sus reducidas dimensiones y peso.
- 

Tabla 5.8: Algunas de las ventajas que presenta la arquitectura física seguida así como los componentes hardware seleccionados.

## 5.2. Arquitectura lógica

La *arquitectura lógica* del prototipo hace referencia al software que opera sobre la arquitectura física; sin esta arquitectura, el prototipo sería un (bonito) lapicero pisapapeles. Esta arquitectura engloba el propio sistema operativo del computador Raspberry Pi, el firmware del sistema de alimentación ininterrumpida S.USV pi advanced (ofrecido por el fabricante), los controladores de dispositivo hardware (drivers) implementados, y el software para la alerta sísmica temprana local que se está desarrollando exclusivamente para el prototipo. Este último lo definiremos como **PiEEWS-SW**, donde SW es la abreviatura de software.

En este apartado trataremos el desarrollo de la arquitectura lógica del prototipo Pi-EEWS, profundizando en el desarrollo de controladores de dispositivo, el software PiEEWS-SW y el cliente de visualización gráfica, además de tratar las ventajas que presenta lo implementado.

### 5.2.1. Controladores de dispositivo

Esta línea de trabajo se encuentra a medio camino entre el desarrollo hardware y el desarrollo software, al estar estrechamente relacionada con ambos campos.

Era necesaria la creación de controladores de dispositivo, también llamados drivers, que nos permitiera la abstracción del hardware utilizado en el proyecto, como el módulo inercial LSM6DS0 o el módulo GPS MTK3339, y además posibilitase la configuración abierta y a bajo nivel de los dispositivos para adaptarlos a nuestras necesidades. El objetivo era conseguir una interfaz manejable que permitiese el rápido desarrollo del software para la alerta sísmica temprana local del prototipo Pi-EEWS.

A partir del profundo estudio de la documentación de los componentes hardware que integraban el prototipo, se desarrollaron en el entorno del paradigma orientado a objetos haciendo uso del lenguaje de programación Python 2.7, drivers adaptados a los requisitos del sistema para los módulos MTK3339 y LSM6DS0, el SAI S.USV pi advanced, y para el control de los pines GPIO del computador Raspberry Pi.

Es interesante mencionar la configuración que estos drivers aplican al módulo GPS MTK3339 y al módulo inercial LSM6DS0, siguiendo el análisis de requisitos del prototipo. Podemos observar las configuraciones seguidas en la *Tabla 5.8* y en la *Tabla 5.9*.

---

<b>Configuración del módulo GPS MTK3339</b>
• Velocidad de transmisión: 57600 baudios.
• Sentencias NMEA de salida: PGTOP, GPZDA y GPGGA.
• Velocidad de actualización y tasa de reportes: 10Hz.

---

Tabla 5.9: Configuración aplicada al módulo GPS MTK3339. Destacar el contenido de las sentencias NMEA: PGTOP contiene información del estado de la antena, GPZDA contiene información de tiempo, GPGGA contiene información del estado de la conexión con los GPS.

### Configuración del módulo inercial LSM6DS0

- Giroscopio y acelerómetro activados en todos los ejes (x, y z).
- Escala completa del acelerómetro:  $+ - 2g$ .
- Escala completa del giroscopio:  $+ - 245dps$ .
- Frecuencia de muestreo (ODR):  $119Hz$  (ajustada a  $100Hz$ ).
- Ancho de banda del filtro anti-aliasing:  $50Hz$ .
- Modo de alta resolución activado con frecuencia de corte del filtro de paso baja igual a  $ODR/9$ .

Tabla 5.10: Configuración aplicada al módulo inercial LSM6DS0. Actualmente solo analizamos los datos de velocidad de la componente z, aunque la monitorización se aplica igualmente al resto de componentes y a los datos de velocidad angular, también en las 3 componentes.

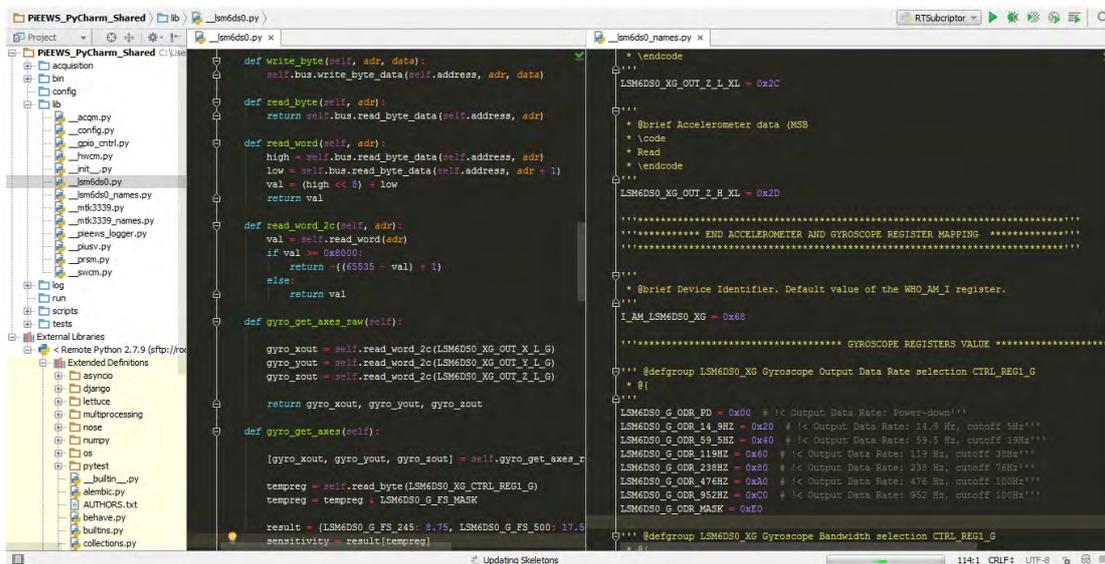


Figura 5.15: Captura tomada durante la implementación del driver de control del módulo inercial LSM6DS0 utilizando el sistema de programación distribuida que ofrece el IDE PyCharm.

### 5.2.2. El software PiEEWS-SW

El sistema software PiEEWS-SW que conforma la arquitectura lógica se ha desarrollado en su totalidad en el entorno del paradigma orientado a objetos haciendo uso del lenguaje de programación **Python 2.7** (versión necesaria para mantener la compatibilidad con algunas librerías científicas), bajo la distribución del sistema operativo GNU/Linux basado en Debian, Raspbian Jessie, instalado en el computador Raspberry Pi. No obstante, algunas bibliotecas y funcionalidades implementadas hacen uso del lenguaje de programación **C++**. Además, para algunas funcionalidades de gestión del sistema operativo y para iniciar/detener los procesos demonio que conforman el software del prototipo, se han desarrollado **shell scripts**. Destacar la utilización de librerías Python para la computación científica como **NumPy** y **Scipy**.

La estructura del software mantiene la filosofía de SAST actuales como ALERTES o Seis-ComP3 [7][10], aunque el sistema es completamente independiente a estos. El software del prototipo está compuesto de diferentes sistemas (más adelante llamados módulos) que engloban las funcionalidades que un SAST regional debe poseer además de la propia adquisición. Estos sistemas, interconectados por un sistema maestro, se comunican entre ellos por medio de la tecnología **ZMQ** [25], basada en la infraestructura TCP/IP, que permite la computación distribuida y el control remoto del prototipo. Los sistemas a su vez se componen de módulos software y librerías. Podemos observar un diagrama de bloques de la estructura del software desarrollado en la *Figura 5.16*. En la *Tabla 5.11* y en la *Tabla 5.12* se resumen las funciones de cada módulo, exceptuando Ringserver, al no ser exclusivo del software desarrollado.

Todos los módulos están programados para su ejecución paralela e independiente como procesos demonio para proveer un servicio. Como tales, poseen shell scripts alojados en el sistema operativo para su inicio, reinicio o detención. A partir de estos scripts, el propio sistema operativo en su arranque, se encarga de iniciar todos los módulos que componen el software. De esta forma por ejemplo, al encenderse el prototipo comenzará a funcionar la adquisición y el análisis en tiempo real en apenas unos segundos de forma automatizada, y controlaremos el estado del sistema a partir del panel de testigos, mediante conexión remota o directamente haciendo uso de las interfaces físicas externas del panel delantero del módulo hardware del computador.

<b>Entrada/salida/funciones de los módulos de PiEEWS-SW. Resumen 1</b>				
$\nabla$	<b>PiEEWS ACQM</b>	<b>PiEEWS DETM</b>	<b>PiEEWS PWAM</b>	<b>PiEEWS ALRM</b>
<b>Datos de entrada</b>	Datos de movimiento del suelo recogidos por instrumentación.	Datos de movimiento del suelo provenientes del módulo ACQM.	Datos de movimiento del suelo acotados en una ventana determinada, la cual contiene una posible onda P.	Parámetros $P_d$ , $\tau_c$ , magnitudes asociadas y SNR.
<b>Datos de salida</b>	Datos de movimiento del suelo en un vector de datos.	Datos de movimiento del suelo acotados en una ventana, la cual contiene una posible onda P.	Parámetros $P_d$ , $\tau_c$ , magnitudes asociadas y SNR.	Parámetros $P_d$ , $\tau_c$ , magnitudes asociadas, SNR y nivel de alerta.
<b>Actividad</b>	Recogida de datos de aceleración del sensor, y difusión.	Detección de ondas P y difusión de la ventana de tiempo que la contiene.	Análisis de ondas P. Cálculo de $P_d$ , $\tau_c$ , magnitudes asociadas y SNR.	Cálculo del nivel de alerta sísmica y posterior difusión.

Tabla 5.11: Resumen 1 de los datos de entrada y salida de los módulos que componen el software PiEEWS-SW, así como la actividad que lleva a cabo cada uno. Se tratan los módulos PiEEWS-ACQM, PiEEWS-DETM, PiEEWS-PWAM y PiEEWS-ALRM.

<b>Entrada/salida/funciones de los módulos de PiEEWS-SW. Resumen 2</b>				
$\nabla$	<b>PiEEWS SWCM</b>	<b>PiEEWS HWCM</b>	<b>PiEEWS BCKM</b>	<b>PiEEWS STRM</b>
<b>Datos de entrada</b>	Mensajes de estado del resto de módulos. Instrucciones del usuario. Alertas.	Información del estado del hardware procedente de los drivers, como conectividad a la red, señal GPS, baterías, etc.	Datos de movimiento del suelo en un vector de datos, archivos log, alertas, picks, etc.	Datos de movimiento del suelo en un vector de datos.
<b>Datos de salida</b>	Alertas. Información del estado global del sistema.	Información del estado del hardware.	Datos almacenados.	Datos de movimiento del suelo en formato JSON.
<b>Actividad</b>	Controla el resto de módulos. Mediante socket ZMQ actúa como interfaz al usuario, envía las alertas al computador encargado de procesarlas y publica información de estado del sistema. Otras funciones de control.	Controla los indicadores de los paneles, y envía información del estado del hardware al módulo SWCM.	Almacenamiento persistente de los datos de adquisición, copias de seguridad en base de datos externa, gestión y almacenamiento de alertas, logs, picks, etc.	Transmisión de los datos de adquisición a tiempo real en formato JSON mediante un socket publicador ZMQ.

Tabla 5.12: Resumen 2 de los datos de entrada y salida de los módulos que componen el software PiEEWS-SW, así como la actividad que lleva a cabo cada uno. Se tratan los módulos PiEEWS-SWCM PiEEWS-HWCM, PiEEWS-BCKM y PiEEWS-STRM.

A continuación se explicará brevemente la implementación y el estado de desarrollo de cada uno de los módulos que componen el software PiEEWS-SW implementado para operar en el ordenador Raspberry Pi y llevar a cabo las funciones de sistema de alerta física temprana local. También se mencionará la situación actual sobre la compatibilidad del sistema con SAST regionales como ALERTES-SC3 mediante el módulo Ringserver y el servidor SeedLink. Por último, se detallará el sistema de logs automáticos implementado.

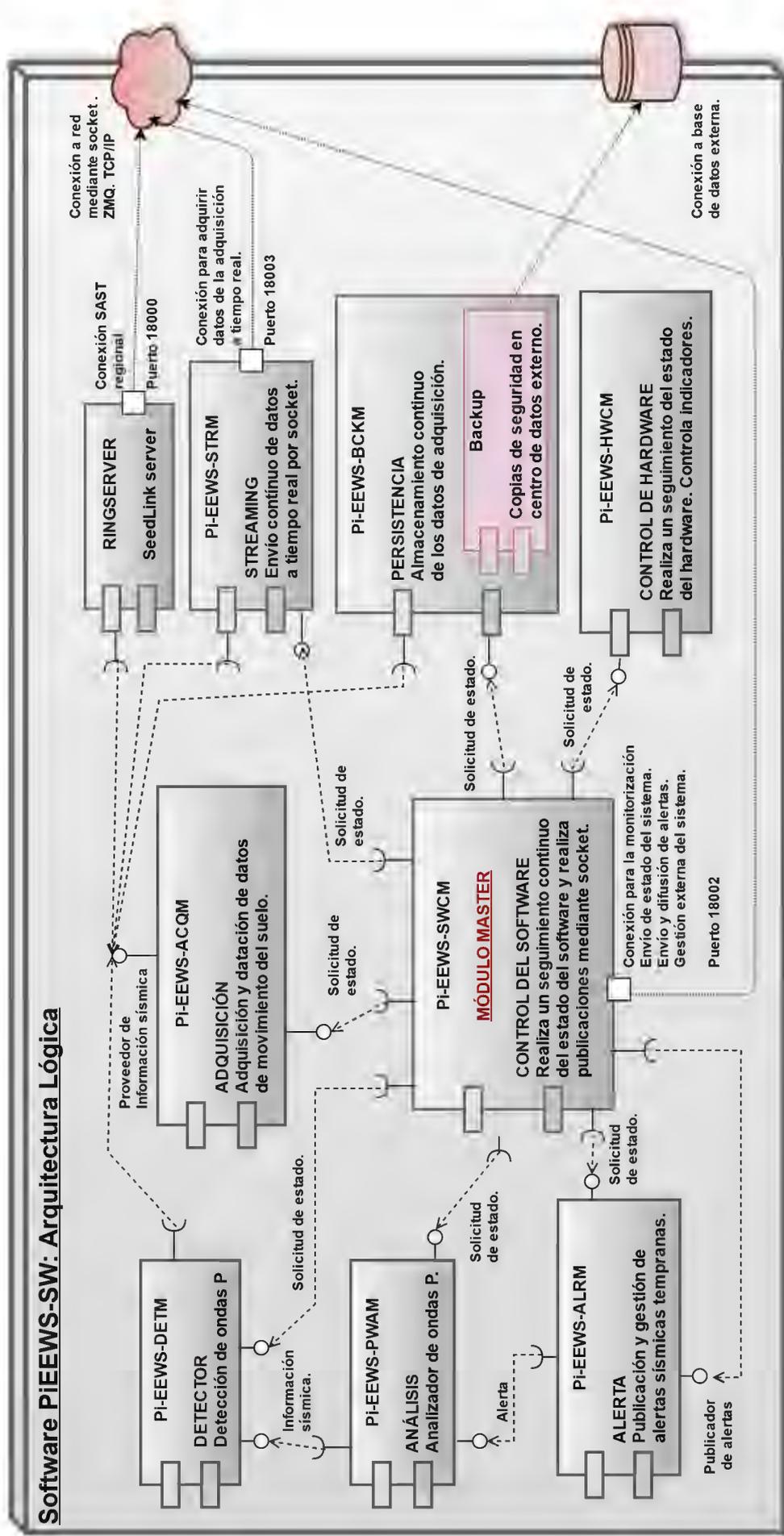


Figura 5.16: Diagrama de bloques de los módulos que componen el software de alerta sísmica temprana PiEWS-SW, implementado para el prototipo Pi-EEWS. Observamos en cada bloque el nombre del módulo dentro del sistema, su funcionalidad y una breve descripción de las tareas que realiza. También se muestran las interfaces que proveen (círculos), las publicaciones (mensajes) y las peticiones (semicírculos). Los cuadrados blancos indican una interfaz al exterior mediante socket ZMQ, de tecnología TCP/IP.

### Módulo de adquisición. PiEEWS-ACQM

El nombre del módulo (ACQM) proviene de la abreviatura de «Acquisition» (adquisición en español) unida a la «M» de «Module».

El módulo de adquisición de datos se comunica directamente con los controladores desarrollados para el módulo inercial LSM6DS0 y el módulo GPS MTK3339. A partir de las señales de reloj a  $10Hz$  que ofrece el sistema GPS, y haciendo uso de registros de interrupción para controlar la salida del sensor de aceleración triaxial, se genera un muestreo continuo de datos de aceleración datados con su tiempo de adquisición, a una frecuencia de muestreo de  $100Hz$ .

Los datos adquiridos y datados son inmediatamente transmitidos al resto de los módulos mediante un publicador ZMQ. Mediante este planteamiento, aseguramos que la adquisición nunca se interrumpa aunque ocurran fallos en otros módulos, y que además el sistema operativo mantenga constantes los recursos que ofrece al proceso demonio pertinente.

El módulo de adquisición PiEEWS-ACQM se encuentra completamente implementado y actualmente se está depurando para subsanar problemas (como pérdidas de muestras que se producen esporádicamente), y para ajustar la frecuencia de muestreo para hacerla más precisa.

A partir de este módulo, se aplica el funcionamiento básico del sistema de alerta sísmica temprana local consistente en el análisis continuo de la señal a tiempo real en búsqueda de picks, y en caso de ocurrir uno, en la obtención de los parámetros  $P_d$  y  $\tau_c$  para determinar la alarma a partir de la tabla de decisión. Observamos en la *Figura 5.17* un diagrama de secuencia del funcionamiento básico del software implementado.

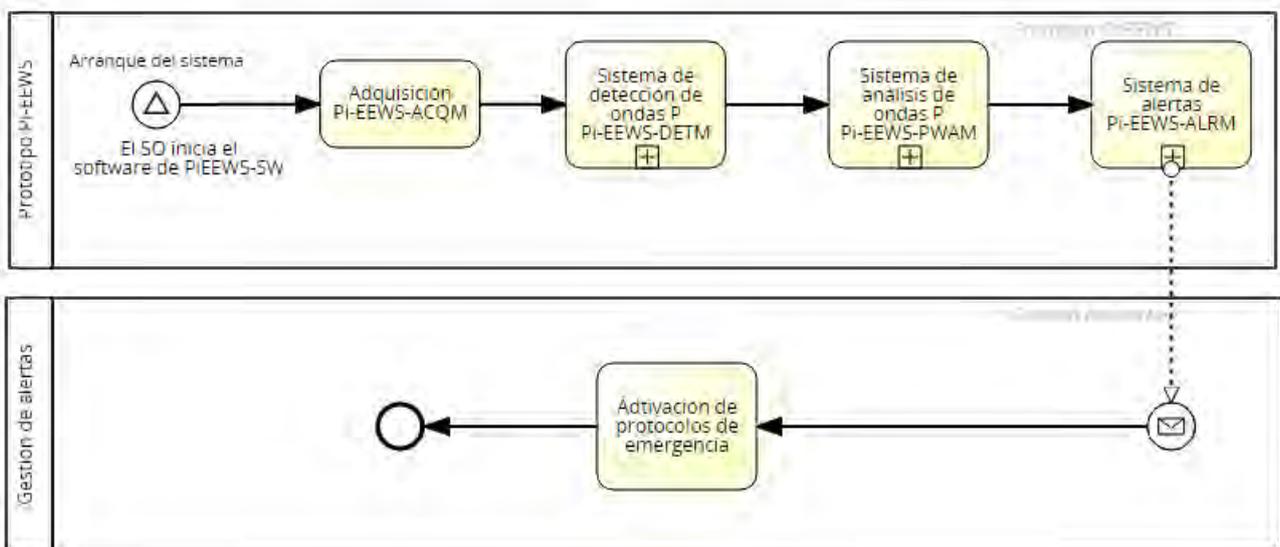


Figura 5.17: Diagrama de secuencia básico del funcionamiento del software PiEEW-SW. El sistema operativo inicia el software en el arranque. Exceptuando el sistema de adquisición que recoge los datos directamente del sensor inercial, los módulos se encuentran a la escucha del publicador correspondiente que provee como datos de salida los datos de entrada requiere cada módulo (ver *Tabla 5.11* y *Tabla 5.12*).

## Módulo de detección de ondas P. PiEEWS-DETM

El nombre del módulo (DETM) proviene de la abreviatura de «Detector» (detector en español) unida a la «M» de «Module».

El módulo adquiere del publicador del módulo de adquisición los datos de movimiento del suelo muestra por muestra. En cada adquisición, el pordeso detector procede al cálculo de la métrica basándonos en el algoritmo detector de fase explicado en el capítulo *Metodología y fundamento teórico* [2]. Para ello, previo a los cálculos se aplican diversos filtros para acomodar la señal, entre ellos un filtro Butterworth paso bajo de orden 2 y  $0,5Hz$  como frecuencia de corte (*Figura 5.18*). Seguidamente se procede a la comparación con el umbral establecido para determinar la presencia de señal (pick). Observamos un ejemplo de detección en la *Figura 5.23*.

Si la métrica supera el umbral (se detecta un pick), se publica una ventana de tiempo determinada (configurable) con las muestras características para su posterior análisis en el módulo PiEEWS-PWAM. A continuación y para evitar lanzar continuamente picks durante el tiempo de duración de un evento, el sistema parará el proceso detector hasta que la métrica se encuentre por debajo del umbral durante un determinado número de segundos, es decir, hasta que el evento actual haya finalizado. Observamos un diagrama de secuencia del funcionamiento básico del módulo de detección de ondas P en la *Figura 5.19*.

El módulo de detección de ondas P PiEEWS-DETM se encuentra completamente implementado y se ha demostrado su eficacia durante simulaciones y pruebas a tiempo real.

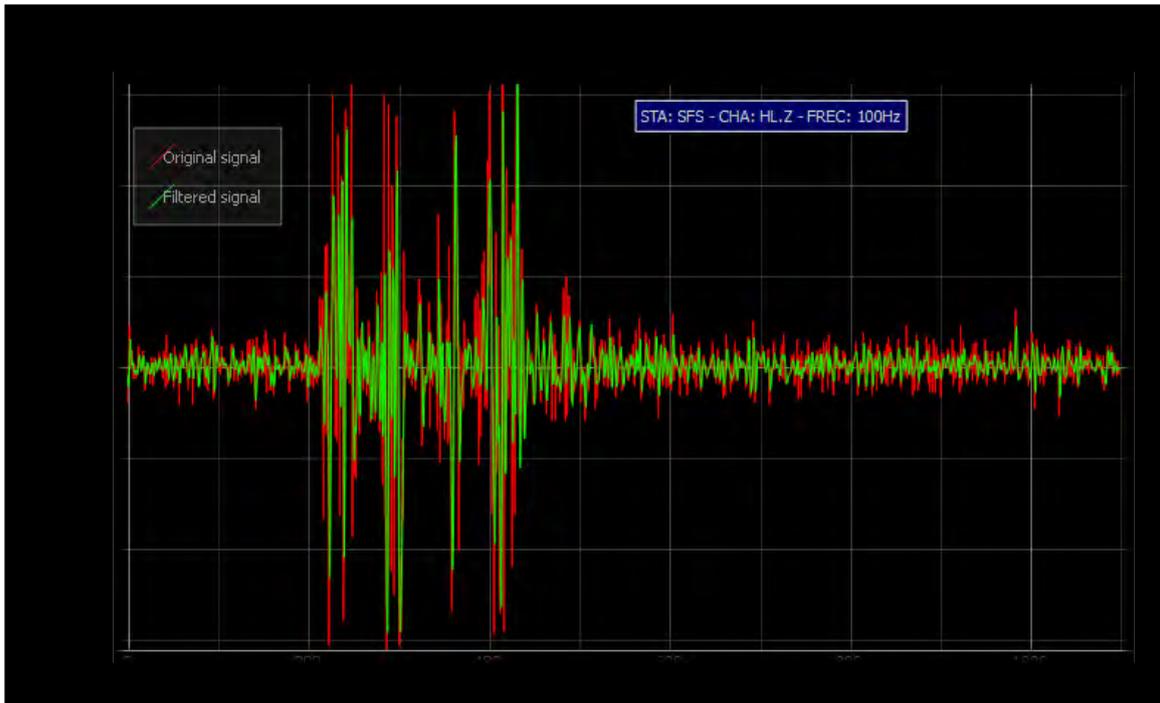


Figura 5.18: Ventana de tiempo de 11 segundos. En rojo, la señal del canal HLZ original adquirida por el módulo PiEEWS-ACQM. En verde, la señal acondicionada tras aplicar diversos filtros en el módulo de detección. Las señales han sido dibujadas por un cliente desarrollado para el sistema (ver más adelante el apartado *Cliente de visualización gráfica*).

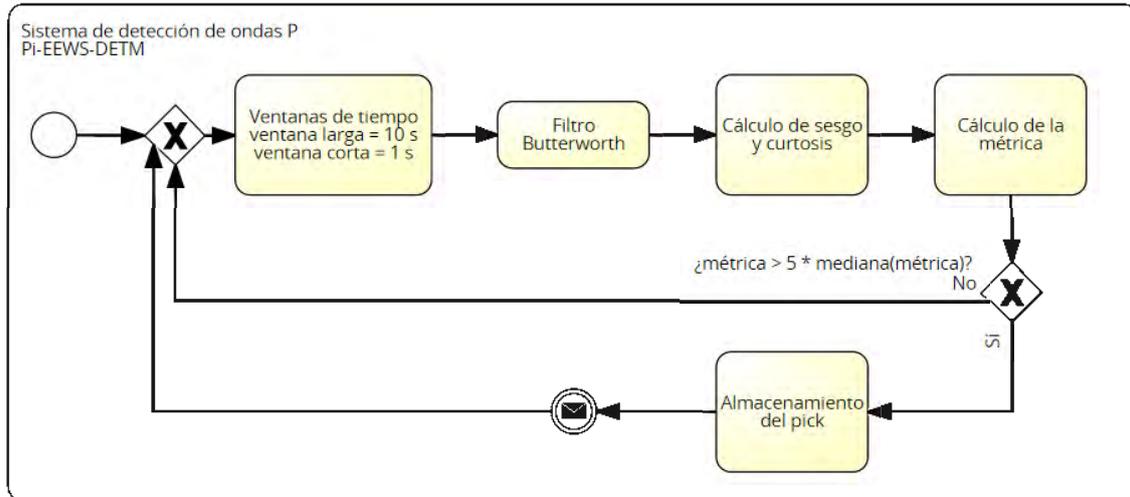


Figura 5.19: Diagrama de secuencia básico del funcionamiento del módulo de detección de ondas P PiEEWS-DETM.

### Módulo de análisis de ondas P. PiEEWS-PWAM

El nombre del módulo (DETM) proviene de la abreviatura de «P Waves Analysis» (análisis de ondas P en español) unida a la «M» de «Module».

Cuando el sistema detector de picks detecta una posible onda P, publica una ventana de tiempo en forma de vector con las muestras pertinentes, correspondientes por defecto a un minuto antes de la llegada de la onda y tres segundos después del pick, junto con el tiempo de llegada de la onda, que actúa como índice de acceso al vector. La publicación es recogida por este módulo para proceder a su análisis.

Para el cálculo de los parámetros  $P_d$  y  $\tau_c$ , recortamos la ventana de tiempo recogida a 3 segundos después de la detección [5][7]. Además, es necesario eliminar la componente continua y la tendencia lineal de la señal, y realizar un suavizado gradual en los extremos de la misma de anchura 0,05s para evitar efectos de borde al aplicar los filtros. Además, tras la integración de los registros para la obtención del desplazamiento, se producían bajas frecuencias que eliminamos mediante otro filtro butterworth paso alto de orden 2 y frecuencia de corte de 0,0075Hz, la más empleada en cálculos realizados en otros estudios [5]. El software, aplicando las ecuaciones explicadas en el capítulo *Metodología y fundamento teórico*, realiza el cálculo de los parámetros  $P_d$  y  $\tau_c$ .

Para la obtención de la relación señal/ruido en potencia, se hace uso de la estadística de la señal utilizando los 3 segundos anteriores al pick y los 3 posteriores, por lo que recortamos nuevamente la ventana de tiempo recogida para adaptarla al cálculo. El software lleva a cabo esta tarea aplicando las ecuaciones explicadas anteriormente.

En cuanto a las magnitudes asociadas, actualmente solo se realiza el cálculo de la asociada a  $\tau_c$ . Para su obtención, se hace uso del parámetro  $\tau_c$  y la relación de éste con la magnitud del evento, explicada en el capítulo *Metodología y fundamento teórico*.

Una vez efectuados los análisis, estos son publicados para su tratamiento por parte del módulo de alertas PiEEWS-ALRM. Como se ha mencionado anteriormente, el paquete publicado contendrá los parámetros  $P_d$  y  $\tau_c$ , la magnitud asociada a  $\tau_c$  y la SNR.

Observamos un diagrama de secuencias básico del funcionamiento del módulo en la *Figura 5.20*. El cálculo de la SNR se realiza de forma paralela al de los parámetros  $P_d$  y  $\tau_c$ .

El módulo de análisis de ondas P PiEEWS-PWAM se encuentra completamente implementado a excepción del cálculo de la magnitud asociada al parámetro  $P_d$ . Aunque en el proyecto en el que se ha basado la implementación del módulo se demostró la eficacia del sistema de análisis [8], se continua con su depuración y ajuste durante las pruebas a tiempo real.

Se plantea como mejora futura el añadido a este módulo de nuevas funcionalidades para el cálculo de otros parámetros y magnitudes.

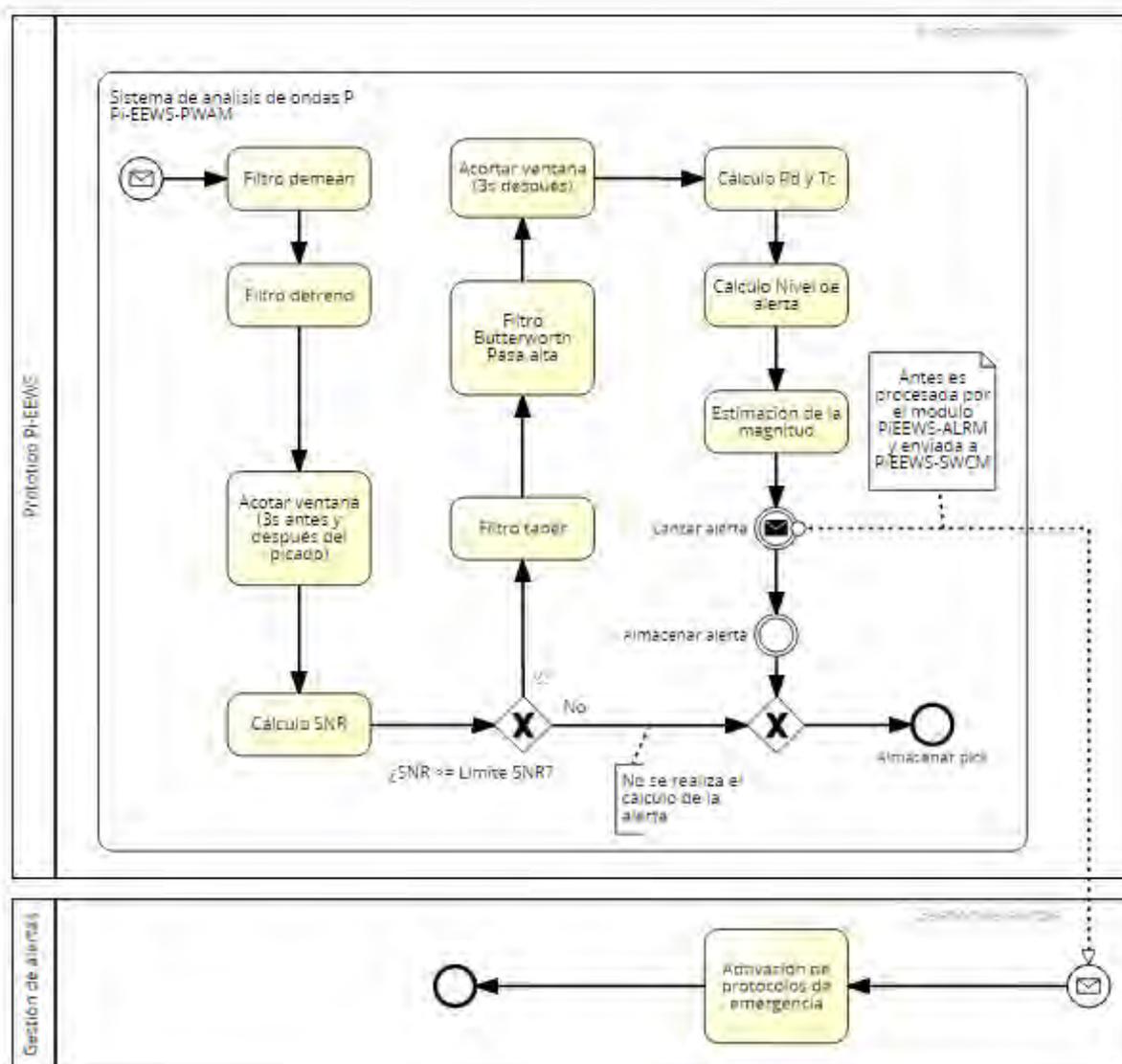


Figura 5.20: Diagrama de secuencia básico del funcionamiento del módulo de análisis de ondas P PiEEWS-PWAM. El cálculo de la SNR se realiza de forma paralela al de  $P_d$  y  $\tau_c$ .

## Módulo de alerta. PiEEWS-ALRM

El nombre del módulo (ALRM) proviene de la abreviatura de «Alert» (alerta en español) unida a la «M» de «Module».

Este sistema adquiere los resultados del análisis de ondas P del módulo PiEEWS-PWAM y procede al cálculo del nivel de alerta. Para ello, siguiendo el proceso explicado el capítulo *Metodología y fundamento teórico*, se realiza la comparación de los parámetros  $P_d$  y  $\tau_c$  mediante la tabla de decisión de A. Zollo [4].

Asimismo, el módulo determina la fiabilidad del análisis de la onda a partir de la comparativa de la SNR con el umbral; si la SNR es mayor o igual, los resultados se tratarán como fiables. Este umbral se establecerá a partir del estudio del ruido presente en la ubicación del prototipo.

Una vez determinado el nivel de alerta y la fiabilidad, se envía al módulo de control de software PiEEWS-SWCM, donde se creará un paquete JSON con la alerta y todos los datos relacionados, siguiendo una plantilla diseñada para tal efecto (*Tabla 5.13*). Este paquete es publicado para la recepción por parte de cualquier cliente interesado que se encuentre conectado (como el computador encargado de activar los protocolos de emergencia que el cliente requiera).

El módulo de alerta PiEEWS-PWAM se encuentra implementado y depurado. Cabe destacar que aunque el software está planteado para que un computador del propio cliente sea el encargado de gestionar los protocolos de emergencia, es posible integrar en este módulo funcionalidades para tal efecto. Como el proyecto es un prototipo, no se descartan cambios futuros en el formato JSON diseñado para las alertas y en la forma de transmisión a tiempo real.

```
{ "Pi-EEWSv1" :
  {
    "Alert" :
    [
      {
        "Station": "SFS", "DayTime": "2011/05/11",
        "ON": "2011/05/11 16:48:10.630", "SNR" : 23,861,
        "RELIABLE": "Y", "PD": 0.00017, "TC": 3.142,
        "MTC": 6.9, "AL": 1
      }
    ]
  }
}
```

Tabla 5.13: Ejemplo real de un paquete JSON enviado por el módulo PiEEWS-SWCM durante una simulación realizada con la forma de onda correspondiente a la componente de datos HHZ del día 11 de mayo de 2011 en la estación UCM (Universidad Complutense de Madrid, Madrid) perteneciente a la red WM. La alerta está asociada al evento de magnitud 5.1 ocurrido esa fecha en Lorca (Murcia). Se ha utilizado la plantilla de la primera versión (y actual) del formato diseñado. A partir de esta plantilla, los clientes que escuchen del publicador pueden recomponer los datos para utilizarlos.

## Módulo de control de software. PiEEWS-SWCM

El nombre del módulo (SWCM) proviene de la abreviatura de «Software Control» (control de software en español) unida a la «M» de «Module», y es el sistema master de PiEEWS-SW.

La función principal de este módulo es controlar al resto de sistemas solicitando información de estado a las interfaces desplegadas del resto de módulos, centralizando dicha información. De esta forma, si un servicio no responde a la petición de estado, el módulo de control chequea el sistema comprobando si se encuentra en memoria el proceso demonio correspondiente al servicio que no ha respondido la solicitud. De no ser así, levanta automáticamente el servicio. También actúa de intermediario para transmitir mensajes entre módulos.

Otra funcionalidad importante es la de servir de interfaz al usuario mediante sockets ZMQ. El cliente puede conectarse a una de estas interfaces para monitorizar el estado del sistema (información del propio módulo de control y el resto de procesos), recibir (entre otros tipos de mensajes) los picks y las alertas, etc. Además, el sistema puede ser gestionado de forma remota mediante otro socket diseñado para tal efecto.

El módulo de control de software PiEEWS-SWCM se encuentra parcialmente desarrollado. Aún se está implementando la monitorización y la gestión remota del sistema. Las funcionalidades de control de software están implementadas y se encuentran en fase de depuración.

## Módulo de control de hardware. PiEEWS-HWCM

El nombre del módulo (HWCM) proviene de la abreviatura de «Hardware Control» (control del hardware en español) unida a la «M» de «Module».

Este módulo se nutre directamente de los controladores de dispositivo implementados. Mediante continuas consultas al sistema operativo y el uso de los drivers, determina el estado de la interfaz física de red, el estado de conexión a la red, el voltaje y consumo eléctrico, el estado de la batería interna, el estado de la adquisición, la calidad de la señal GPS, el propio estado del ordenador Raspberry Pi, etc.

Toda la información que el módulo de control de hardware reúne es procesada para determinar diversos estados globales del prototipo en relación con el hardware. A partir de estos estados y mediante el controlador de los pines GPIO del ordenador Raspberry Pi, el módulo modifica el estado de los indicadores (los diodos led y el zumbador) para proveer información visual y auditiva del estado del sistema al operario.

Por último, este módulo envía toda la información y los estados determinados al módulo de control de software PiEEWS-SWCM para su proceso y retransmisión mediante un socket ZMQ al usuario si fuese necesario, o a otros módulos que lo solicitaran.

El módulo de control de hardware PiEEWS-HWCM se encuentra completamente desarrollado y depurado, siendo el primero en diseñarse e implementarse durante la realización del proyecto, por su papel en la ayuda a la depuración del resto del sistema.

## Módulo de almacenamiento y backup. PiEEWS-BCKM

El nombre del módulo (BCKM) proviene de la abreviatura de «Backup» (copia de seguridad en español) unida a la «M» de «Module».

Este módulo se provee de los datos de movimiento del suelo que ofrece la interfaz del módulo de adquisición PiEEWS-ACQM. Cada cierto tiempo previamente establecido (actualmente cinco segundos), el sistema de almacenamiento realiza una copia persistente en disco de los datos de movimiento que se encuentran en la memoria principal del ordenador en un fichero plano en formato *csv* con cabecera (*Figura 5.21*), para asegurar la permanencia.

Otra funcionalidad del módulo es la realización de un volcado de datos a una base de datos externa (concentrador de datos) de forma diaria. Además, si el sistema de control del hardware PiEEWS-HWCM detecta la caída de la red eléctrica, el módulo activa esta funcionalidad de forma inmediata para evitar pérdida de datos en caso de un apagado no seguro del sistema (el suceso de apagado no seguro no debería ocurrir, pero es necesario tener una política de prevención ante ello).

El módulo de almacenamiento y backup PiEEWS-BCKM se encuentra parcialmente desarrollado, a falta del diseño de un servidor de base de datos remoto adecuado para el sistema. Además, se están desarrollando módulos software para dotar a este módulo la funcionalidad de almacenamiento en formatos SAC y Mini-SEED.

```
1 # =====
2 # == Net: PiEEWS v1
3 # == Station: SANF (San Fernando)
4 # == CreationTime: 2016/05/26
5 # == StartTime: 135606.900
6 # == EndTime: 144059.160
7 # =====
8 HLZ,HLN,HLE,date
9 512,-769,-2560,135606.900
10 -257,-2817,512,135606.910
11 -3329,4096,-512,135606.920
12 2560,768,-2561,135606.930
13 -2049,3072,3328,135606.940
14 1792,-1025,256,135606.950
15 -1025,-1025,256,135606.960
16 1280,-1025,-2817,135606.970
17 -257,1280,-257,135606.980
18 -1537,-257,-513,135606.990
19 -257,3584,1792,135607.000
20 1792,-3329,2816,135607.010
```

Figura 5.21: Principio del fichero plano con información sísmica adquirida el 26/05/2016, durante el periodo de pruebas a tiempo real junto a la estación SFS (San Fernando) de la red sísmológica WM. Se observa la cabecera del fichero, las muestras de cada componente y su datación.

## Módulo de streaming de datos. PiEEWS-STRM

El nombre del módulo (STRM) proviene de la abreviatura de «Streaming» (transmisión en español) unida a la «M» de «Module».

Este utiliza como entrada los datos de movimiento del suelo a tiempo real que ofrece la interfaz del módulo de adquisición PiEEWS-ACQM. A continuación codifica los datos en formato JSON siguiendo una plantilla diseñada exclusivamente para el prototipo (*Tabla 5.14*). Por último, transmite el paquete JSON mediante un publicador ZMQ.

Cualquier cliente puede suscribirse al publicador si lo desea para obtener el flujo de datos que el prototipo Pi-EEWS está adquiriendo a tiempo real, para operar sobre ellos, plasmarlos en una gráfica, etc.

Este módulo se encuentra completamente desarrollado y depurado. Como el proyecto es un prototipo, no se descartan cambios futuros en el formato JSON diseñado para las muestras y en la forma de transmisión a tiempo real.

```
{ "Pi-EEWSv1" :  
  {  
    "DataStreaming" :  
      [  
        {  
          "Station": "SFS", "DayTime": "2016/05/26", "QT": 1,  
          "Dating" : "135606.900", "HLZ":512, "HLN": -760,  
          "HLE": -2560  
        }  
      ]  
    }  
  }  
}
```

Tabla 5.14: Ejemplo real de un paquete JSON enviado por el módulo PiEEWS-STRM el día 26/05/2016 a las 13:56:06.900 horas (UTC). Se ha utilizado la plantilla de la primera versión (y actual) del formato diseñado. A partir de esta plantilla, los clientes que escuchen del publicador pueden recomponer los datos para utilizarlos.

## Integración con SAST regionales. Ringserver.

Uno de los requisitos del proyecto es ofrecer compatibilidad con los sistemas de alerta sísmica regionales como ALERTES-SC3, para que puedan integrar el prototipo Pi-EEWS como una estación sísmica más (en este caso, perteneciente a la autodenominada red PiEEWSv1).

Para ello, una de las opciones es empaquetar la información sísmica recogida por nuestro prototipo en paquetes de datos Mini-SEED, y hacer uso de un servidor SeedLink para su transmisión. Este proceso se realizaría a tiempo real y de forma paralela al resto de funcionalidades del software PiEEWS-SW. La tarea del empaquetado la realizaría el módulo BCKM.

Ringserver es un software desarrollado y mantenido por IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) DMC (Data Management Center), que integra un servidor SeedLink junto a un buffer circular [26]. Este software automatiza el proceso de transmisión de datos Mini-SEED a tiempo real, y es objetivo del proyecto integrarlo en el prototipo Pi-EEWS.

Es necesario mencionar que el módulo que conformaría este software para la compatibilidad con SAST regionales, se encuentra actualmente en desarrollo, debido a la complejidad que está presentando la integración eficiente de Ringserver en el sistema.

## Sistema de logs automáticos

Aunque el sistema de logs automáticos no funciona de forma independiente como módulo demonio, es necesario explicarlo por su gran utilidad en la arquitectura desarrollada y durante el proceso de depuración del software.

Cada módulo del software PiEEWS-SW crea una instancia del sistema de logs. Esta instancia de forma automatizada monitorizará el módulo pertinente, y almacenará en ficheros rotatorios (*Figura 5.22*) toda la información que el módulo está ofreciendo.

Asimismo, también tiene implementada la opción de enviar alertas e información mediante correo electrónico haciendo uso del protocolo SMTP (Simple Mail Transfer Protocol). Esta información incluye detección de picks, análisis de ondas P, las propias alertas sísmicas tempranas, caídas del software, errores, pérdida de señal GPS o alimentación, etc.

Gracias a este sistema de logs automáticos se han podido corregir muchos errores del sistema (software y hardware), permitiendo una depuración rápida y ágil del prototipo.

El sistema se encuentra implementado y depurado, aunque se plantea como proyecto futuro la ampliación de sus funcionalidades. Entre las propuestas, se encuentra el añadido de módulos software que permitan la difusión de eventos en diversos medios de comunicación mediante RSS (Really Simple Syndication), así como la publicación de los mismos en redes sociales, etc.

```
PiEEWS@Pi-EEWSv1 ~/PiEEWS_PyCharm_Working/log/HWCM $ tail PiEEWS.Hardware_Control_Module_log
2016-06-01 12:32:37,807 - PiEEWS HWCM - WARNING - Main power supply FAIL !!
2016-06-01 12:32:58,045 - PiEEWS HWCM - INFO - Main power supply OK !!
2016-06-01 18:29:57,319 - PiEEWS HWCM - INFO - Starting module...
2016-06-01 18:30:02,333 - PiEEWS HWCM - INFO - Module started!
2016-06-01 18:30:02,335 - PiEEWS HWCM - INFO - Deploying server...
2016-06-01 18:30:02,346 - PiEEWS HWCM - INFO - Server deployed!
2016-06-01 18:30:02,347 - PiEEWS HWCM - INFO - Waiting ACQM status...
2016-06-01 18:30:02,443 - PiEEWS HWCM - INFO - Internet connection OK !!
2016-06-01 18:30:02,444 - PiEEWS HWCM - INFO - Emergency host connection OK !!
2016-06-01 18:30:02,445 - PiEEWS HWCM - INFO - Main power supply OK !!
```

Figura 5.22: Fichero de logs del módulo PiEEWS-HWCM del día 01/06/2016. Podemos observar información durante el despliegue del sistema (INFO), así como un evento de pérdida de la fuente de alimentación principal (WARNING).

### 5.2.3. Cliente de visualización gráfica

Como software independiente a PiEEWS-SW y haciendo uso de la librería **PyQtGraph** para la creación de gráficas e interfaces para aplicaciones científicas, se ha implementado un cliente multifuncional para la visualización de los datos en diversos modos gráficos de representación, como continuo, deslizante, acumulativo, etc. El cliente desarrollado ha sido bautizado como **PiEEWS-RTStreamingClient**.

Una de las funciones implementadas más relevantes es la visualización de datos a tiempo real. El cliente obtiene los datos de movimiento del suelo en formato JSON del publicador ZMQ desplegado por el módulo PiEEWS-STRM, los interpreta, y los dibuja en gráficas interactivas. Así mismo, el cliente también escucha al publicador de alertas. En el caso de que se produzca un pick, y se genere una alerta, el cliente recibirá el paquete correspondiente y dibujará en la gráfica una línea vertical en el momento de detección de la onda *Figura 5.23*.

Este cliente ha sido muy útil durante la realización del proyecto, permitiéndonos observar de forma gráfica e intuitiva la evolución de las distintas señales y métricas tratadas, agilizando el proceso de búsqueda y depuración de errores. Como proyecto de futuro queda la mejora y ampliación del cliente con nuevas funcionalidades.

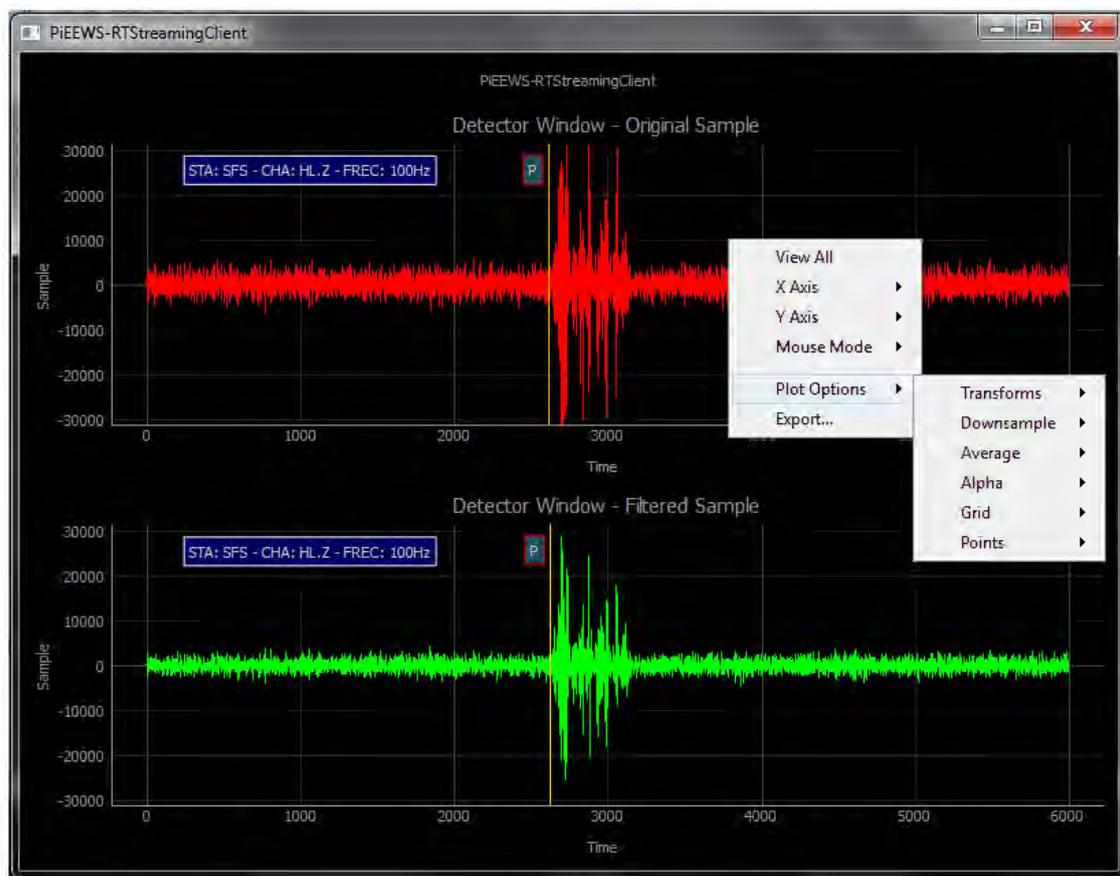


Figura 5.23: Podemos observar el cliente de visualización gráfica adquiriendo datos a tiempo real del canal HLZ durante el periodo de pruebas del prototipo en la estación SFS de la red WM. Observamos también alguna de las opciones incorporadas en el visor. Se ha forzado la aparición de un pick mediante la aplicación de vibraciones cercanas al módulo de instrumentación.

### 5.2.4. Ventajas del sistema software

La arquitectura lógica seguida para la realización del prototipo a partir del análisis de requisitos software ofrecen una serie de ventajas. En la *Tabla 5.15* se destacan y explican algunas de las ventajas más significativas.

---

#### Ventajas del sistema software

---

- **Fiabilidad.** Se han realizado pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de la arquitectura lógica. Las pruebas con formas de onda reales mediante simulación han sido satisfactorias.
  - **Robustez.** La arquitectura lógica reacciona correctamente a situaciones inesperadas, evitando la inoperatividad del sistema. En caso de pérdida de la señal GPS, el sistema software sigue funcionando a partir del RTC. El sistema de backups continuos previene la pérdida de datos.
  - **Eficiencia.** La arquitectura lógica se ha dividido en módulos que son implementados como procesos demonio, facilitando así la paralelización de los mismos y disminuyendo los recursos consumidos.
  - **Comprensibilidad.** Se ha seguido la guía de estilo PEP8 para implementación de código en Python, con el objetivo de obtener un código legible y auto-decriptivo que facilite su comprensibilidad. Los comentarios y la documentación adjunta facilitan igualmente la comprensibilidad
  - **Mantenibilidad.** La arquitectura lógica facilita su mantenimiento al estar dividida en módulos más simples y fáciles de entender. El sistema de logs automáticos permite conocer el estado del sistema en todo momento, facilitando la detección y solución de situaciones problemáticas. La alta cohesión y el bajo acoplamiento del software, así como la ya descrita comprensibilidad, facilita igualmente la mantenibilidad.
  - **Escalabilidad.** El diseño modular de la arquitectura seguida permite la inclusión de funcionalidades futuras en el sistema (como nuevos módulos de detección o análisis) mediante la creación de módulos adicionales.
  - **Adaptabilidad:** El software como sistema de alerta sísmica temprana local es configurable y adaptable a entornos y localizaciones diversas.
- 

Tabla 5.15: Algunas de las ventajas que presenta la arquitectura lógica seguida.

## 6. Análisis de resultados

Durante los meses de desarrollo del prototipo Pi-EEWS, desde la concesión de la beca hasta el momento de escribir estas líneas, se han podido estudiar los diversos resultados que se estaban obteniendo. Además, también se han estudiado los resultados obtenidos durante el periodo de pruebas a tiempo real (que aún continúa). Todos estos resultados se pueden analizar desde dos perspectivas, hardware y software.

Como se ha mencionado anteriormente, gracias al sistema de logs implementado y al cliente para visualizar de forma gráfica la adquisición a tiempo real, se optimizó el análisis de resultados y el proceso de depuración del sistema, permitiendo la detección rápida de errores en tiempo de simulación y en tiempo real, y así poder trabajar en la mejora del prototipo.

### 6.1. Periodo de pruebas a tiempo real

Una vez finalizado el desarrollo hardware del prototipo, así como la implementación software básica del sistema de alerta sísmica temprana local PiEEWS-SW, se procedió a iniciar la fase correspondiente al periodo de pruebas a tiempo real del prototipo, para la obtención de resultados sobre el funcionamiento continuo del sistema.

En el momento de escribir estas líneas, el prototipo se encuentra ubicado en la estación **SFS**, perteneciente a la red sísmológica Western Mediterranean (WM) y localizada en el Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, Cádiz.

Para la comparativa con los datos ofrecidos por el SAST regional ALERTES-SC3 y los sensores de la estación, cercano al módulo de instrumentación de nuestro sistema, se encuentra un sismómetro de altas prestaciones y banda ancha STS-2.5 (*Figura 6.2*), y un acelerómetro Force Balance Model FBA ES-T 10.0 V/g (*Figura 6.1*).

Una vez finalizado el actual periodo de pruebas a tiempo real en la estación SFS, y confirmado el correcto funcionamiento continuo del prototipo Pi-EEWS a tiempo real, se pretende efectuar su traslado a una ubicación más propicia para el análisis de eventos y así continuar el desarrollo software del sistema. Se barajan actualmente las estaciones EMAL (Málaga) y MELI (Melilla), ambas pertenecientes a la red WM, por su ubicación cercana a los epicentros de muchos de los eventos acontecidos durante los últimos años, por la claridad de los datos que en las mencionadas estaciones se recogen, y por poseer una instalación ADSL.

Actualmente, gracias a este periodo de pruebas, se está realizando una comparativa eficaz entre los tiempos de detección de ondas P y generación de alertas tempranas medidos en el SAST regional ALERTES-SC3, en SAST locales basados en Mini-SEED, y en el prototipo desarrollado Pi-EEWS. Esta comparativa confirmaría la eficiencia del prototipo en cuanto a la velocidad de respuesta respecto a los SAST tradicionales regionales y locales.



Figura 6.1: A la izquierda, el módulo de telemetría junto a un acelerómetro del Instituto Geográfico Nacional (IGN), ubicado en la estación SFS (San Fernando) de la red WM. A la derecha, perspectiva de uno de los pasillos de la estación con el prototipo Pi-EEWS al fondo.

## 6.2. Perspectiva hardware

Desde esta perspectiva, Pi-EEWS es un prototipo hardware para la adquisición de datos de movimiento del suelo a tiempo real compuesto de un ordenador de placa reducida, sensores y envoltentes físicos, entre otros componentes hardware.

El desarrollo hardware y el ensamblaje del prototipo se encuentra finalizado, y se han realizado sobre este diversas pruebas para garantizar los requisitos propiamente hardware, y el funcionamiento del sistema desde el punto de vista más cercano a esta perspectiva.

Se ha comprobado la robustez del prototipo a partir de los test de alimentación realizados, en los que se ha sometido al hardware a caídas y subidas de tensión procedentes de la fuente de alimentación principal. El sistema ha respondido satisfactoriamente, activando el sistema de alimentación supletorio (a partir de la batería interna) y regulando la corriente cuando era necesario. Además, en los casos de apagado total del sistema, el reloj a tiempo real del módulo GPS mantenía la hora del sistema actualizada. Además, durante el periodo de pruebas a tiempo real en la estación SFS, la adquisición de datos no se ha interrumpido incluso habiéndose producido cortes de luz.

También se ha comprobado la fiabilidad del sistema hardware. Para ello se ha verificado el correcto diseño y fabricación de las placas de circuito impreso, así como el correcto funcionamiento de las interfaces externas mediante la conexión de dispositivos al sistema. Además, se ha comprobado la no entrada de polvo y agua al interior de las cajas envoltentes, y al interior de las mangueras de cableado.

Se ha comprobado la operabilidad y portabilidad del sistema mediante el transporte del prototipo y posterior montaje en diversas localizaciones a lo largo del desarrollo del proyecto.

Durante las pruebas del sistema además, han surgido diversos problemas técnicos como roturas internas de cables o soldaduras mal realizadas que han necesitado de mantenimiento. La rápida solución a estos inconvenientes han verificado la mantenibilidad del prototipo.

Por último, en el momento de escribir estas líneas, se está experimentando la escalabilidad del sistema. Para ello, se está intentando conectar un sismómetro STS-2.5 al prototipo Pi-EEWS, con el objetivo de intentar adquirir no solo datos ofrecidos por el módulo inercial LSM6DS0, sino también datos procedentes de sensores de banda ancha de alto rendimiento, para el análisis de eventos producidos en cualquier parte del mundo haciendo uso de nuestro sistema, y para facilitar la comparativa de datos con los ofrecidos por el SAST regional ALERTES-SC3.

### 6.3. Perspectiva software

Desde esta perspectiva, Pi-EEWS es un prototipo software para la alerta sísmica temprana local que permite lanzar alertas «in situ» de la forma más rápida posible, que es analizando los datos de movimiento del suelo a tiempo real en bruto, es decir, sin empaquetado previo.

El desarrollo software del prototipo aún se encuentra en fase de implementación, aunque los módulos encargados de las funcionalidades básicas del sistema de alerta sísmica temprana local se encuentran desarrollados.

Tras ser efectuadas las pruebas unitarias y de integración sobre los módulos finalizados del software Pi-EEWS-SW, se realizaron pruebas funcionales cuyos resultados confirmaron la eficacia del software.

La fiabilidad del sistema de picado a sido verificada mediante simulación con formas de onda sintéticas y reales (correspondientes a eventos ocurridos en la Península). También se ha verificado el correcto funcionamiento del módulo mediante pruebas a tiempo real, forzando vibraciones cercanas al envolvente del módulo inercial (*Figura 5.23*).

La fiabilidad del sistema de análisis, por otra parte, ha sido verificado mediante análisis simulados de formas de onda correspondiente a diversos seísmos ocurridos en la Península en el año 2015 (*Figura 6.2*). Sin embargo, desde el inicio de las pruebas a tiempo real hasta el momento, no ha acontecido ningún evento de magnitud considerable cercano a la estación SFS que pudiera ser detectado por el prototipo Pi-EEWS ni por el SAST regional ALERTES-SC3.

La robustez del software ha sido verificada durante el periodo de pruebas a tiempo real, en el que se han producido, caídas de la red y pérdidas de la señal GPS. Durante estas pérdidas de señal, el sistema continuaba funcionando a partir del reloj a tiempo real. También se ha verificado el funcionamiento del sistema de persistencia, el cual genera correctamente los ficheros con los datos de movimiento del suelo almacenados (*Figura 5.21*).

La escalabilidad del software PiEEWS-SW implementado está siendo verificada actualmente, mediante el desarrollo e integración en el software de un nuevo controlador de dispositivo que permita la conexión de un sismómetro STS-2.5 al prototipo (*Figura 6.2*), y de nuevos módulos de análisis adaptados a este sensor de banda ancha.

La adaptabilidad del sistema a diversos entornos y localizaciones se ha comprobado mediante el añadido y modificación de diversos ficheros de configuración. Entre los parámetros configurables que se han probado, se encuentran el umbral SNR (por defecto a 10), el factor multiplicador de la métrica del detector (por defecto a 5), el orden y frecuencias de corte de los filtros utilizados, etc.

Por último, se ha verificado la eficiencia del sistema mediante simulaciones y también durante las pruebas a tiempo real, produciendo vibraciones cercanas al envolvente del módulo inercial. El tiempo necesario para lanzar una alerta temprana desde la detección del pick es constante, y corresponde precisamente a la ventana de tiempo utilizada para el análisis de ondas P (en nuestro caso, 3 segundos [5][7]). Este tiempo se contrasta con el estudio de latencias realizado en el capítulo *Motivación*, concluyendo que el prototipo puede emitir las alertas tempranas en un tiempo considerablemente inferior al que necesita el SAST regional ALERTES-SC3. Sin embargo, seguimos a la espera de resultados a tiempo real que sean generados por eventos reales y no por vibraciones generadas artificialmente.

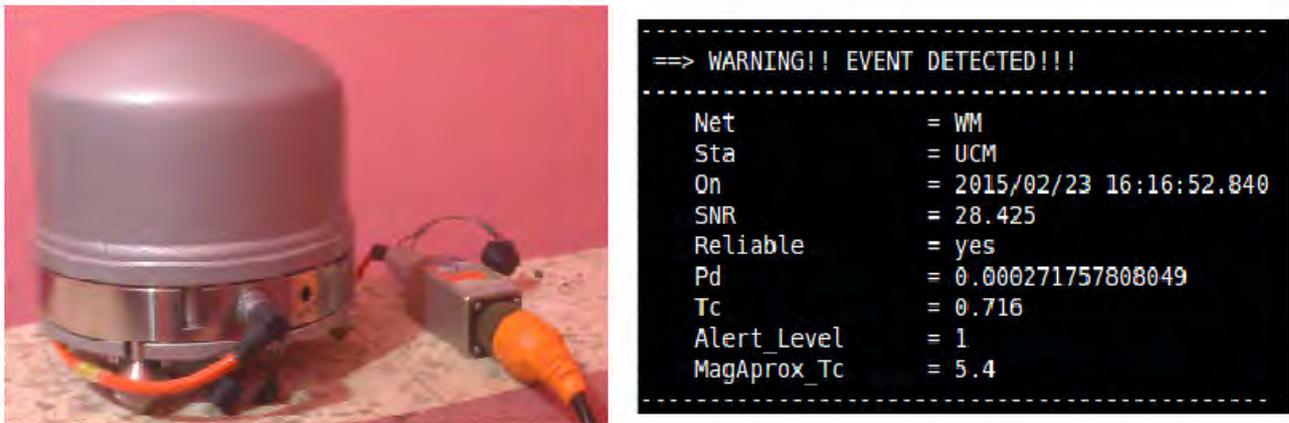


Figura 6.2: A la izquierda sismómetro STS-2.5 ubicado en la estación SFS. A la derecha, mensaje de alerta sísmica temprana mostrada por una terminal conectada a la interfaz del módulo PiEEWS-SWCM. Se ha simulado mediante el análisis de la forma de onda de la componente de datos HHZ de la estación UCM (Universidad Complutense de Madrid, Madrid) perteneciente a la red WM, del día 23 de febrero de 2015. La alerta corresponde a la detección del evento de magnitud real 5,2 acontecido esa fecha en Albacete

## 7. Conclusiones

Al haber llevado a cabo el desarrollo y comprobación del funcionamiento de un prototipo hardware para la alerta sísmica temprana local bautizado finalmente como Pi-EEWS, se concluye lo siguiente:

- El prototipo Pi-EEWS, en su conjunto, ha sido desarrollado como un sistema de alerta sísmica temprana (SAST) local con la capacidad integrada de adquisición y análisis de datos de movimiento del suelo en bruto, capaz de lanzar alertas locales rápidas a partir de los primeros segundos de la onda P haciendo meramente uso de los datos locales, necesitando para ello no más de 3 segundos desde el momento de llegada de la onda al módulo de instrumentación del prototipo.
- El prototipo elimina las latencias y retardos que se producen en los SAST locales tradicionales y regionales por el uso de los paquetes de datos Mini-SEED. Además, elimina el tiempo de transmisión de los datos de movimiento del suelo al computador del SAST regional. Por ello, este sistema ofrece alertas sísmicas tempranas en un tiempo menor al que necesita un SAST tradicional.
- Por lo anterior y por la futura compatibilidad con los SAST tradicionales, el prototipo sería adecuado como sistema complementario a estos, paliando las limitaciones que presentan y permitiendo la densificación de las estaciones sismológicas, reduciendo de esta forma las denominadas zonas ciegas.
- El sistema software desarrollado PiEEWS-SW, aún en fase de implementación, funciona de forma independiente a los SAST tradicionales, aportando detecciones, análisis y resultados fiables en muchos casos. Es por ello que el prototipo continuará en fase de pruebas «in situ» a tiempo real en las estaciones de la red Western Mediterranean (WM). Los resultados a medio plazo ayudarán a la modificación, actualización y mejora del prototipo.
- El umbral SNR que se establezca afecta considerablemente a los resultados del sistema, y es necesario determinarlo previo estudio para cada localización en la que el prototipo se ubique, para garantizar resultados y alertas fiables.
- El descarte por parte del sistema de alertas de picks cuyo análisis determina una SNR por debajo del umbral establecido para cada estación, no afecta a la utilidad de alerta temprana del software, al ser estas detecciones debidas a ruido o a sismos de pequeña magnitud que no suponen una amenaza local.
- El coste y disponibilidad de los componentes hardware del prototipo lo hace asequible, permitiendo a instituciones hacer uso del sistema para así proteger infraestructuras críticas, realizar estudios sismológicos, etc.
- La línea de investigación referente al uso del prototipo junto a sensores de alto rendimiento de banda ancha, asegurarían la utilidad científica del sistema, permitiendo la generación rápida de alertas tempranas asociadas a sismos de cualquier parte del mundo.

- La comprensibilidad y escalabilidad del software desarrollado permite que sea usado como plataforma de uso científico para desarrollar y probar nuevos algoritmos de detección y análisis (entre otros) de forma ágil y eficaz, sin precisar para ello de conocimientos avanzados en programación.
- Se continuará con el desarrollo e implementación del software PiEEWS-SW, priorizando la finalización del módulo Ringserver para así garantizar la compatibilidad del prototipo con los SAST tradicionales. Se continuará con la implementación de un sistema de repicado basado en el algoritmo de Lomax, y seguidamente con el resto de módulos que aún no se han completado. Así mismo, en un futuro se continuará con el añadido de nuevas funcionalidades que se están planteando.
- Se continúa a la espera de que el sistema detecte un sismo de magnitud considerable cercano a la localización del prototipo, y que además también sea detectado por el SAST regional ALERTES-SC3, para de esta forma garantizar la eficiencia de lo propuesto, y realizar modificaciones y ajustes en caso necesario.

En resumen, Pi-EEWS, prototipo hardware para la alerta sísmica temprana local, **complementa a los sistemas SAST tradicionales** permitiendo **reducir las zonas ciegas** ofreciendo alertas sísmicas tempranas locales en tiempo real necesitando para ello tan solo el tiempo de duración de la ventana para el análisis de la onda P, mejorando el funcionamiento global de los sistemas de alerta sísmica temprana. Además, su futura compatibilidad con los SAST tradicionales y sensores de banda ancha asegurarán su **utilidad científica**. Por último gracias a su asequibilidad, el prototipo puede ser adquirido por instituciones para **proteger infraestructuras críticas**, entre otros posibles usos futuros.



Figura 7.1: Asegurar la protección de vidas humanas y de infraestructuras críticas, como lo son colegios, aeropuertos, refinерías, hospitales, redes ferroviarias o plataformas petrolíferas, forma parte fundamental de la motivación por la que se ha realizado este proyecto.

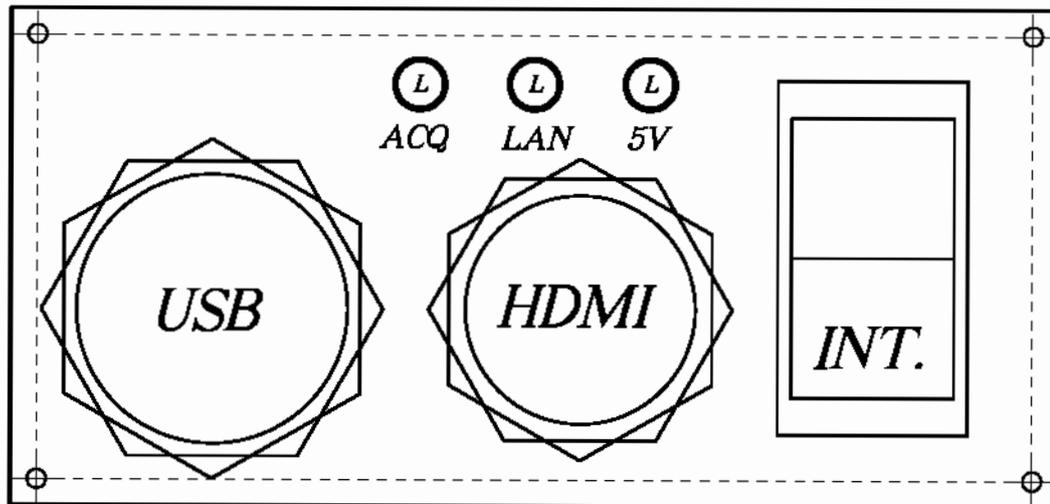
# EPÍLOGO

## A. Planos de fabricación, desarrollo y montaje de aparamenta

En este anexo se incluyen los diversos esquemas y planos de los componentes hardware del prototipo Pi-EEWS referente a las envolventes.

### Listado de planos:

1. Elementos en placa delantera caja del computador
2. Elementos en placa trasera caja del computador
3. Elementos en placa delantera caja de instrumentación
4. Taladros en placa delantera caja del computador
5. Taladros en placa trasera caja del computador
6. Conector HDMI – Interruptor KR
7. Conector 12 V – Conector RJ45
8. Conector USB – Indicadores LEDS
9. Conector ACEL – Conector GPS
10. Conector ACEL – Conector GPS
11. Serigrafiado elementos placa delantera del computador
12. Serigrafiado elementos palca trasera del computador
13. Serigrafiado elementos placa delantera caja de instrumentación
14. Base de apoyo nivelable de la caja de instrumentación
15. Abrazadera de sujeción de la caja a la base nivelable
16. Esquema de conexionado



**ELEMENTOS EN PLACA DELANTERA  
CAJA DEL COMPUTADOR**

ESCALA 1:1



Ángel Vera Herrera  
In colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Ángel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

COMPROBADO:

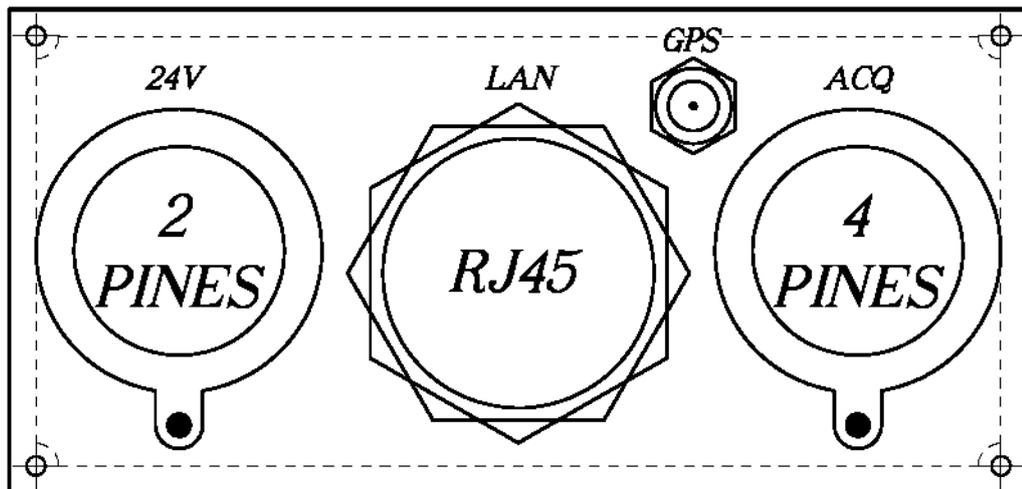
ESCALA: 1:1

**PLACA  
DELANTERA**

PLANO N°

**01**

FECHA: MAYO DE 2018



**ELEMENTOS EN PLACA TRASERA  
CAJA DEL COMPUTADOR**

ESCALA 1:1



Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Angel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

COMPROBADO:

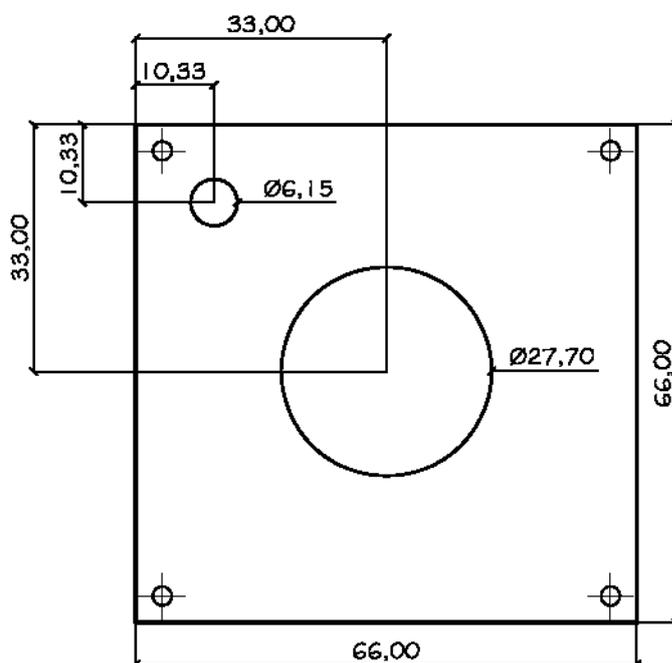
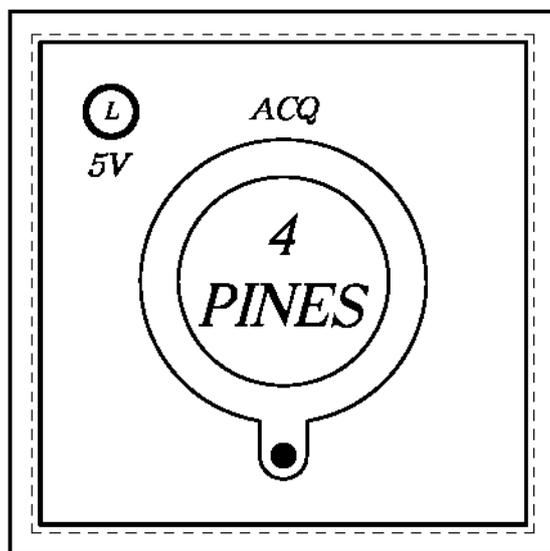
ESCALA: 1:1

**PLACA  
TRASERA**

PLANO N°

FECHA: MAYO DE 2018

**02**



**ELEMENTOS EN PLACA DELANTERA  
CAJA DE INSTRUMENTACION**

ESCALA 1:1



Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Angel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

COMPROBADO:

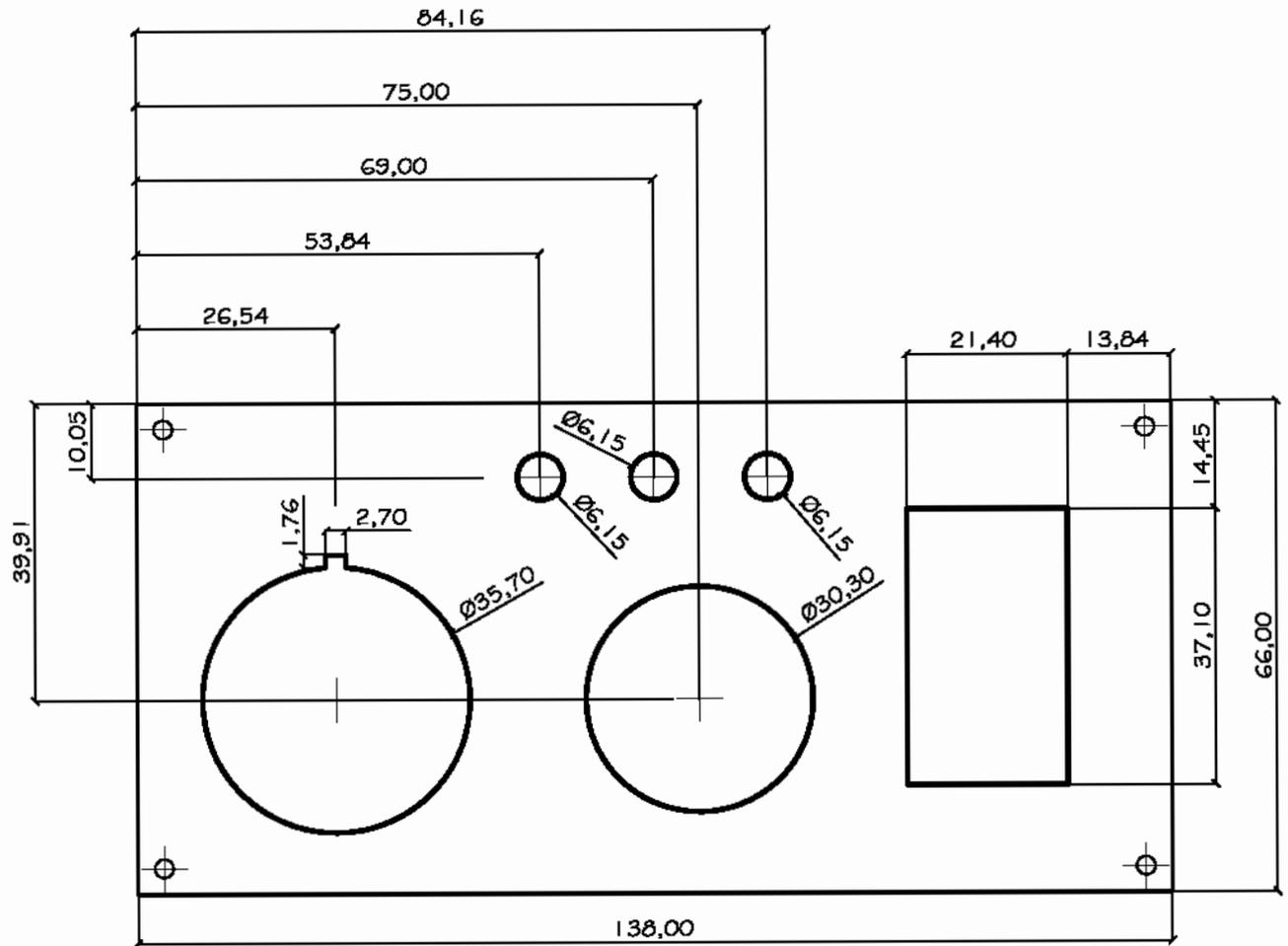
ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2018

**PLACA  
DELANTERA**

PLANO N°

**03**



**TALADROS EN PLACA DELANTERA  
CAJA DEL COMPUTADOR**  
ESCALA 1:1



Ángel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Ángel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

COMPROBADO:

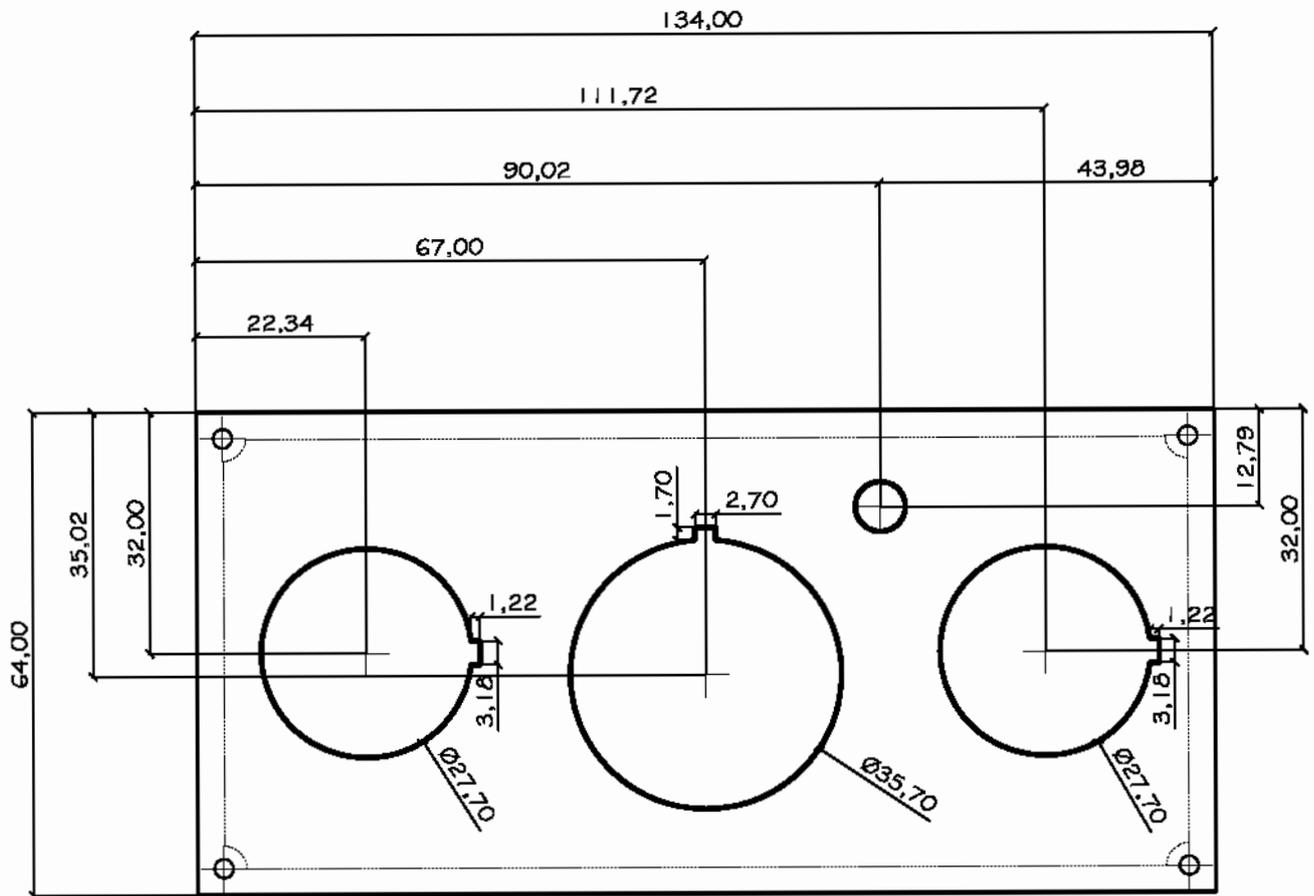
ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2018

**TALADROS EN  
PLACA  
DELANTERA**

PLANO Nº

**04**



**TALADROS EN PLACA TRASERA  
CAJA DEL COMPUTADOR  
ESCALA 1:1**



Ángel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Ángel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

COMPROBADO:

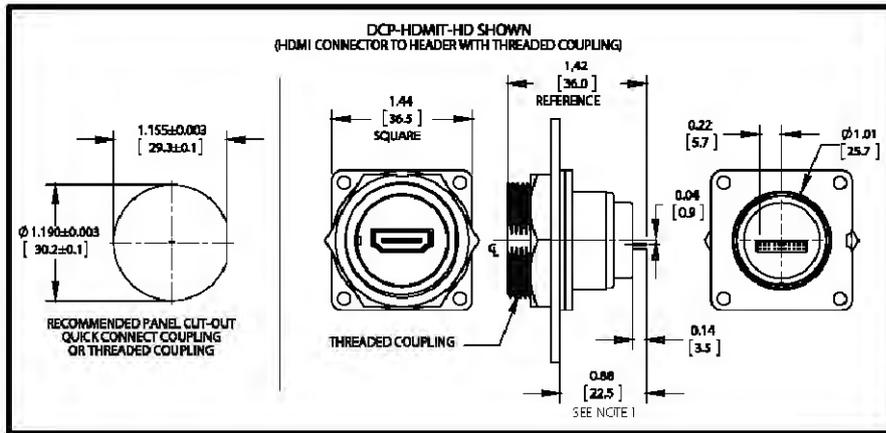
ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2018

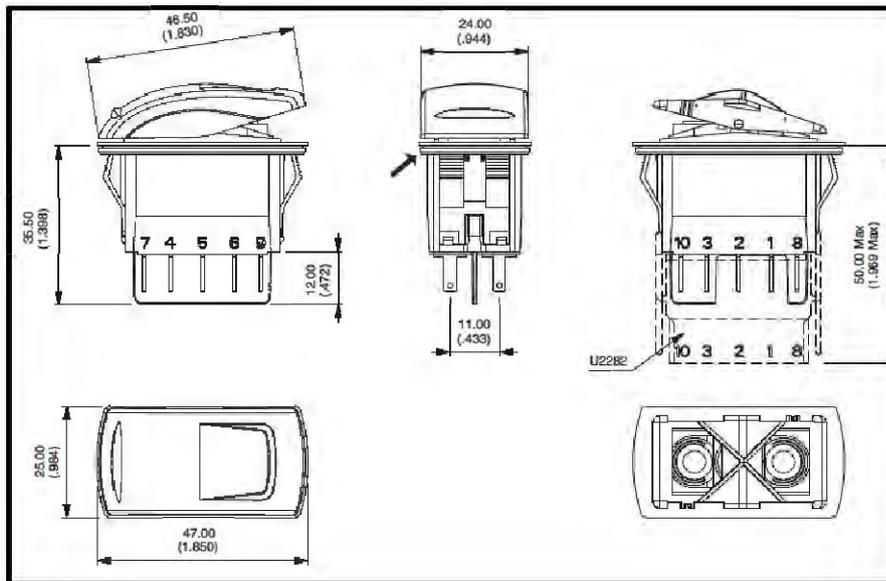
**TALADROS EN  
PLACA  
DELANTERA**

PLANO Nº

**05**



**HDMI**



**INT**



Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**  
**PI-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Ángel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

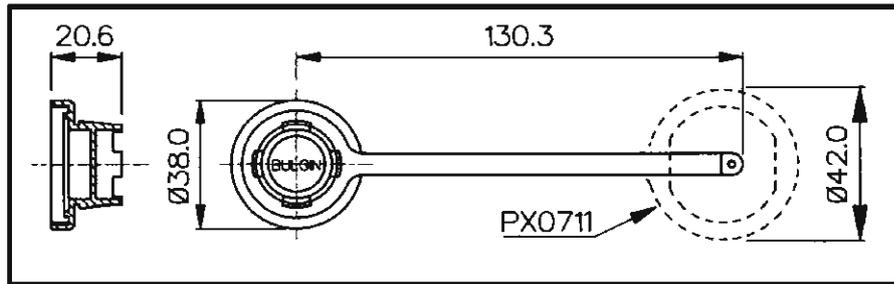
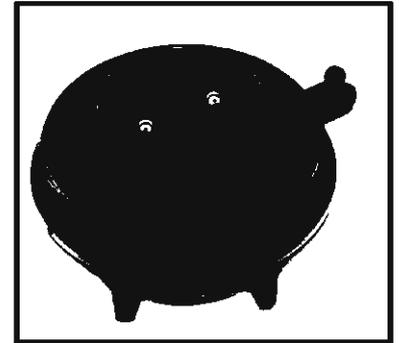
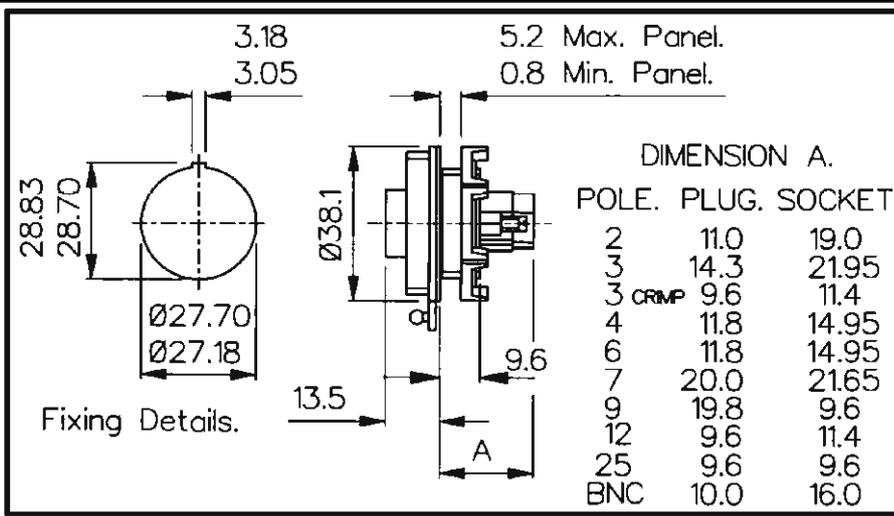
COMPROBADO:

**CONECTOR HDMI  
INTERRUPTOR KR**

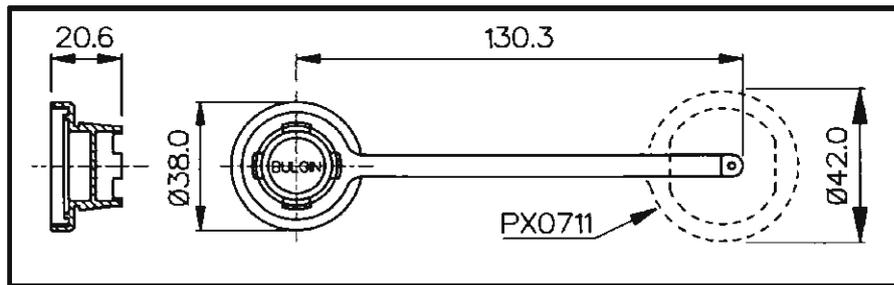
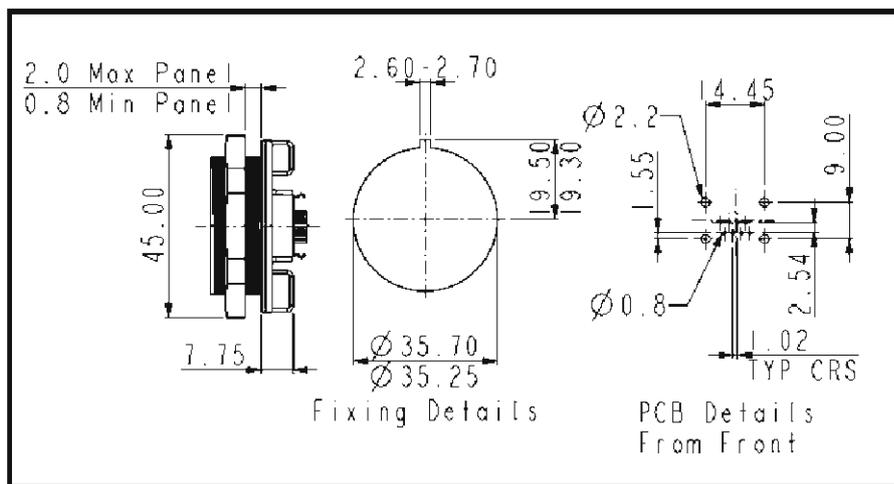
PLANO N°  
**06**

ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2016



12V



RJ45



Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Ángel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

COMPROBADO:

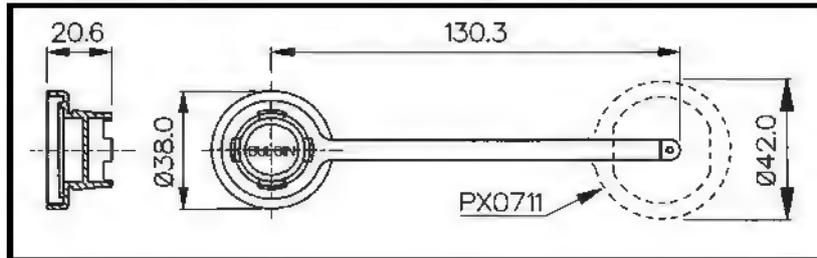
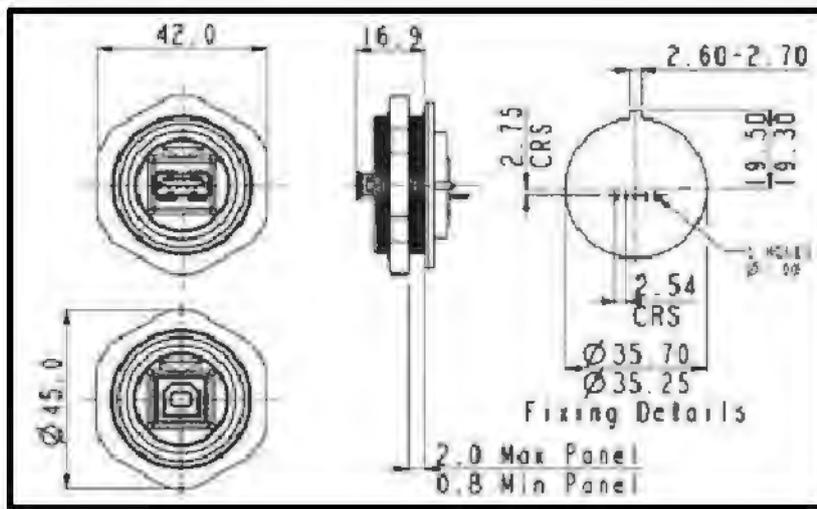
ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2016

**CONECTOR 12V  
CONECTOR RJ45**

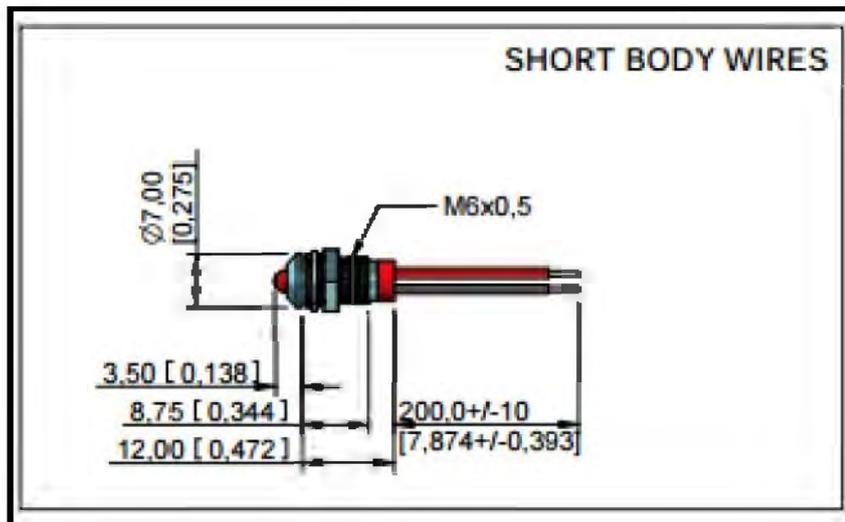
PLANO N°

**07**



**USB**

**Leds**



**GPS  
ACEL**

**LAN**

**5V**



Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Angel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

COMPROBADO:

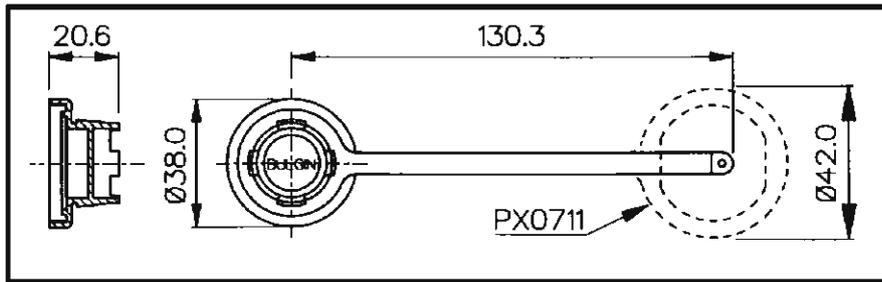
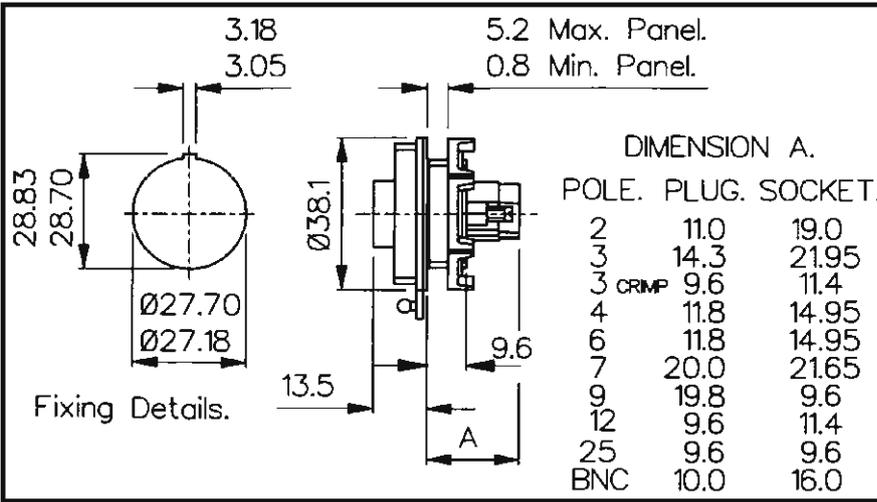
ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2016

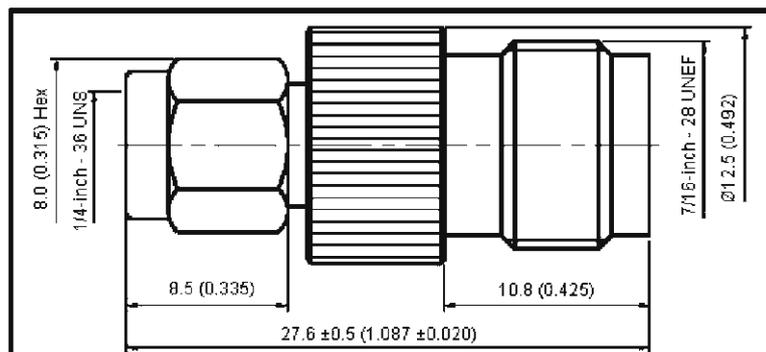
**CONECTOR USB  
INDICADORES LEDS**

PLANO N°

**08**



ACC



Dimensions : Millimetres (Inches)

**Specifications:**

**Electrical:**

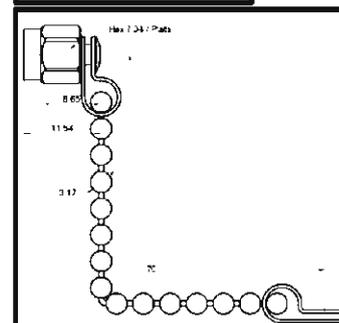
- Frequency Range : 11 GHz.
- Nominal Impedance : 50 ohms.
- Maximum Working Voltage : 500V
- Proof Voltage : 1000V
- Maximum VSWR : 1.12 at 3 GHz.
- : 1.16 at 11 GHz.

**Materials:**

- Bodies : Brass per JIS-C3604.
- Centre Contact : Beryllium copper per ASTM B196 UNS C17300
- Insulation : PTFE per ASTM D1457 and ASTM D1710.

**Mechanical:**

- Interface in accordance with : MIL-STD-348A.



GPS



Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Ángel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

COMPROBADO:

ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2016

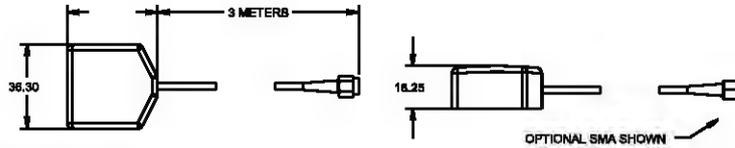
*CONECTOR ACEL  
CONECTOR GPS*

PLANO N°

*09*

## Mechanical Specifications

Parameter	Design Specifications
RF connector	SMA, TNC, or other
Cable	RG174 / 3 meters or other
Antenna weight	70 grams (max)



dimensions are in mm

## Electrical Specifications

Parameter	Design Specifications
Frequency	1575.42 MHz
Polarization	RHCP
DC voltage	2.5 to 5 V
DC current	6.6 mA
Bandwidth (-1dB)	5 MHz
Total system peak gain	28 dBic @ 2.5 V / 30 dBic @ 5 V
Axial ratio	2.5 dB (min)
VSWR	2 (max)
Impedance	50 Ohm
Operating temp.	from -40°C to 85°C



**ANTENA GPS**



Ángel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

## PROYECTO DE:

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Ángel Vera Herrera

PETICIONARIO: *FUNDACION ALVARGONZALEZ*

COMPROBADO:

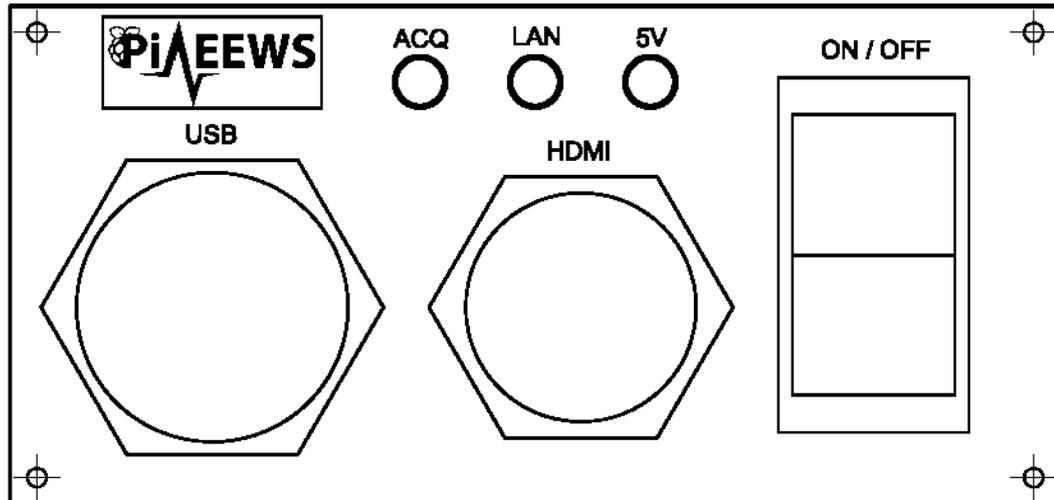
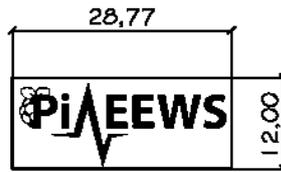
ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2016

PLANO N°

**ANTENA GPS**

**10**



**SERIGRAFIADO ELEMENTOS PLACA  
DELANTERA DEL COMPUTADOR**

ESCALA 1:1



Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Angel Vera Herrera

PETICIONARIO: FUNDACION ALVARGONZALEZ

COMPROBADO:

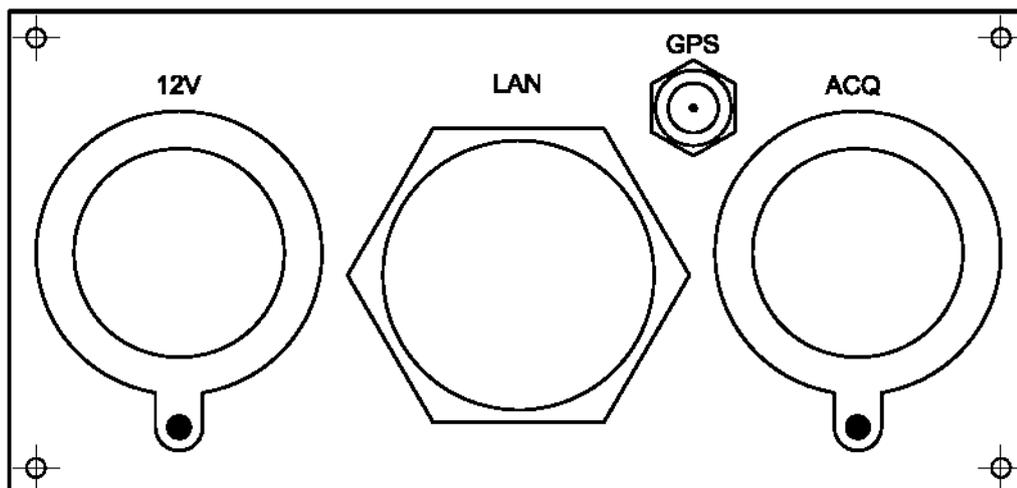
ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2016

**SERIGRAFIADO  
PLACA  
DELANTERA**

PLANO N°

**11**



**SERIGRAFIADO ELEMENTOS PLACA  
TRASERA DEL COMPUTADOR**

ESCALA 1:1



*Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada*

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Angel Vera Herrera

PETICIONARIO: *FUNDACION ALVARGONZALEZ*

COMPROBADO:

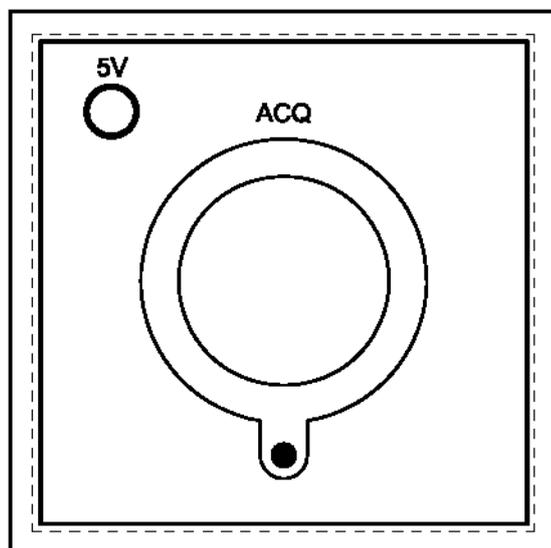
ESCALA: 1:1

FECHA: MAYO DE 2018

**SERIGRAFIADO  
PLACA  
TRASERA**

PLANO N°

**12**



**SERIGRAFIADO ELEMENTOS PLACA  
DELANTERA CAJA DE INSTRUMENTACION**  
ESCALA 1:1



*Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada*

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

**DIBUJADO:** Angel Vera Herrera

**PETICIONARIO:** FUNDACION ALVARGONZALEZ

**COMPROBADO:**

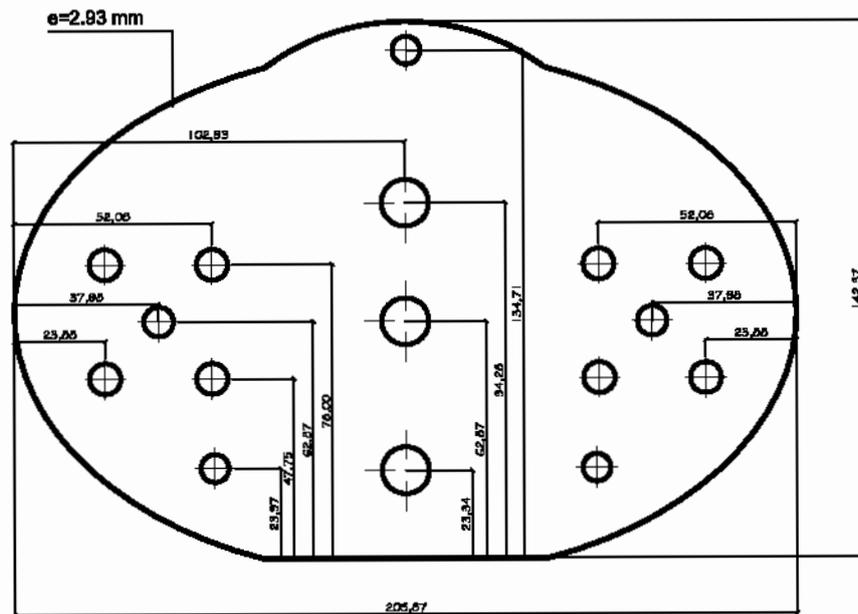
**ESCALA:** 1:1

**FECHA:** MAYO DE 2D18

**SERIGRAFIADO  
PLACA  
DELANTERA**

**PLANO N°**

**13**



***BASE DE APOYO NIVELABLE DE LA  
CAJA DE INSTRUMENTACION***  
 ESCALA 1:2



*Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real Instituto  
y Observatorio de la Armada*

**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
alerta sísmica temprana local**

**DIBUJADO:** Ángel Vera Herrera

**PETICIONARIO:** FUNDACION ALVARGONZALEZ

**COMPROBADO:**

**ESCALA:** 1:2

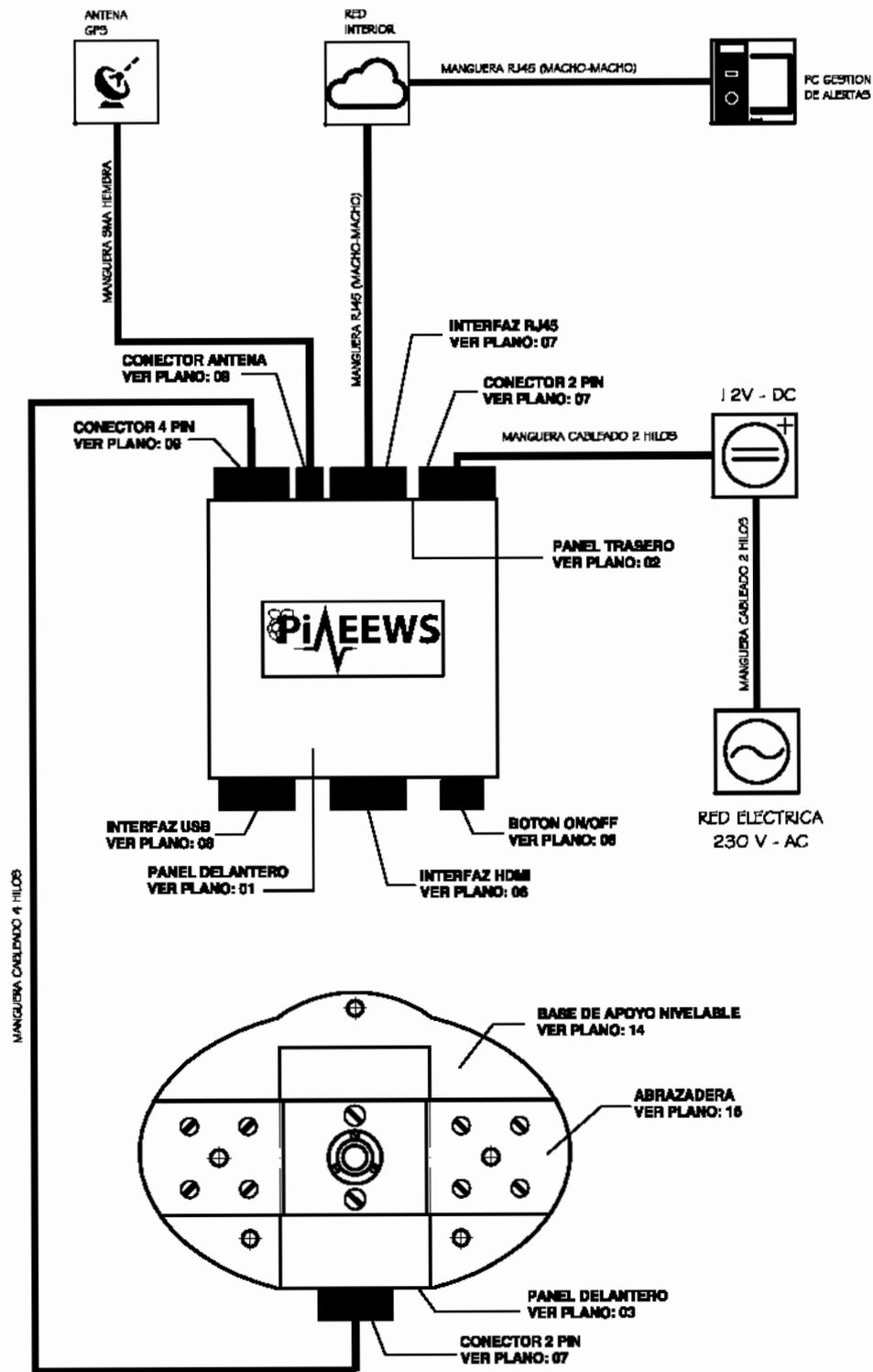
**FECHA:** MAYO DE 2018

***BASE APOYO  
NIVELABLE***

**PLANO N°**

**14**





## ESQUEMA DE CONEXIONADO



Ángel Vera Herrera  
*En colaboración con Real Instituto  
 y Observatorio de la Armada*

## PROYECTO DE:

**Pi-EEWS: Prototipo para la  
 alerta sísmica temprana local**

DIBUJADO: Ángel Vera Herrera

PETICIONARIO: *FUNDACION ALVARGONZALEZ*

COMPROBADO:

ESCALA: S/E

FECHA: MAYO DE 2016

*ESQUEMA DE  
 CONEXIONADO*

PLANO N°

*16*

## B. Diseño de las placas de circuito impreso (PCB)

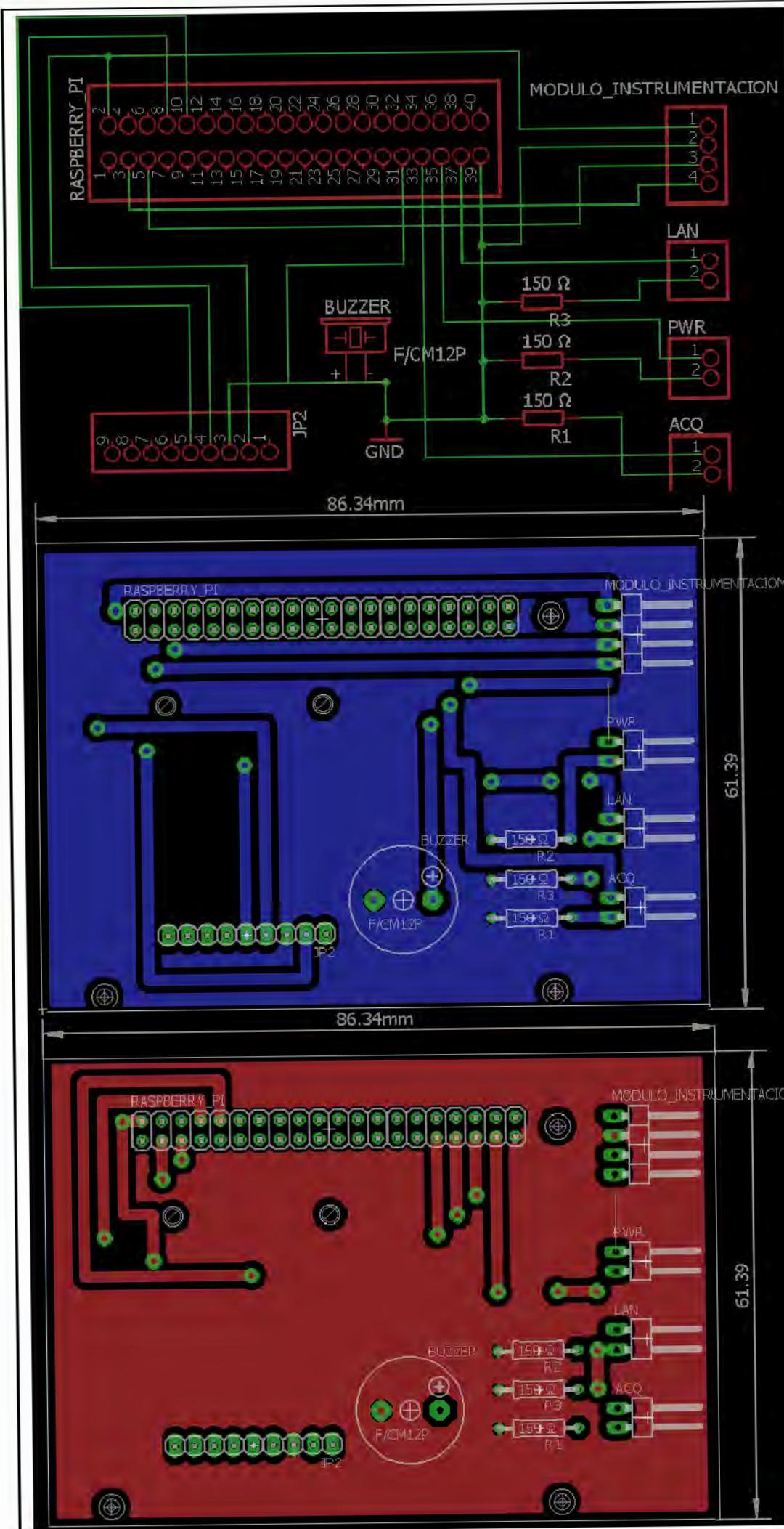
En este anexo se incluyen los diversos esquemas y planos de las placas de circuitería que se han diseñado y fabricado para el prototipo Pi-EEWS.

En la primera página, observamos el diseño (esquemático, capa inferior y capa superior) de la placa de circuito impreso que se encuentra contenida en el módulo principal. Realiza la interconexión del computador Raspberry Pi con el GPS, el zumbador, y los indicadores led y el conector de 4 pines que se encuentran en los paneles del módulo.

En la siguiente página, observamos en la parte superior y el centro el diseño (esquemático y capa superior e inferior) de la placa de circuito impreso que se encuentra contenida en el módulo de instrumentación. En la parte inferior observamos las placas de circuito impreso diseñadas para los conectores de panel. De izquierda a derecha, la PCB para el conector USB, la PCB para el conector RJ45, y la PCB para el conector HDMI.

### Listado de planos:

1. Circuitos impresos 1
2. Circuitos impresos 2



**PROYECTO DE:**

**Pi-EEWS: Prototipo para la alerta sísmica temprana local**

PETICIONARIO: **FUNDACION ALVARGONZALEZ**

PLANO N° **01**

**CIRCUITOS IMPRESOS -I-**

Angel Vera Herrera  
En colaboración con Real  
Instituto y Observatorio  
de la Armada



DIBUJADO: Ángel Vera Herrera

FECHA: MAYO DE 2016



## Bibliografía

- [1] C. Satriano, L. Elia, C. Martino, M. Lancieri, A. Zollo, G. Iannaccone, *PRESTo, the earthquake early warning system for Southern Italy: Concepts, capabilities and future perspectives*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 10.1016/j.soildyn.2010.06.008, 2010.
- [2] A. Pazos, *Estación sísmica digital. Tratamiento digital de señales. Tesis doctoral*. Boletín ROA No.02/2004, 2004.
- [3] M. Carranza, E. Buforn, A. Udías, J. Martín Dávila, A. Pazos, X. Goula, Y. Colom, A. Roca, A. Zollo, L. Lozano, C. Pro, F. Carrilho, W. Hanka, R. Madariaga, M. Bezzeghoud, M. Harnafi, *The ALERT-ES Project: an Earthquake Early Warning System for S. Iberia*, 15 WCEE LISBOA 2012, Septiembre de 2012.
- [4] A. Zollo, O. Amoroso, M. Lancieri, Y-M. Wu, H. Kanamori, *A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks*. Geophysics Journal International, 183 963-974, 2010.
- [5] M. Carranza, *Obtención de parámetros  $P_d$  y  $\tau_c$  para el SW de Iberia*, Septiembre de 2012.
- [6] Y-M. Wu, H. Kanamori, *Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No.1, 347-353, 2005.
- [7] M. López-Mesa, *Alerta Sísmica Temprana con Aplicación Regional*, Boletín ROA No.01/2015, 2015.
- [8] A. Vera-Herrera, DJ. Rosa-Gallardo, J. Alcántara-Muñoz, J. Relinque-Madroñal, A. Pazos, C. Rioja-Del-Río, A. Morgado-Estévez, *Software autónomo basado en el programa autopick de SeisComP para la alerta sísmica temprana mediante análisis de ondas P*, Boletín ROA No.03/2015, 2015.
- [9] *ARMADA ESPAÑOLA. Proyecto ALERT-ES* [en línea].  
www.alertes.roa.es. [Consulta: 26-01-2015]
- [10] *Documentation for SeisComP3* [en línea].  
<https://www.seiscomp3.org/wiki/doc>. [Consulta: 26-03-2015]
- [11] *INCORPORATED RESEARCH INSTITUTIONS FOR SEISMOLOGY. SeedLink* [en línea].  
<http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/services/seedlink/>. [Consulta: 27-03-2015]
- [12] *INCORPORATED RESEARCH INSTITUTIONS FOR SEISMOLOGY. Mini-SEED* [en línea].  
<http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/data/formats/miniseed/>. [Consulta: 27-03-2015]
- [13] A. Pazos, N. Romeu, L. Lozano, Y. Colom, M. López Mesa, X. Goula, J. A. Jara, J. V. Can-

tavella, A. Zollo, W. Hanka, F. Carrilho *A Regional Approach for Earthquake Early Warning in South West Iberia: A Feasibility Study.*, Bulletin of the Seismological Society of America, April 2015 105:560-567; doi:10.1785/0120140101

- [14] A. Savvaidis, C. Papazachos, P. Soupios, O. Galanis, N. Grammalidis, Ch. Saragiotis, L. Hadjileontiadis, S. Panas, *Implementation of Additional Seismological Software for the Determination of Earthquake Parameters Based on MatSeis and an Automatic Phase-detector Algorithm*, Seismological Research Letters, Vol. 73, No. 1, 2002.
- [15] A. Lomax, C. Satriano, M. Vassallo, *Automatic picker developments and optimization: FilterPicker - A robust, broadband picker for real-time seismic monitoring and earthquake early warning*, Seismological Research Letters, Vol. 83, No. 3, 2012.
- [16] M. Vassallo, G. Festa, A. Bobbio, *Seismic Ambient Noise Analysis in Southern Italy*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102, No. 2, pp. 574–586, April 2012, doi: 10.1785/0120110018
- [17] S. Colombelli, O. Amoroso, A. Zollo, H. Kanamori, *Test of a Threshold-Based Earthquake Early Warning Method Using Japanese Data*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102, No. 3, pp. –, Junio 2012, doi: 10.1785/0120110149.
- [18] M. Carranza, E. Buforn, S. Colombelli, A. Zollo, *Earthquake Early Warning for Southern Iberia*, 2013.
- [19] *RASPBERRY Pi FOUNDATION* [en línea].  
<https://www.raspberrypi.org/> [Consulta: 26-01-2015]
- [20] *RASPBERRY Pi 3 MODEL B* [en línea].  
<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. [Consulta: 26-01-2015]
- [21] J. R. Evans, R. M. Allen, E. S. Cochran, R. Guy, M. Hellweg, J. F. Lawrence, *Performance of Several Low Cost Accelerometers*, Seismological Research Letters, Volume 85, Number 1, 2014.
- [22] *LSM6DS0. iNEMO inertial module: 3D accelerometer and 3D gyroscope* [en línea].  
[http://www.st.com/content/st\\_com/en/products/mems-and-sensors/inemo-inertial-modules/lsm6ds0.html](http://www.st.com/content/st_com/en/products/mems-and-sensors/inemo-inertial-modules/lsm6ds0.html). [Consulta: 27-03-2015]
- [23] *Adafruit Ultimate GPS Breakout - 66 channel w/10 Hz updates - Version 3* [en línea].  
<https://www.adafruit.com/product/746>. [Consulta: 28-03-2016]
- [24] *Pi ADVANCED. UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY FOR THE RASPBERRY PI.* [en línea].  
[http://www.s-usv.de/susv\\_piadvanced.html](http://www.s-usv.de/susv_piadvanced.html). [Consulta: 18-02-2016]
- [25] *ZMQ Distributed Messaging.* [en línea].  
<http://zeromq.org/>. [Consulta: 01-05-2016]
- [26] *IRIS SeisCode. IRIS Supported Software, ringserver* [en línea].  
<https://seiscode.iris.washington.edu/projects/ringserver> . [Consulta: 01-05-2016]





SECRETARÍA  
GENERAL  
TÉCNICA

SUBDIRECCIÓN GENERAL  
DE PUBLICACIONES  
Y PATRIMONIO CULTURAL