Trabajo Fin de Grado

Módulo de posicionamiento y búsqueda basado en GPS y redes ad-hoc.

Positioning and search module based on GPS and ad-hoc networks

Autor:

Alberto Giménez torres

Director:

José Luis Villarroel Salcedo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Zaragoza, septiembre de 2016

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. Alberto Giménez Torres,

con nº de DNI 73210730-M en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado en Ingeniería Electrónica y Automática, . (Título del Trabajo) Módulo de posicionamiento y búsqueda basado en GPS y redes ad-hoc

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 31 de Agosto de 2016

Fdo: ALBERTO GIMÉNEZ TORRES

A mis padres, a mi hermano y a mi hermana, por su apoyo incondicional.

A mi tutor, José Luis Villarroel Salcedo, por toda la ayuda prestada para la realización del proyecto.

RESUMEN

Módulo de posicionamiento y búsqueda basado en GPS y redes ad-hoc

El proyecto parte de una colaboración de la empresa Geko Navsat y la Universidad de Zaragoza, para el desarrollo de protocolos de redes ad-hoc y de aplicaciones de búsqueda en montaña.

El objetivo de este proyecto es diseñar un sistema de tiempo real empotrado, implementado sobre el módulo KYNEO V0.2, proporcionado por la empresa Geko Navsat. La aplicación desarrollada debe llevar a cabo el guiado de un individuo portador de uno de estos módulos hasta un individuo accidentado, el cual posee también uno de estos módulos.

La estructura diseñada para dicha aplicación consta de diferentes módulos KYNEO, interconexionados a través de una red ad-hoc de módulos XBee, proporcionados por la empresa Geko Navsat. Cada módulo KYNEO obtiene información acerca de su posición y su estado, utilizando los sensores y el módulo GNSS integrados en el módulo. Esta información es compartida con el resto módulos KYNEO a través de la red. Por último, el módulo buscador genera las instrucciones de búsqueda partiendo de la información compartida, las cuales son visualizadas mediante una aplicación móvil diseñada por la empresa Geko Navsat. La comunicación entre el módulo buscador y el dispositivo móvil se establece con un módulo Bluetooth.

Para el correcto funcionamiento de la aplicación, se han implementado unos drivers de comunicación software para los puertos UART1, UART2, SPI e I2C, conectados al módulo GNSS, al módulo XBee, al módulo Bluetooth y a los sensores respectivamente.

Además, se han diseñado todos los paquetes software necesarios para la generación, recepción y trasmisión de la información compartida entre módulos y de las instrucciones de búsqueda enviadas al dispositivo móvil.

Finalmente, se han realizado diferentes pruebas de funcionamiento. El resultado obtenido de dichas pruebas es que la aplicación envía las instrucciones de búsqueda correctas para la localización de un módulo accidentado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO 1: Introducción

1. Contexto y estado del arte

Se entiende por sistemas de tiempo real empotrado a una estructura computacional (hardware y software) diseñada para realizar una serie de funciones o tareas específicas, con el objetivo de cubrir una serie de necesidades imprescindibles para el correcto funcionamiento de una determinada aplicación. Dichas funciones o tareas realizadas por el sistema interaccionan con el entorno y responden a los estímulos procedentes de este dentro de un plazo de tiempo determinado [3].

El primer sistema empotrado reconocido fue el sistema de guía del Apolo desarrollado por el laboratorio de desarrollo de MIT para las misiones Apolo hacia la luna. Pero el primer sistema embebido producido en masa fue el computador guía del misil norteamericano Minuteman II en 1962 [4].

El desarrollo posterior de los sistemas empotrados es debido al contante desarrollo de los circuitos integrados, lo que ha dado lugar a la creación de dispositivos cada vez más complejos. Entre ellos encontramos los microprocesadores y los microcontroladores, núcleos principales de cualquier sistema empotrado [1][2].

Actualmente, las nuevas generaciones de plataformas electrónicas empotradas, de reducido tamaño y consumo, están causando una verdadera revolución en el mercado de los OEM's (Original Equipment Manufacturers) [5].

Esta tecnología se encuentra en pleno apogeo gracias al elevado desarrollo e innovación de los PDA (personal digital assistant) y Smartphone y de los PC (personal computer) industriales, para los cuales ofrecen un amplio abanico de posibilidades en cuanto a la realización y al control de tareas de todo tipo [5].

Un ejemplo de esta flexibilidad es la capacidad de trabajar con un amplio número de módulos independientes, denominados periféricos, utilizados para la obtención de datos del entorno o relacionados con la comunicación con otros dispositivos. Como ejemplo, cabe nombrar los módulos Bluetooth, los módulos GPS, los módulos de ethernet, los módulos GPRS y GSM, conexión de tarjetas PCMCIA, puertos de comunicación digitales y analógicos o puertos de conexión USB [5].

Hoy en día, podemos encontrar estos sistemas en un gran número de productos comerciales, como son los automóviles (cambio de marchas, sistema de frenado, control de la dirección, etc.), productos para el hogar (lavadoras, microondas, juguetes, aire acondicionado, etc.), productos de oficina y comercio (impresoras, escáneres, etc.) o dispositivos de uso personal (Smartphone, Tablets, etc.). Además, también son utilizados en aplicaciones más específicas e innovadoras, como sería el caso de la realización de tareas relacionadas con la domótica o la robótica [3].

En el presente proyecto, se diseña una aplicación relacionada con la localización y búsqueda. Esta aplicación se implementa como un sistema de tiempo real empotrado.

EL proyecto parte de una colaboración de la empresa GEKO Navsat y la Universidad de Zaragoza, para el desarrollo de protocolos de redes ad-hoc y de aplicaciones de búsqueda en

montaña. Para ello la empresa Geko Navsat ha suministrado los módulos KYNEO, sobre los que se desarrollará el presente proyecto.

El interés de llevar a cabo una aplicación para la búsqueda en montaña, viene suscitado por la necesidad de localizar y encontrar a un individuo accidentado, el cual ha quedado incapacitado o inmovilizado.

2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un sistema de tiempo real empotrado implementado sobre el módulo KYNEO, el cual debe ser capaz de guiar a un individuo portador de uno de estos módulos, en la búsqueda de otro un individuo accidentado, que debe portar también uno de estos módulos.

En la Figura 1, se representa un esquemático general del funcionamiento de la aplicación que se desea desarrollar. En ella, todos los módulos KYNEO se encuentran conectados a través de una red ad-hoc compuesta por módulos XBee. Estos módulos han sido proporcionados por la empresa Geko Navsat y poseen implementado el sistema DIGIMESH, el cual incorpora los protocolos de comunicación necesarios para el correcto funcionamiento de la red ad-hoc. Cada módulo KYNEO obtiene información acerca de su posición y su estado utilizando los sensores y el módulo GNSS integrados en el módulo. Esta información es compartida con el resto módulos KYNEO a través de la red. Por último, el módulo buscador genera las instrucciones de búsqueda partiendo de la información compartida, las cuales son visualizadas mediante una aplicación móvil. La comunicación entre el módulo buscador y el dispositivo móvil se establece con un módulo Bluetooth.

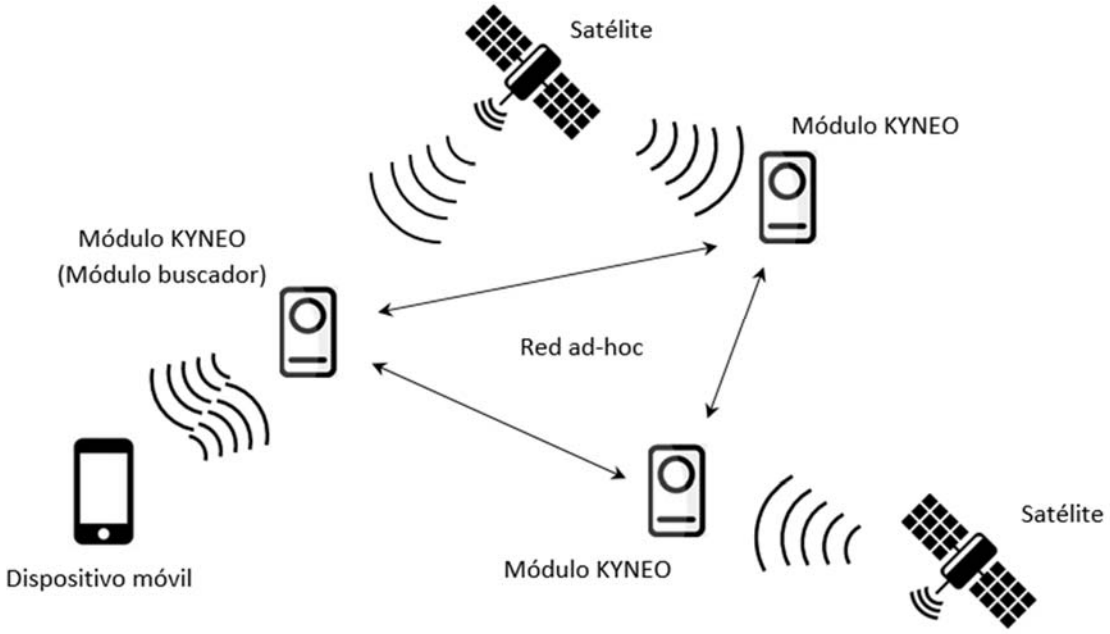


Figura 1. Esquemático general del funcionamiento de la aplicación

En consecuencia, los requerimientos para la aplicación a desarrollar son los que se presenta a continuación:

- Obtener la posición GPS, la orientación y otras características cinemáticas del módulo, partiendo de la información suministrada por el sistema GNSS y los sensores presentes en el módulo KYNEO.

- Obtener la información enviada por otros módulos del mismo tipo a través de la red ad-hoc mediante un módulo XBee. El diseño de la red ad-hoc y de las reglas de comunicación entre los módulos XBee se encuentra fuera del objeto de estudio de dicho proyecto.

- Trasmitir la información del propio módulo a través de la red ad-hoc mediante un módulo XBee.

- Comunicar, mediante un módulo Bluetooth, la información pertinente al usuario a través de una aplicación instalada en un dispositivo móvil, cuyo diseño se encuentra fuera del objeto de estudio de dicho proyecto.

- Obtener, mediante un módulo Bluetooth, los comandos de control enviados por el usuario a través de la aplicación móvil ya nombrada.

Para desarrollar estos objetivos, partimos inicialmente de los elementos hardware y software que presentamos a continuación:

- Un módulo KYNEO V0.2

- Un módulo XBee-PRO 868.

- Software de desarrollo integrado de aplicaciones Atmel Studio 7

- MATLAB

3. Organización de la memoria

El trabajo se ha dividido en 7 capítulos, siendo el primero de ellos esta introducción:

- Descripción del hardware y el software: explicación de las características más relevantes del hardware que conforma el dispositivo y el software utilizado para la programación de éste.
- Arquitectura del sistema: explicación global de la estructura hardware integrada en el sistema y de la función desempeñada por cada uno de los elementos que lo componen.
- Posicionamiento y búsqueda: análisis del funcionamiento de las distintas operaciones a realizar por la aplicación.
- Implementación software: explicación de la integración del hardware en el microcontrolador, haciendo uso de las herramientas que éste nos ofrece.
- Pruebas del funcionamiento: se presentan los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas para comprobar el correcto funcionamiento del dispositivo y de las pruebas realizadas para caracterizar la funcionalidad de la aplicación.
- Conclusiones: recopilación de las conclusiones obtenidas en este trabajo de fin de grado.

CAPITULO 2: Descripción del hardware y del software

1. Hardware

Para llevar a cabo el desarrollo de la aplicación se va a hacer uso de los siguientes componentes: un módulo KYNEO V0.2 (contiene el microcontrolador, un módulo GNSS y un módulo MARG), un módulo Bluetooth y un módulo XBee.

1.1. Módulo KYNEO V0.2

El módulo KYNEO es un dispositivo electrónico miniaturizado de bajo coste y de programación abierta, que integra sensores de navegación y es compatible con módulos electrónicos de comunicaciones inalámbricas. Esto permite desarrollar soluciones o proyectos que requieran registrar o medir, de forma remota, la localización o el movimiento de elementos. El microcontrolador integrado en el módulo KYNEO V0.2 es el ATmega1284P (anexo Unidad de procesamiento y puertos de expansión del módulo KYNEO V0.2).

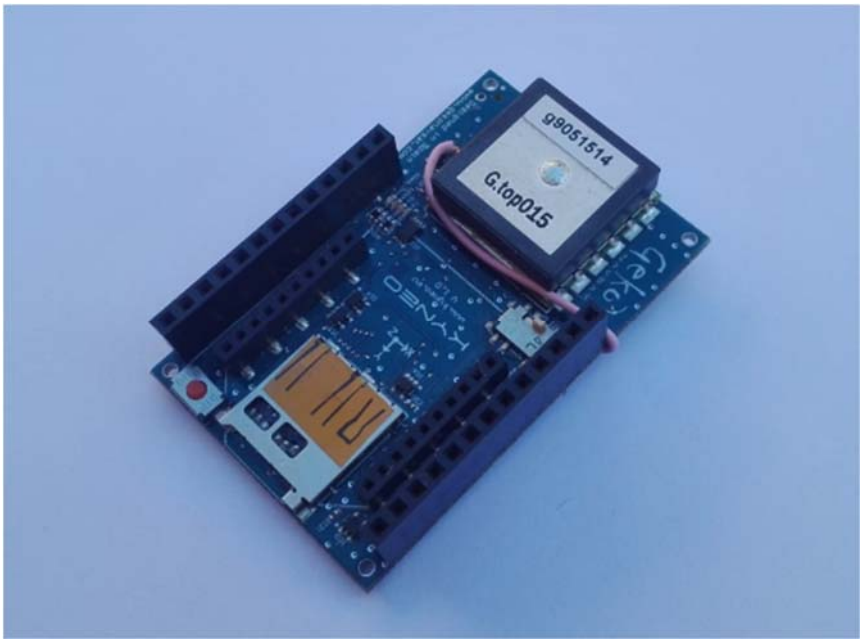


Figura 2. Módulo KYNEO V0.2

- **Subsistema de alimentación**

El módulo KYNEO puede alimentarse a través de una batería de ion de litio de 3,7 V o mediante el conector micro-USB a 5 V. En ambos casos, si se habilita el interruptor general, el sistema genera tensiones de 3,3 V y 5 V reguladas para alimentar al resto de dispositivos presentes en la plataforma. Además, el subsistema de alimentación dispone de un módulo de control de carga de la batería que cumple dos funciones: por un lado, evita que la carga de la batería baje de un umbral de seguridad, y por otro, recarga la misma cuando se alimenta a través del conector micro-USB.

- Sensores

El módulo KYNEO V0.2 integra un Sistema GNSS (sistema de navegación global por satélite) y una unidad MARG (Unidad de rotación angular, magnética y gravitacional), los cuales permiten conocer la localización y la dinámica del módulo. A continuación, desarrollamos en mayor medida estos elementos.

- Sistema de navegación global por satélite (GNSS)

KYNEO V0.2 incorpora un módulo gms-g9 de GlobalTop, un dispositivo GNSS multiconstelación (GPS+GLONASS) con antena integrada de -163 dBm de sensibilidad. Las tramas GPS soportadas son: GPGLL, GPVTG, GPGGA, GPGSA, GPGSV y GPRMC.

La conexión entre el módulo GNSS y el microcontrolador se realiza a través del puerto serie UART1.

Figura 3. Módulo GPS [9]

- Unidad de rotación angular, magnética y gravitacional (MARG)

KYNEO V0.2 dispone como elemento central de su unidad MARG un MPU6050 fabricado por InvenSense, un acelerómetro de 3 ejes con un giróscopo integrado, cuyos datos se complementan con el magnetómetro HMC5883 fabricado por Honeywell. El rango dinámico de los sensores es regulable, lo que permite obtener una mejor resolución en el rango deseado. Además, incluye el altímetro barométrico MS561101BA fabricado por meas-spec, el cual integra también un sensor de temperatura.

La conexión entre los diferentes sensores que componen el módulo MARG y el microcontrolador se realiza a través del puerto serie I^2C.

Figura 4. Acelerómetro y Giróscopo MPU6050 [11]

Figura 5. Magnetómetro HMC5883 [10]

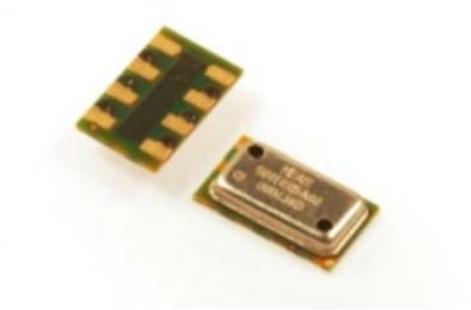


Figura 6. Altímetro barométrico MS561101BA [13]

- Modificaciones

Los módulos diseñados por la empresa Geko Navsat están diseñados para trabajar con las librerías de Arduino, por ello, la conexión entre el módulo GNSS y el microcontrolador se realiza mediante una UART emulada sobre pines de propósito general. El empleo de este tipo de conexión supone una limitación enorme en el desarrollo y la funcionalidad de la aplicación. Por lo tanto, se desestimó el desarrollo o adaptación de un emulador de UART en C y se decidió realizar una modificación en el hardware conectando la UART1 que estaba libre al módulo GNSS. Para ello se han realizado dos conexiones mediante cables soldados tal como se muestra en las Figuras 7 y 8.

- Modificación 1:

Conexión del pin TX0 del módulo GNSS (pin módulo) con el pin TX1 del microcontrolador (Conector expansión P1).

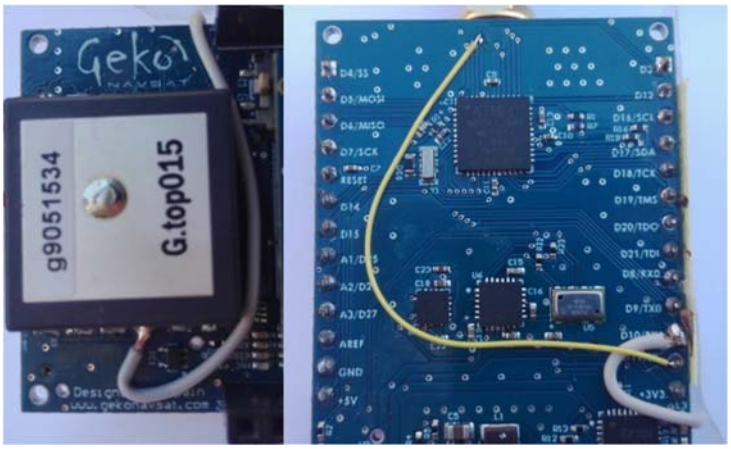


Figura 7. Modificación 1 (Cable d color gris)

- Modificación 2:

Conexión del pin TX1 del microcontrolador (paso de cara cercano al chip) con el pin D0 del microcontrolador (conector expansión P1). En esta conexión, no se ha realizado una soldadura directa al pin del módulo GNSS, ya que la conexión tiene que atravesar un adaptador de tensión de 5 V a 3,3 V.

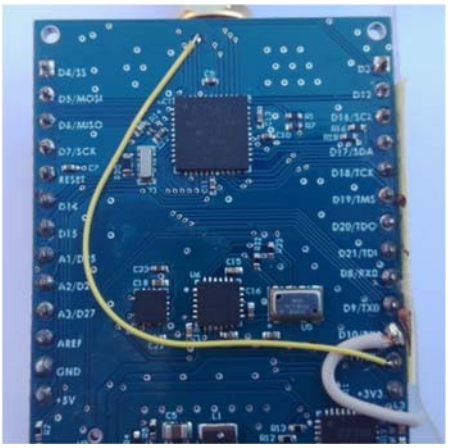


Figura 8. Modificación 2 (Cable de color amarillo)

1.2. Módulo XBee

El módulo del que se dispone es el XBee-PRO 868 fabricado por Digi Internacional. Es un módulo de comunicación serie inalámbrico, con una distancia máxima de trasmisión de datos de 550 m en interiores o espacios urbanos y de 40 km en campo abierto. Además, su velocidad de transmisión en de 24 kbps, suficiente para las comunicaciones realizadas.

La conexión entre el módulo XBee y el microcontrolador se realiza a través del puerto serie UART0.

Figura 9. Módulo XBee XBee-PRO 868 [15]

1.3. Módulo Bluetooth

Es un módulo de comunicación inalámbrica mediante radiofrecuencia, cuya frecuencia de transmisión depende de la clase del módulo Bluetooth. Los módulos Bluetooth que cumplen los requisitos requeridos para esta aplicación se recogen en la Tabla 1.

Modelo	Tensión máx./min.	Rango de Datos	Rango de Señal	Precio
BT730-SA	**5V / 3.3V**	**2.1 Mbps**	**1 km**	**19.90 €**
BT730-SC	**5V /3.3V**	**2.1 Mbps**	**1 km**	**18.90 €**
BISMS02BI	**7V / 3.3V**	**300 Kbps**	**300 m**	**51.90 €**
MTS2BTSMI	**5V / -**	**921.6 Kbps**	**100 m**	**74.24 €**

Tabla 1. Características módulos Bluetooth

Entre las opciones presentadas en la Tabla 1, se ha seleccionado el módulo Bluetooth BT730-SC fabricado por LAIRD TECHNOLOGIES, ya que es la opción de menor coste. Se trata de un módulo Bluetooth de clase 1 y versión 2.0.

La conexión entre el módulo Bluetooth y el microcontrolador se realiza a través del puerto serie SPI.

Figura 10. Módulo Bluetooth BT730-SC [14]

2. Software

La implementación del software se va a realizar en el entorno de programación Atmel Studio 7 de Atmel. Para el estudio del comportamiento cinemático del módulo KYNEO V0.2, dado por los diferentes sensores que componen el módulo MARG, se ha utilizado MATLAB. El código ha sido implementado en C.

2.1. Atmel Studio 7

Atmel Studio 7 es un entorno de desarrollo integrado (IPD) para el desarrollo de aplicaciones. En él se pueden encontrar numerosas herramientas para el control y seguimiento de la ejecución del código implementado. Tiene editor, debugger, compilador y linker.

Atmel Studio 7 soporta todos los microcontroladores AVR y Atmel SMART.

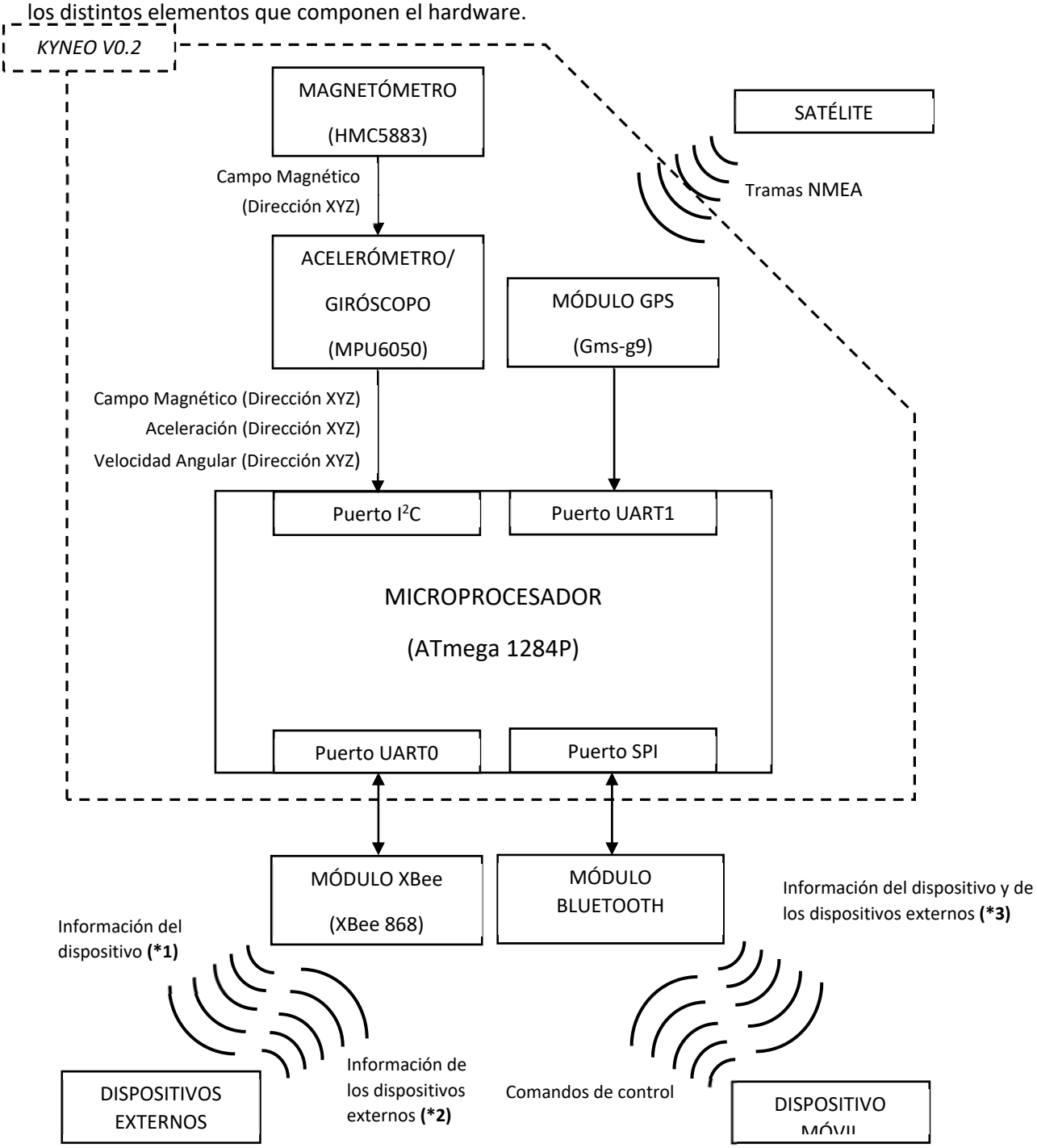
2.2. MATLAB

Matlab es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje propio, la cual permite trabajar con ficheros de datos en los cuales se recoge la información que se desea analizar.

CAPITULO 3: Arquitectura del sistema

1. Estructura hardware

En la Figura 11, se presenta un diagrama de bloques, el cual representa la conexión entre los distintos elementos que componen el hardware.



Notas: **(*1)** Información sobre el número identificador, la posición GPS y las alarmas activas del módulo.

(*2) Información sobre el número identificador, la posición GPS y las alarmas activas del módulo externo emisor.

(*3) Información sobre el número identificador, la posición GPS y las alarmas activas del módulo y de los módulos externos.

Figura 11. Estructura Hardware

2. Función desarrollada por cada uno de los elementos de la arquitectura

A continuación, se describe la función realizada por cada uno de los módulos utilizados para el desarrollo de la aplicación.

- Módulo GNSS

El módulo GNSS es utilizado para obtener las tramas NMEA trasmitidas por satélite, las cuales almacenan la información sobre la posición de dicho módulo.

Dicha información es trasmitida al microprocesador a través del puerto de comunicaciones UART1, lo que supone implementar el correspondiente driver de comunicación software para dicho puerto.

- Unidad de rotación angular, magnética y gravitacional (MARG)

El acelerómetro MPU6050 tiene la función de obtener la aceleración soportada por el dispositivo. Esta información se utiliza para la detección de impactos y así, poder revelar si el portador del dispositivo ha sufrido un accidente.

El giróscopo MPU6050 tiene la función de obtener la velocidad angular del dispositivo. Esta información se utiliza para comprobar la fiabilidad de la medida del magnetómetro.

El magnetómetro HMC5883 tiene la función de obtener el campo magnético al que se ve sometido el dispositivo. Dicha información se utiliza para el cálculo de la orientación respecto al polo magnético del dispositivo.

La comunicación entre el módulo MARG y el microprocesador se produce mediante el puerto serie I2C, lo que supone implementar el correspondiente driver de comunicación software para dicho puerto.

- Módulo XBee

El módulo XBee tiene la función de transmitir la información acerca de la posición y de las alarmas activas del dispositivo dentro de la red ad-hoc. Además, debe obtener esta información de los otros dispositivos del mismo tipo que se encuentra en dicha red.

La comunicación entre el módulo XBee y el microprocesador se lleva a cabo mediante el puerto serie asíncrono UART0, lo que supone implementar el correspondiente driver de comunicación software para dicho puerto.

- Modulo Bluetooth

El módulo Bluetooth tiene la función de transmitir al dispositivo móvil la posición y las alarmas activas del módulo emisor y la distancia, la orientación y las alarmas activas del resto de módulos que se encuentran dentro de la red ad-hoc. Además, ha de obtener los comandos de control enviados por el dispositivo móvil.

La comunicación entre el módulo Bluetooth y el microprocesador se lleva a cabo mediante el puerto serie síncrono SPI.

CAPITULO 4: Posicionamiento y búsqueda

1. Operaciones realizadas por el dispositivo

Para llevar a cabo el guiado del portador del módulo hasta el individuo accidentado, portador de otro módulo idéntico, la aplicación ha de ser capaz de desarrollar 5 funciones diferenciadas:

- Lectura de la posición GPS.
- Detección de un posible accidente sufrido por el portador del módulo y activar las alarmas pertinentes.
- Orientar al individuo que realiza la búsqueda.
- Enviar la posición y la situación de las alarmas al resto de módulos que conforman la red ad-hoc y recibir esta misma información de cada uno de dichos módulos.
- Enviar la información del módulo y del resto de módulos al dispositivo móvil y recibir de éste los comandos de control.

La explicación detallada de estas funciones a realizar por la aplicación se encuentra desarrolladas en los siguientes apartados de dicho capitulo.

2. Lectura de la posición

Las tramas enviadas por el módulo GNSS son: la GPGSA, la GPRMC, la GPVTG, la GPGGA, la GPGSA y la GPGSV, en la cuales la información se encuentra codificada en nomenclatura ASCII. Estas tramas son enviadas con una frecuencia de 5 Hz (cada 200 ms) y recibidas por el microcontrolador a través del puerto serie UART1.

La trama GPGGA es la utilizada por la aplicación, ya que almacena la posición 3D requerida (latitud, longitud y altitud) con una elevada precisión (+/- 2 metros en campo abierto).

En la trama GPGGA, cada valor de información se encuentra entre comas (“,”). La latitud es el tercer y cuarto valor (indican la posición en grados y la dirección norte o sur). La longitud es el quinto y sexto valor (indican la posición en grados y la dirección este u oeste)). La altitud es el décimo valor (indica la posición en metros). Por último, el doceavo valor indica si la trama recibida es correcta. Esta información queda resaltada en el siguiente ejemplo.

$GPGGA,162021.000,4140.4217,N,00053.5522,W,1,7,1.12,145.3,M,51.6,M,,*4B

El tratamiento de la información que lleva a cabo por la aplicación se describe a continuación:

- En primer lugar, se comprueba si la trama recibida es GPGGA, utilizando su identificador “$GPGGA”, y se almacena para su posterior tratamiento.
- En segundo lugar, se interpreta la información contenida en la trama GPGGA almacenada, trasformando los valores de posición codificados en nomenclatura ASCII a valor decimal.
- Por último, los valores decimales de posición son almacenados en tres variables del tipo float. El módulo almacenado es igual al valor recibido en grados, para la longitud y la latitud, o en metros, para la altitud. El signo +/- almacenado se corresponde con la dirección norte o sur para la latitud o este u oeste para la longitud. El valor de altitud siempre es positivo.

El tipo de variable seleccionado ha sido float ya que es necesario para realizar los cálculos que utilizan dicha posición y, además, la información sobre la posición requerida por la aplicación móvil ha de ser enviada en este tipo de formato.

3. Activación de las alarmas de detección de accidente

La aplicación ha de ser capaz de detectar si el individuo portador de un módulo ha sufrido accidente, valiéndose de la información obtenida por el acelerómetro, e informar sobre dicho acontecimiento al módulo buscador. Para ello se han desarrollado una serie de alarmas que indican si el individuo se encuentra inmóvil, ha sufrido un impacto o se encuentra inconsciente.

La activación o desactivación de estas alarmas depende de la información obtenida del acelerómetro y de los comandos de control enviados por el dispositivo móvil al cual se encuentra conectado el módulo. Por ello, ha sido necesaria la calibración del acelerómetro. Los valores de corrección obtenidos para las medidas tomadas del acelerómetro se presentan en la Tabla 4. La obtención de dichos valores se encuentra desarrollada en el anexo Calibración del Acelerómetro.

	X (m/s2)	Y (m/s2)	Z (m/s2)
Error medio	0,1191183	-0.877595	-0,4785163

Tabla 2. Error medio de las medidas tomadas por el acelerómetro

La lectura del acelerómetro se realiza a través del puerto I2C del microprocesador, pines SDA y SCL.

Tras asegurar la fiabilidad de las medidas proporcionadas por el acelerómetro, se ha llevado a cabo un estudio de las aceleraciones soportadas por el módulo para distintas situaciones.

La primera de ellas, se corresponde con el individuo portador caminando o corriendo, donde las aceleraciones soportadas por el módulo se representan en la Figura 12.

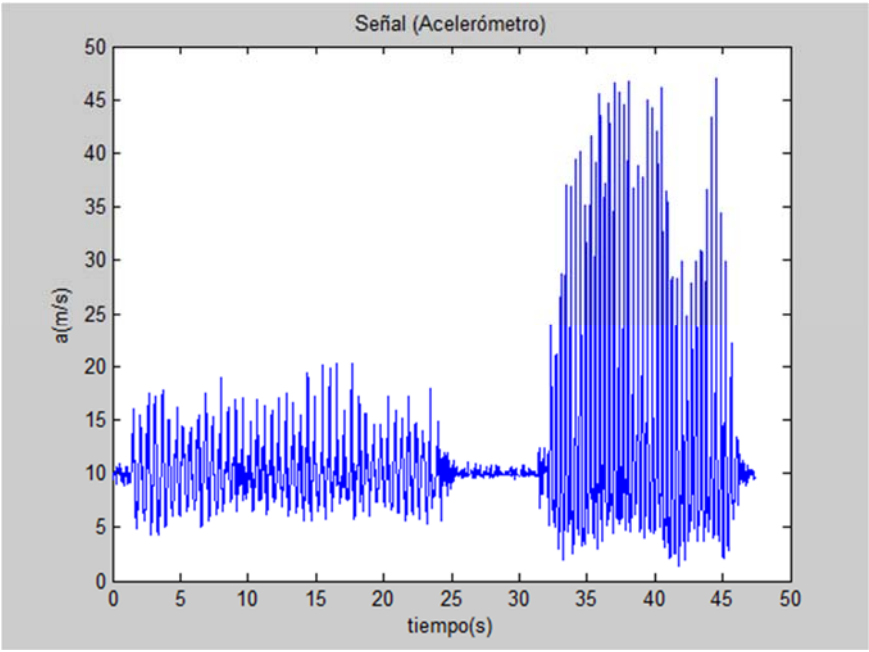


Figura 12. Medida de la aceleración soportada por el módulo al caminar y correr

La segunda situación se corresponde con el individuo agitando bruscamente las manos mientras sostiene el módulo. Las aceleraciones soportadas por el módulo se representan en la Figura 13.

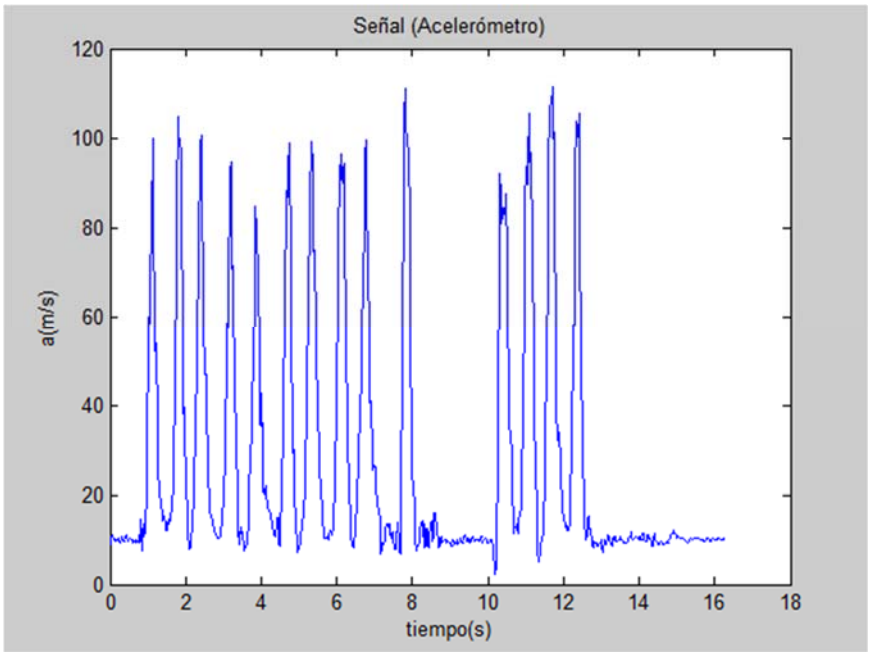


Figura 13. Medida de la aceleración soportada por el módulo al agitar bruscamente la mano

La tercera situación se corresponde con el individuo realizando diferentes saltos. Las aceleraciones soportadas por el módulo se representan en la Figura 14.

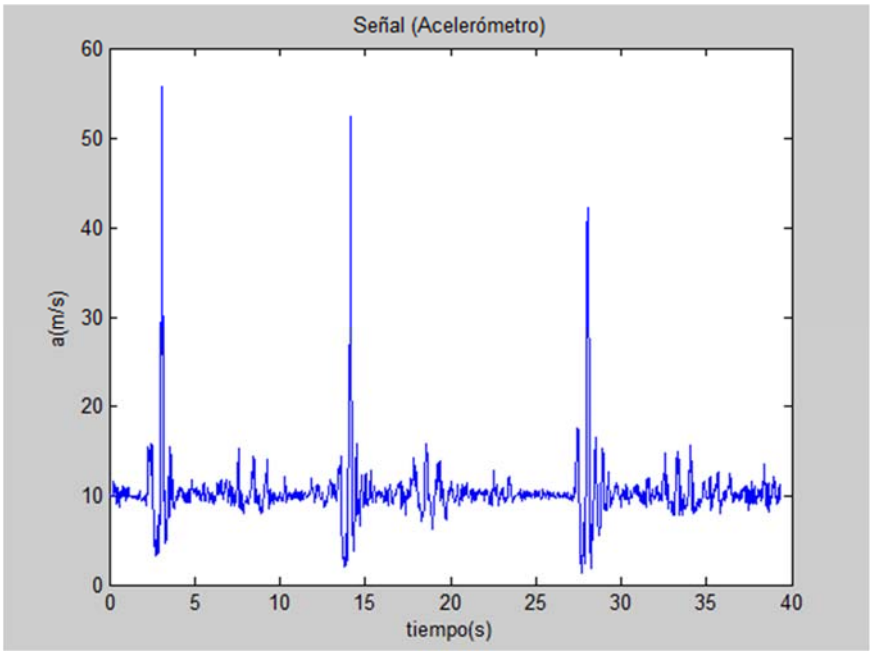


Figura 14. Medida de la aceleración soportada por el módulo al saltar o al frenar de forma brusca

Por último, la siguiente situación coincide con el impacto violento del módulo contra una superficie. Las aceleraciones soportadas por el módulo se representan en la Figura 15.

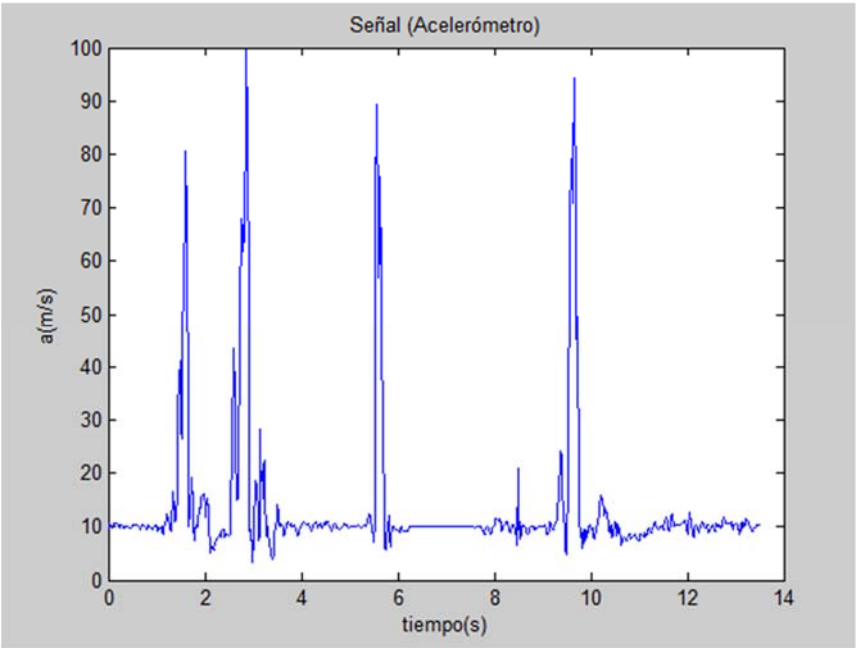


Figura 15. Medida de la aceleración soportada por el módulo al recibir un impacto

Tras el análisis de los datos recogidos, podemos afirmar que aceleraciones por encima de 60 m/s^2 indican que el individuo portador del módulo ha recibido un impacto o ha realizado un movimiento brusco.

En consecuencia, la activación de las alarmas dependerá tanto de las aceleraciones soportadas por el módulo como del estado del módulo tras la realización de unas determinadas temporizaciones. De esta forma se consigue establecer una diferenciación entre estas dos situaciones similares.

Además, se asegura el correcto funcionamiento de la aplicación si la banda de medida del acelerómetro recoge valores iguales o superiores a 60 m/s^2

Por último, el pico de aceleración descrito por un impacto posee una amplitud de 200 ms, por lo que, realizando una lectura de la aceleración cada 20 ms (10 veces menor que la amplitud del impacto), se asegura un correcto muestreo del pico de aceleración descrito por un impacto.

Partiendo de las medidas proporcionadas por el acelerómetro, pueden activarse o desactivarse cuatro alarmas independientes. Estas alarmas son:

- Alarma leve, la cual indica que el individuo se encuentra inmóvil.
- Alarma de golpe, la cual indica que el individuo portador ha recibido un impacto y se encuentra herido.
- Alarma crítica, la cual indica que el individuo portador se encuentra inmóvil tras haber recibido un impacto.
- Alarma de medida, la cual indica una mala lectura del acelerómetro.

A continuación, se describen las condiciones que han de cumplirse para que estas alarmas sean activadas.

Si la recepción de la medida del acelerómetro no es correcta, o el propio acelerómetro indica que la medida no es correcta, la alarma de medida se activará y el resto de alarmas mantendrán el estado anterior a la activación de esta alarma.

Si la aceleración se ha mantenido durante 5 segundos entre los límites de 11 m/s2 y 8 m/s2 (lo que indica que el individuo se encuentra inmóvil), se activará la alarma leve.

Si la aceleración soportada por el módulo sobrepasa un determinado umbral de 60 m/s^2, se activará la alarma de golpe y se comenzará una temporización de 30 segundos.

Una vez finalizada esta temporización, se tomará la posición del módulo y se activará de nuevo una temporización de 30 segundos. Al finalizar esta segunda temporización, se volverá a obtener la posición del módulo y se calculará la distancia entre las dos posiciones recogidas.

Si la distancia entre las dos posiciones es menor de 10 m o se encuentra inmóvil, se mantendrá activa la alarma de golpe, y, si el individuo se encuentra inmóvil, se activará la alarma crítica. En el caso de que no se cumpla ninguna de estas situaciones, no se activará la alarma crítica y se desactivara la alarma de golpe, tomando la situación como un falso impacto.

Por último, las alarmas son de tipo binario, para condensar la información que estas recogen y así, reducir el espacio que ocupan en las tramas de comunicación.

4. Brújula

Una de las necesidades para llevar a cabo el guiado del individuo buscador es conocer la dirección en la cual se encuentra posicionado el módulo perteneciente al individuo accidentado. Para generar dicha instrucción es necesario conocer la orientación del módulo buscador. La brújula será la encargada de realizar dicho cometido.

Se ha tomado la decisión de diseña una brújula en vez de utilizar la dirección proporcionada por las tramas NMEA, ya que para velocidades de desplazamientos reducidas dicha dirección es poco precisa.

El cálculo de la orientación será en 2D, por lo que será necesario que el módulo se encuentre paralelo a la superficie terrestre y no sufra movimientos bruscos durante el cálculo de la orientación.

La brújula se valdrá de la información obtenida del giróscopo y del magnetómetro para realizar su cometido. Como consecuencia, será necesario calibrar dichos sensores.

Los valores de corrección obtenidos para las medidas proporcionadas por el giróscopo y el magnetómetro se presentan en la Tabla 3 y en la Tabla 4 respectivamente. La obtención de dichos valores se encuentra en el anexo Calibración del Giróscopo y en el anexo Calibración del Magnetómetro.

	X (º/s)	Y (º/s)	Z (º/s)
Error medio	1,1161	0.1573	-72,7908

Tabla 3. Error medio de las medidas tomadas por el giróscopo.

	X (Ga)	Y (Ga)
Error medio	0,206055	-0,09082

Tabla 4. Error medio de las medidas tomadas por el magnetómetro.

La lectura del magnetómetro se realiza a través del puerto I2C del microprocesador, pines SDA y SCL.

Partiendo de los valores obtenidos del magnetómetro, se lleva a cabo el cálculo de la orientación con la siguiente expresión, donde se realiza también el cambio de unidades de radianes a grados.

$$Orientación = atan2(X, Y) * \frac{180}{\pi}$$

Para asegurar un correcto cálculo de la orientación, el módulo ha de cumplir los siguientes requisitos, derivados de las dos condiciones de posición y movimiento ya mencionadas:

- Como la velocidad angular soportada por el módulo, al estar sostenido sobre la mano del individuo portador, no es superior a 50 º/s, se tomará como correcto el cálculo de la orientación si la velocidad angular proporcionada por el giróscopo no supera los 50 º/s. En consecuencia, un rango de medida del sensor que recoja valores iguales o superiores a 50 º/s será suficiente para asegurar el correcto funcionamiento de la aplicación.

- Como el módulo del campo magnético tangente a la superficie terrestre nunca es inferior a 0.3 Ga, se tomará correcto el cálculo de la orientación si el módulo del campo magnético en los ejes X e Y del magnetómetro (tangentes a la superficie terrestre para un correcto cálculo de la orientación) no es inferior a 0.3 Ga. Además, como el módulo en los ejes X e Y del magnetómetro alcanza un máximo en 0.489 Ga, cumpliendo las dos condiciones definidas anteriormente, un rango de medida del sensor que recoja valores iguales o superiores a 0.6 Ga (0.489 Ga + banda de seguridad) será suficiente para obtener las medidas con la precisión requerida.

En la situación en la cual no se cumplan las condiciones nombradas anteriormente o se produzca algún fallo en la recepción de la información del magnetómetro o del giróscopo, se activará una alarma que indicará un error en el cálculo de la orientación.

5. Red ad-hoc

Los módulos XBee que componen la red ad-hoc utilizada en la aplicación son proporcionados por la empresa Geko Navsat. Estos módulos poseen implementado el sistema DIGIMESH, el cual incorpora los protocolos de comunicación necesarios para el correcto funcionamiento de la red ad-hoc. En consecuencia, únicamente se lleva a cabo el diseño de las tramas que contienen la información sobre la posición y el estado de los módulos.

La red está compuesta por módulos XBee. La comunicación ente el microprocesador y el módulo XBee se realiza a través del puerto UART0, pines RX0 y TX0 del microprocesador.

La información que recibe y envía cada módulo XBee está estructurada en una trama de 14 bytes. La información recogida por esta trama es la siguiente:

Byte 1 → Carácter “$”

Byte 2 → Carácter “X”

Byte 3 → Carácter “B”

Byte 4 → Bit 0:2, número identificador del módulo emisor

→ Bit 3, Error en la medida de la posición (activado “1” o desactivado “0”)

→ Bit 4, alarma crítica (activada “1” o desactivada “0”)

→ Bit 5, alarma leve (activada “1” o desactivada “0”)

→ Bit 6, alarma de golpe (activada “1” o desactivada “0”)

→ Bit 7, alarma de medida (activada “1” o desactivada “0”)

Byte 5:8 → Posición: longitud (float 4 bytes)

Byte 9:12 → Posición: latitud (float 4 byte)

Byte 13:14 → Posición: altitud (int 2 bytes)

El comienzo de la trama está compuesto por tres caracteres (“$XB”), con la finalidad de evitar la detección de un falso comienzo de trama.

Además, la información acerca de la posición del módulo, es enviada en formato float e int y no en nomenclatura ASCII, ya que el código necesario para la generación e interpretación de tramas y el tamaño de estas se ve reducido en gran medida, de 34 bytes a 14 bytes de longitud de trama.

La información recibida por un módulo, es almacenada en un buffer en función del número identificador de la trama. En la situación en la que se reciba una trama cuyo número identificador coincida con el de una trama ya almacenada, únicamente se actualizará la información, sin modificar su posición en el buffer. Esta posición se corresponde con el número identificador de la trama.

6. Aplicación móvil

El interfaz establecido por la empresa Geko Navsat para la comunicación entre la aplicación y el usuario es una aplicación móvil diseñada por esta misma empresa. Dicha aplicación permite la visualización de las instrucciones de búsqueda y el control del funcionamiento del módulo a partir de unos determinados comandos de control.

El módulo Bluetooth es el encargado de establecer una línea de comunicación entre el módulo y el dispositivo móvil, más específicamente con la aplicación móvil.

La comunicación con el módulo Bluetooth se realiza a través del puerto SPI del microprocesador, pines SS, MISO, MOSI y SCK.

La información recibida por la aplicación móvil está estructurada en una trama de 15 bytes fijos, más 13 bytes por cada módulo que envíe cualquier tipo de alarma de detección de accidente. La información que recoge esta trama es la siguiente:

- Para la trama de 15 bytes fijos.

  Byte 1 → Carácter “&”

  Byte 2 → Carácter “B”

  Byte 3 → Carácter “T”

  Byte 4 → Bit 0:2, número identificador del módulo emisor

  → Bit 3, indica la activación de la alarma de golpe, de la alarma crítica o de la alarma leve (activada “1” o desactivada “0”)

  → Bit 4, Error en la medida de la posición (activado “1” o desactivado “0”)

  → Bit 5, Error en la medida de la velocidad angular (activada “1” o desactivada “0”)

  → Bit 6, Error en la medida del campo magnético (activada “1” o desactivada “0”)

  → Bit 7, Error en el cálculo de la orientación (activada “1” o desactivada “0”)

  Byte 5:8 → Posición: Longitud (float 4 bytes)

  Byte 9:12 → Posición: Latitud (float 4 bytes)

  Byte 12:14 → Posición: Altitud (int 2 bytes)

  Byte 15 → Número de módulos que han enviado una alarma de detección de accidente

- Para la trama de 13 bytes para los módulos que envíen una alarma.

  Byte 1 → Bit 0:2, número identificador del módulo emisor

  → Bit 3, Error en la medida de la posición (activado “1” o desactivado “0”)

  → Bit 4, alarma crítica (activada “1” o desactivada “0”)

  → Bit 5, alarma leve (activada “1” o desactivada “0”)

  → Bit 6, alarma de golpe (activada “1” o desactivada “0”)

  → Bit 7, alarma de medida (activada “1” o desactivada “0”)

  Byte 2:5 → Distancia del módulo receptor al módulo emisor de la alarma (float 4 bytes)

  Byte 6:9 → Cambio de dirección del módulo receptor para apuntar hacia el módulo emisor de la alarma (float 4 byte)

  Byte 10 → Cambio de dirección hacia la derecha (carácter “R”) o hacia la izquierda (carácter “L”)

  Byte 11:12 → Diferencia de altura entre el módulo receptor y el módulo emisor de la alarma (int 2 bytes)

  Byte 13 → Diferencia de altura positiva (el módulo emisor de la alarma se encuentra a mayor altitud, carácter “U”) o negativa (el módulo emisor de la alarma se encuentra a menor altitud, carácter “D”).

El comienzo de la trama está compuesto por tres caracteres (“&BT”) con la finalidad de evitar la detección de un falso comienzo de trama.

Además, la información acerca de la posición del módulo y de las instrucciones de búsqueda son enviadas en formato float e int y no en nomenclatura ASCII, ya que el código necesario para la generación e interpretación de tramas y el tamaño de estas se ve reducido en gran medida, de 38 + 39*n bytes a 15 + 13*n bytes de longitud de trama.

Para la generación de dicha trama, ha sido necesario llevar a cabo tres operaciones: cálculo de la distancia, del cambio de dirección y de la diferencia de alturas entre el módulo receptor y emisor [6]. La información que se desea obtener se encuentra representada gráficamente en la Figura 16, donde encontramos la posición del módulo receptor (Lat_{mr}, $Long_{mr}$ y Alt_{mr}) y la posición del módulo emisor (Lat_{me}, $Long_{me}$ y Alt_{me}).

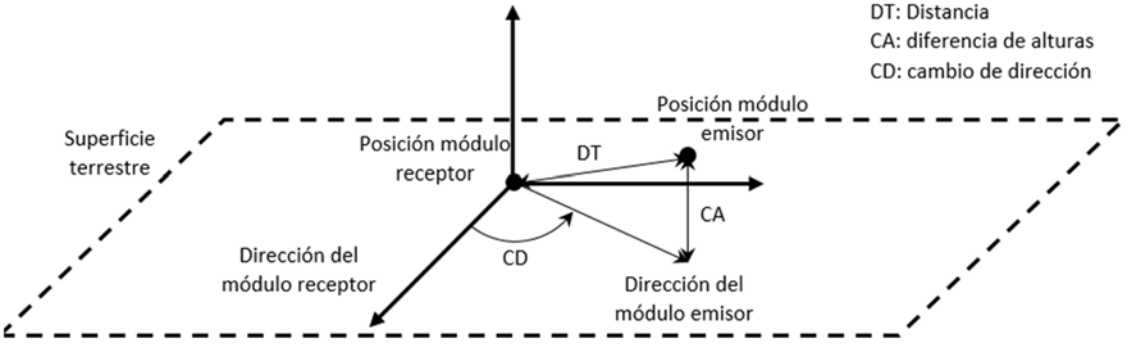


Figura 16. Distancia, diferencia de alturas y cambio de dirección entre el módulo receptor y emisor.

El cálculo del cambio de dirección entre los módulos ya nombrados es el siguiente:

$$Aux1 = \ln\left(\frac{\tan\left(\frac{Lat_{me}}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{\tan\left(\frac{Lat_{mr}}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}\right)$$

$$Aux2 = |Long_{mr} - Long_{me}|$$

$$Aux3 = 360 - atan2\,(Aux2, Aux1) * \frac{180}{\pi}$$

$$Cambio\ de\ Dirección = norm(Aux3 - Orientación_{mr})$$

, siendo Lat_{me} la latitud del módulo emisor de la alarma, Lat_{mr} la latitud de módulo receptor, $Long_{mr}$ la longitud del módulo receptor, $Long_{me}$ la longitud del módulo emisor de la alarma, $Orientación_{mr}$ la orientación del módulo receptor con respecto al norte magnético y norm la normalización del ángulo en el rango de 0º-360º.

Si el ángulo se encuentra entre 0º y 180º, se mantendrá su valor y se enviará el carácter "R". Si el ángulo se encuentra entre 180º y 360º, se le restará a 360º dicho ángulo y se enviará el resultado junto con el carácter "L".

El cálculo de la distancia entre los módulos ya nombrados es la siguiente:

$$Aux4 = \sin\left(\frac{Lat_{me} - Lat_{mr}}{2}\right)^2 + \cos\,(Lat_{me}) * \cos\,(Lat_{mr}) * \sin\left(\frac{Long_{me} - Long_{mr}}{2}\right)^2$$

$$Distancia = 2 * (Radio\ Terrestre + Alt_{me}) * \text{asin}(\sqrt{Aux4})$$

, siendo Lat_{me} la latitud del módulo emisor de la alarma, Lat_{mr} la latitud de módulo receptor, $Long_{mr}$ la longitud del módulo receptor, $Long_{me}$ la longitud del módulo emisor de la alarma y Alt_{me} la altitud del módulo emisor de la alarma.

El cálculo de la diferencia de alturas entre los módulos ya nombrados es la siguiente:

$$Diferencia\ de\ Altitud = Alt_{me} - Alt_{mr}$$

, siendo Alt_{me} la altitud del módulo emisor de la alarma y Alt_{mr} la altitud del módulo receptor.

Si la diferencia de alturas es positiva, se mantendrá su valor y se enviará el carácter "U". En el caso de que esta diferencia sea negativa, se obtendrá su valor absoluto y se enviará el carácter "D".

La información enviada por la aplicación móvil está estructurada en una trama de longitud 2 bytes. La información que recoge esta trama es la siguiente:

Byte 1 → Carácter "&"

Byte 2 → Carácter "B"

Byte 3 → Carácter "T"

Byte 2 → Comando de control ("0" desactivar comunicación, "1" Reset, "2" emisión de la trama, desde el módulo, cada 1 segundo, "3" emisión de

la trama, desde el módulo, cada 5 segundos y “4” emisión de la trama, desde el módulo, cada 10 segundos)

El comienzo de la trama está compuesto por tres caracteres (“&BT”) con la finalidad de evitar la detección de un falso comienzo de trama.

Una vez recibida la trama que contiene el comando de control, el módulo modifica inmediatamente la forma de comunicación con el dispositivo móvil.

CAPITULO 5: Implementación software del sistema

1. Estructura del software

El esquemático de la solución software se encuentra definido en el siguiente diagrama de bloques:

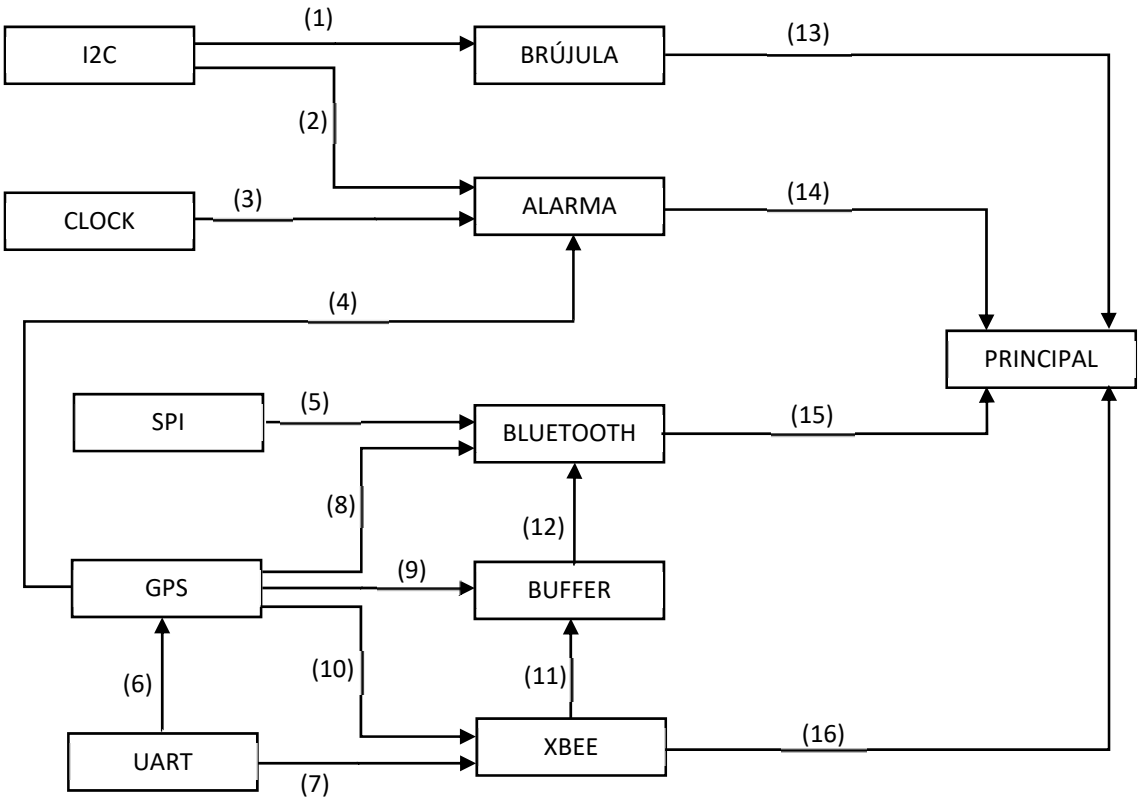


Figura 17. Esquemático de la solución software

Cada uno de los bloques del esquema anterior es un módulo software implementado con un fichero *.h y con un fichero *.c. A continuación, definimos las funciones realizadas por cada uno de estos bloques.

El bloque CLOCK es un reloj con un tick de 1 ms, el cual lleva a cabo todas las temporizaciones realizadas en la aplicación.

El bloque UART realiza todas las funciones relacionadas con la comunicación serie asíncrona de los puertos UART0 y UART1, los cuales son utilizados para la comunicación con el módulo XBee y el módulo GPS respectivamente.

El bloque SPI realiza todas las funciones relacionadas con la comunicación serie síncrona del puerto SPI, utilizado para la comunicación con el módulo Bluetooth.

El bloque I2C realiza todas las funciones relacionadas con la comunicación I^2C, utilizada para la lectura del acelerómetro/giróscopo y del magnetómetro.

El bloque BRÚJULA realiza todos los cálculos necesarios para la obtención de la orientación del módulo y activa todas las alarmas relacionadas con la lectura del magnetómetro y del giróscopo y las relacionadas con el fallo de cálculo de la orientación.

El bloque ALARMA realiza todos los cálculos necesarios para la activación o desactivación de las alarmas relacionadas con la detección de accidente y con la lectura del acelerómetro.

El bloque GPS realiza todas las funciones relacionadas con la inicialización del módulo GPS, con la recepción de las tramas enviadas por el GPS, con la detección de las tramas GPGGA y con la interpretación de la información recogida en una trama GPGGA.

El bloque XBEE realiza todas las funciones relacionadas con la inicialización del módulo XBee, con la recepción de las tramas enviadas a través de la red ad-hoc y con la generación y la emisión de las tramas a través de esta misma red.

El bloque BUFFER realiza las funciones encargadas de almacenar la información recibida a través de la red ad-hoc y de generar la información (distancia, cambio de orientación y diferencia de altitud) sobre los módulos externos que hayan enviado una alarma de detección de accidente.

El bloque BLUETOOTH realiza las funciones relacionadas con la inicialización del módulo Bluetooth, con la recepción de los comandos de control enviados por el dispositivo móvil y con la generación y la emisión de las tramas enviadas a este mismo dispositivo.

El bloque PRINCIPAL realiza la ejecución y la planificación de las distintas tareas desarrolladas por la aplicación.

2. Implementación software

El software se ha implementado dentro de un ejecutivo cíclico [16], ya que la aplicación se encuentra dividida en diferentes tareas independientes con distintos requisitos temporales. Además, la capacidad del microprocesador (8 bits) y la escasa complejidad de la estructura de tareas hacen esta opción la más recomendable.

Un ejecutivo cíclico es una estructura de control o programa cíclico que entrelaza de forma explícita la ejecución de diversas tareas periódicas en un único procesador. El entrelazado es fijo y está definido en el denominado plan principal, siendo este la especificación del entrelazado entre las distintas tareas periódicas durante un periodo de tiempo determinado (hiperperiodo), de tal forma que su ejecución cíclica garantiza el cumplimiento de los plazos de las tareas.

Las tareas pueden ser de dos tipos distintos:

- Tareas periódicas: son aquellas que se activan regularmente en instantes de tiempo separados por un periodo de tiempo determinado y constante.
- Tareas esporádicas: son aquellas que se activan de forma irregular cada vez que se producen ciertos eventos externos.

2.1. Tareas

Las tareas desarrolladas por la aplicación y definidas en el fichero Principal.c son las siguientes:

- Reloj

Es la tarea encarga de generar el pulso de reloj de 1 ms (también denominado tick) y de llevar a cabo las temporizaciones necesarias para la activación de las alarmas de detección de accidente.

Es una tarea esporádica activada mediante interrupción cuando el número de pulsos de reloj del microprocesador equivale a un milisegundo.

Dicha tarea se vale de los ficheros recogidos por el bloque CLOCK.

- Recepción del módulo XBee (RXBee)

Es la tarea encargada de interpretar la información recibida a través del módulo XBee y de almacenar dicha información.

Es una tarea esporádica activada mediante interrupción cuando se ha recibido un byte por el puerto UART0.

Esta tarea se vale de los ficheros recogidos por los bloques XBEE, BUFFER y UART.

- Recepción del módulo GPS (RGPS)

Es la tarea encargada de la detección de las tramas GPGGA recibidas a través del módulo GPS y de interpretar la información recogida en dicha trama.

Es una tarea esporádica activada mediante interrupción cuando se ha recibido un byte por el puerto UART1.

Esta tarea se vale de los ficheros recogido por los bloques GPS y UART.

- Transmisión al módulo XBee (TXBee)

Es la tarea encargada de generar la información necesaria para conformar la trama que informa sobre la situación del módulo y de enviar dicha información a través del módulo XBee.

Es una tarea periódica que se vale de los ficheros recogidos por los bloques XBEE, GPS y UART.

- Transmisión/Recepción con el módulo Bluetooth (TBt)

Es la tarea encargada de generar la información necesaria para conformar la trama con la información exigida por la aplicación móvil y de enviar dicha información a través del módulo Bluetooth. Además, ha de obtener e interpretar la información emitida por el dispositivo móvil.

Es una tarea periódica que se vale de los ficheros recogidos por los bloques BLUETOOTH, BUFFER, GPS y SPI.

- Activación de las alarmas de detección de accidente (Alarma)

Es la tarea encargada de activar o desactivar las alarmas de detección de impacto, partiendo de los comandos de control (comando "Reset") y la información obtenida del acelerómetro.

Es una tarea periódica que se vale de los ficheros recogidos por los bloques CLOCK, ALARMA e I2C.

- Obtención de la orientación (Orient)

Es la tarea encargada de calcular la orientación del módulo con respecto al norte magnético, partiendo de la información obtenida del magnetómetro.

Es una tarea periódica que se vale de los ficheros recogidos por los bloques BRÚJULA e I2C.

2.2. Planificación de las tareas

El conjunto de tareas a planificar se recoge en la Tabla 5:

Tarea	C	D	T	S
RXBee	<0.005 ms	0.102 ms	-	0.102 ms
RGPS	<0.005 ms	0.102 ms	-	0.102 ms
Alarma	0.46 ms	20 ms	20 ms	-
Orient	0.87 ms	20 ms	20 ms	-
TBt	14.96 ms	250 ms	250 ms	-
TXBee	14.25 ms	500 ms	500 ms	-

Tabla 5. Conjunto de tareas que conforman la aplicación

Las razones por las cual se han establecido dichos periodos de las tareas Alarma, Orient, TXBee y TBt se desarrollan a continuación:

- Para muestrear de forma correcta el pico de 200 ms producido por un impacto, es necesario muestrear a una frecuencia de 50 Hz, tal y como se había establecido en el capítulo anterior. Por ello, el periodo de ejecución de la tarea Alarma es de 20 ms.
- La velocidad angular máxima aproximada a la cual el individuo portador del módulo realiza la orientación es de 50 grados/s, por lo que, para obtener un retraso en la orientación menor a 1 grado, es necesario actualizar la orientación cada 20 ms. Por esta razón, la tarea Orient posee un periodo de ejecución de 20 ms.
- El periodo de la tarea Bluetooth es de 250 ms, ya que la velocidad máxima de recepción de comandos es de 4 cada segundo (velocidad a la cual el individuo es capaz de pulsar un botón).
- El periodo de la tarea TXBee es de 500 ms, ya que el retraso de la información obtenida por el buscador sobre un módulo accidentado será menor o igual a 500 ms.

Como se puede observar la Tabla 5, el tiempo de computo máximo para la tarea RXBee y la tarea RGPS es menor de 0.005 ms, valor que se ha obtenido del tick de menor tiempo utilizado sin que la aplicación pierda su funcionalidad. Así pues, para los cálculos del hiperperiodo y del marco se utilizará el tiempo más restrictivo que es de 0.005 ms.

Otro punto a destacar es el periodo de la tarea TBt, el cual no se corresponde con los periodos de trasmisión de 1 s, 5 s y 10 s. En consecuencia, se implementará un contador de número de ejecuciones de la tarea TBt (contador de 250 ms), el cual establecerá el instante de ejecución de la trasmisión de periodo 1 s, 5 s o a 10 s. En el resto de ejecuciones de la tarea únicamente se llevará a cabo la lectura de una posible trama recibida a través del módulo Bluetooth.

Además, no se ha tenido en cuenta la tarea Reloj, ya que su tiempo máximo de cómputo es de varios ordenes de magnitud inferior al tiempo máximo de cómputo del resto de tareas.

Por último, las tareas RXBee y RGPS no se tendrán en cuenta en la planificación, ya que se trata de tareas esporádicas ejecutadas mediante interrupción, pero se comprobará que en cada uno de los marcos que conforman el marco principal haya el tiempo libre suficiente para que éstas puedan ejecutarse.

Así, el conjunto de tareas a planificar quedan reflejadas en la Tabla 6.

Tarea	C	D	T
Alarma	0.46 ms	20 ms	20 ms
Orient	0.87 ms	50 ms	50 ms
TXBee	14.25 ms	500 ms	500 ms
TBt	14.96 ms	250 ms	250 ms

Tabla 6. Conjunto de tareas a planificar

El ejecutivo cíclico consta de un marco principal de 500 ms y 25 marcos secundarios de 20 ms, todos estos valores se encuentran justificados en el anexo Planificación. La planificación queda de la siguiente forma:

Marco 1 → Ejecuta: Alarma, Orient y TXBee. La suma de tiempos más el tiempo de computo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 14.25 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 17.54\ s < m = 20\ ms$$

Marco 2 → Ejecuta: Alarma, Orient y TBt. La suma de tiempos más el tiempo de computo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 14.96 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 18.25\ ms < m = 20\ ms$$

Marco 3 → Ejecuta: Alarma y Orient. La suma de tiempos más el tiempo de computo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 6.23\ ms < m = 20\ ms$$

[…]

Marco 13 → Ejecuta: Alarma, Orient y TBt. La suma de tiempos más el tiempo de computo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 14.96 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 18.25\ ms < m = 20\ ms$$

[…]

Marco 25 → Ejecuta: Alarma, Orient y TXBee. La suma de tiempos más el tiempo de computo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 14.25 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 20.48\ ms < m = 50\ ms$$

Finalmente, se asegura el correcto cumplimiento de los requisitos temporales de cada tarea por la estructura que posee la planificación, ya que no se produce ningún desbordamiento de marco y todas las tareas se ejecutan en un marco posterior a su activación y anterior a su plazo de respuesta.

3. Drivers software

Los módulos diseñados por la empresa Geko Navsat están preparados para trabajar con librerías Arduino, implementadas en lenguaje C++. Como se ha tomado la decisión de implementar la aplicación en lenguaje C para tener un mayor control del sistema, ha sido necesario desarrollar los drivers de comunicación software para los distintos puertos serie utilizados en la aplicación.

- UART0

Para recibir y enviar información con el módulo XBee, ha sido necesario crear una serie de funciones para procesar los datos recibidos y enviados por el puerto UART0 [7] [15].

La recepción de información es activada mediante interrupción. En cambio, la emisión de información es activada enviando el primer dato de la trama que se desea transmitir y, seguidamente, activando la interrupción de transmisión. Así, al finalizar la emisión del primer dato, se continúa enviando el resto de la información contenida en la trama hasta alcanzar el ultimo valor almacenado.

La información contenida en las tramas recibidas y enviadas contiene 8 bits de longitud, más un bit de stop, que no se encuentra en el dato almacenado. La velocidad de transmisión es de 9600 bps.

- UART1

Para recibir y enviar información con módulo GPS, ha sido necesario crear una serie de funciones para procesar los datos recibidos y enviados por el puerto UART1 [7] [9].

Tanto la recepción de información, como la emisión de información, es igual que la utilizada para la comunicación a través del módulo XBee.

La información contenida en las tramas recibidas y enviadas contiene 8 bits de longitud, más un bit de stop, que no se encuentra en el dato almacenado. La velocidad de trasmisión es de 9600 bps.

- SPI

Para recibir y enviar información con el módulo Bluetooth, ha sido necesario crear una serie de funciones para procesar los datos recibidos y enviados por el puerto SPI, estableciendo como maestro de la comunicación al microprocesador y, por consiguiente, como esclavo al módulo Bluetooth [7] [14].

La emisión y recepción es simultánea y es iniciada por el maestro, el cual envía un byte a la vez que lo recibe, y seguidamente, la interrupción de transmisión es activada, para que al finalizar la transmisión del primer byte se continúe enviando el resto de bytes que componen la trama.

Si únicamente se requiere recibir bytes, el microprocesador enviará tantos bytes de valor cero como bytes posea la trama que se desea obtener.

La información contenida en las tramas recibidas y enviadas contiene 8 bits de longitud. La frecuencia del reloj de comunicación es de 125 kHz, en consecuencia, la velocidad de transmisión será de 15625 bps.

- I^2C

Para establecer la comunicación con los sensores que componen el módulo MARG, ha sido necesario crear una serie de funciones para procesar los bytes recibidos y enviados por el puerto I2C, estableciendo como maestro de la comunicación al microprocesador [7] [10] [11] [12].

Al tratarse de una comunicación a través de una única línea (bus) con una estructura de maestro (Master) – esclavo (Slave), donde el número de esclavos puede ser distinto de uno, existen unas reglas de comunicación tanto para la escritura como la lectura de un dato en un registro de cualquiera de los esclavos. Estas reglas se encuentran desarrolladas en el anexo Comunicación I^2C

Los datos enviados o recibidos a través del bus de comunicación, poseen una longitud de 8 bits. La frecuencia del bus de reloj es de 200 kHz por lo que la velocidad de transmisión es de 25 kbps.

CAPITULO 6: Pruebas de funcionamiento

1. Herramientas utilizadas en las pruebas

- Módulo 30011661-02 Rev A

Este módulo realiza la conversión UART a USB, para su posterior visualización en el ordenador mediante la utilización de un hyperterminal.

- Conversor TTL-232RG-VSW5V-WE

Este conversor es capaz de realizar la conversión de TTL de un puerto UART a USB y viceversa, permitiendo establecer una comunicación entre el módulo y el ordenador, el cual se vale de un hyperterminal.

- Hyperterminal PuTTy

Este programa permite visualizar la información serie recibida a través del puerto USB mediante la nomenclatura ASCII.

- Hora proporcionada por el módulo GPS

La trama GPGGA que aparece en las capturas realizadas durante las pruebas, contiene la hora a la cual ha sido enviada. Esta información es utilizada para comprobar el correcto cumplimiento de los tiempos requeridos en cada situación ($GPGGA , hora , …)

2. Pruebas del funcionamiento de la comunicación a través del módulo XBee

Para comprobar el correcto funcionamiento del módulo XBee, se ha comprobado que las tramas enviadas por este, posean la estructura deseada y contengan la información que se desea enviar.

La trama de pruebas enviada se encuentra estructurada de la siguiente manera:

Byte 1 → Carácter "$" para la identificación de la trama.

Byte 2 → Carácter "X" para la identificación de la trama.

Byte 3 → Carácter "B" para la identificación de la trama.

Byte 4 → Carácter "Q", el cual representa el número identificador 1 y la activación de la alarma de golpe.

Byte 5:8 → Caracteres "abcd", los cuales representan los 4 bytes que conforman una variable float.

Byte 9:12 → Caracteres "abcd", los cuales representan los 4 bytes que conforman una variable float.

Byte 13:14 → Caracteres "ab", los cuales representan los 2 bytes que conforman una variable int

Las tramas enviadas por el módulo XBee aparecen en la Figura 18, donde se puede comprobar que poseen la estructura correcta.

Figura 18. Tramas enviadas por el módulo XBee

Además, se ha comprobado visualmente durante la ejecución de la aplicación que en el buffer de trasmisión del puerto UART0 se encontraba la información correspondiente a las alarmas y la posición del módulo.

3. Pruebas de funcionamiento de la activación de las alarmas de detección de accidente y de la lectura de las tramas recibidas a través del módulo GPS

Con el objetivo de facilitar la visualización de la información, se ha modificado la estructura de las tramas enviadas por el XBee, conteniendo ahora la misma información, pero utilizando la nomenclatura ASCII. Dicha trama posee la siguiente estructura:

$XB , NI , AGPS , AC, AL , AG , AA , LONG , LAT , ALT

$XB → Identificador de la trama.

NI → Número identificador del módulo emisor de la trama.

AGPS → Medida errónea de la posición (activada “1” y desactivada “0”).

AC → Alarma crítica (activada “1” y desactivada “0”).

AL → Alarma leve (activada “1” y desactivada “0”).

AG → Alarma de golpe (activada “1” y desactivada “0”).

AA → Medida errónea de la aceleración (activada “1” y desactivada “0”).

LONG → Longitud en grados.

LAT → Latitud en grados.

ALT → Altitud en metros.

La primera situación planteada se corresponde con una pérdida de la conexión entre el GPS y el satélite. Esto implica una activación de la alarma AGPS y la trasmisión del valor nulo de posición, tal y como podemos observar en las tramas enviadas por el módulo GPS de la Figura 19. También podemos observar la trama GPGGA obtenida del módulo GPS para cada una de las tramas enviadas.

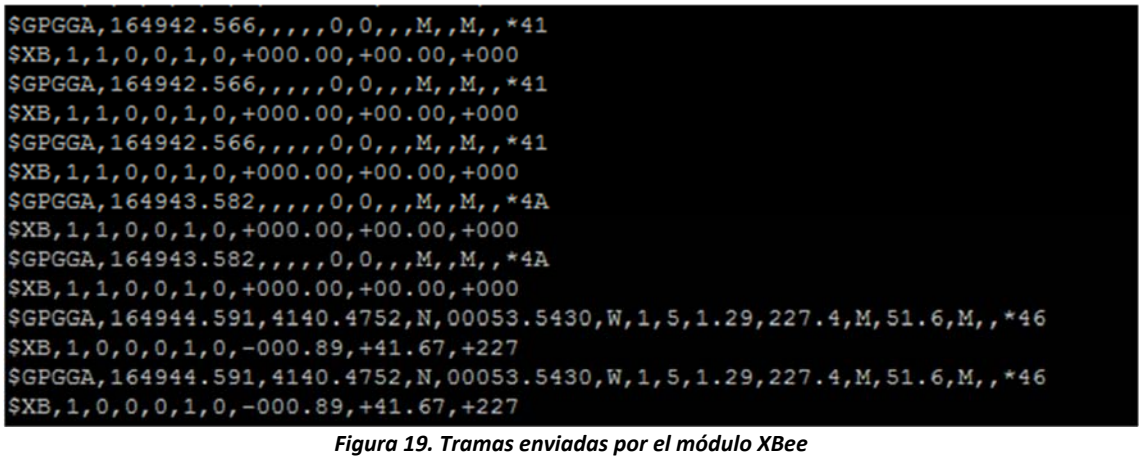


Figura 19. Tramas enviadas por el módulo XBee

Además, se produce la activación de la alarma AL debido a que la prueba se ha realizado con el módulo inmóvil.

La segunda situación planteada se corresponde con la intermitencia en el movimiento del portador, lo que supone determinados momentos en los cuales el portador se encuentra inmóvil. Esto supone una activación y desactivación de la AL, tal y como podemos observar en la Figura 20. También, es posible observar que la posición enviada por el módulo GPS se corresponde con la posición trasmitida por el módulo XBee.

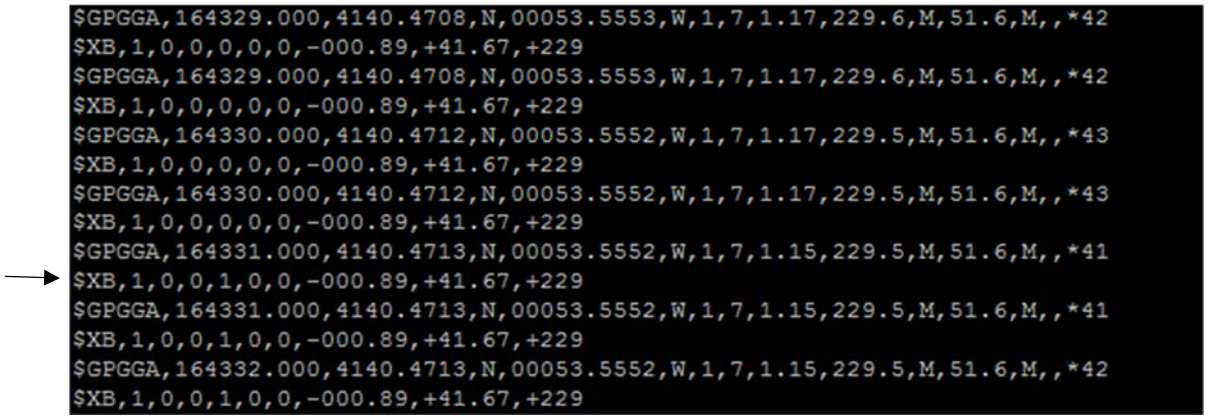


Figura 20. Tramas enviadas por el módulo XBee

La tercera situación planteada se corresponde con un impacto sufrido por el portador del módulo, el cual queda lesionado y se sitúa en una localización más adecuada para su estado. En consecuencia, se ha de activar la alarma AG y, después de trascurrir las dos esperas de 30 segundos, ha de mantenerse la alarma AG, ya que el portador no se ha desplazado una distancia mayor de 10 metros, y no ha de activarse la alarma AC, ya que el portador no se encuentra inmóvil, por lo que la alarma AL no se encuentra activa. En las Figuras 21 y 22, encontramos la sucesión de dichos acontecimientos descritos mediante las tramas enviadas por el módulo XBee, donde el impacto y la finalización de las temporizaciones se encuentran resaltadas por una flecha.

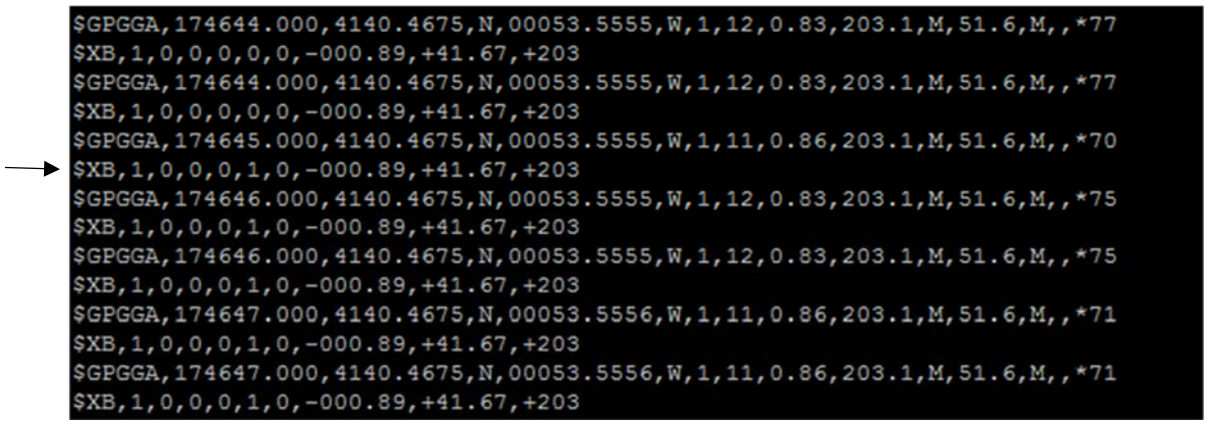


Figura 21. Tramas enviadas por el módulo XBee

```
$GPGGA,174744.000,4140.4722,N,00053.5577,W,1,12,0.85,204.9,M,51.6,M,,*7C
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174744.000,4140.4722,N,00053.5577,W,1,12,0.85,204.9,M,51.6,M,,*7C
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174745.000,4140.4726,N,00053.5575,W,1,12,0.85,204.9,M,51.6,M,,*7B
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174745.000,4140.4726,N,00053.5575,W,1,12,0.85,204.9,M,51.6,M,,*7B
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174746.000,4140.4730,N,00053.5575,W,1,12,0.85,205.0,M,51.6,M,,*77
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+205
$GPGGA,174746.000,4140.4730,N,00053.5575,W,1,12,0.85,205.0,M,51.6,M,,*77
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+205
$GPGGA,174747.000,4140.4730,N,00053.5575,W,1,12,0.85,205.0,M,51.6,M,,*76
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+205
```

Figura 22. Tramas enviadas por el módulo XBee

La cuarta situación planteada se corresponde con un impacto sufrido por el portador del módulo, el cual queda inconsciente. Esto supone una activación de la alarma AG y, después de transcurrir las dos temporizaciones de 30 segundos, ha de activarse la alarma AC y mantenerse la alarma AG, ya que el portador se encuentra inmóvil, indicado por la activación de la alarma AL. En las Figuras 23 y 24, encontramos la sucesión de dichos acontecimientos descritos mediante las tramas enviadas por el módulo XBee, donde el impacto y la finalización de las temporizaciones se encuentran resaltadas por una flecha.

```
$GPGGA,174002.000,4140.4692,N,00053.5555,W,1,10,0.95,206.5,M,51.6,M,,*7E
$XB,1,0,0,0,0,0,-000.89,+41.67,+206
$GPGGA,174002.000,4140.4692,N,00053.5555,W,1,10,0.95,206.5,M,51.6,M,,*7E
$XB,1,0,0,0,0,0,-000.89,+41.67,+206
$GPGGA,174003.000,4140.4691,N,00053.5555,W,1,9,1.01,206.5,M,51.6,M,,*48
$XB,1,0,0,0,0,0,-000.89,+41.67,+206
$GPGGA,174003.000,4140.4691,N,00053.5555,W,1,9,1.01,206.5,M,51.6,M,,*48
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+206
$GPGGA,174004.000,4140.4686,N,00053.5558,W,1,9,0.97,206.5,M,51.6,M,,*4A
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+206
$GPGGA,174004.000,4140.4686,N,00053.5558,W,1,9,0.97,206.5,M,51.6,M,,*4A
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+206
$GPGGA,174005.000,4140.4686,N,00053.5557,W,1,9,1.01,206.4,M,51.6,M,,*4B
$XB,1,0,0,0,1,0,-000.89,+41.67,+206
```

Figura 23. Tramas enviadas por el módulo XBee

```
$GPGGA,174102.000,4140.4712,N,00053.5549,W,1,10,0.92,204.5,M,51.6,M,,*7E
$XB,1,0,0,1,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174102.000,4140.4712,N,00053.5549,W,1,10,0.92,204.5,M,51.6,M,,*7E
$XB,1,0,0,1,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174103.000,4140.4712,N,00053.5549,W,1,10,0.92,204.5,M,51.6,M,,*7F
$XB,1,0,0,1,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174103.000,4140.4712,N,00053.5549,W,1,10,0.92,204.5,M,51.6,M,,*7F
$XB,1,0,0,1,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174104.000,4140.4711,N,00053.5550,W,1,10,0.92,204.5,M,51.6,M,,*73
$XB,1,0,1,1,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174104.000,4140.4711,N,00053.5550,W,1,10,0.92,204.5,M,51.6,M,,*73
$XB,1,0,1,1,1,0,-000.89,+41.67,+204
$GPGGA,174105.000,4140.4710,N,00053.5550,W,1,10,0.92,204.5,M,51.6,M,,*73
$XB,1,0,1,1,1,0,-000.89,+41.67,+204
```

Figura 24. Tramas enviadas por el módulo XBee

La última situación planteada se corresponde con la detección de un falso impacto producido por un movimiento brusco por parte del portador. En consecuencia, se produce la activación de la alarma AG, y, después de transcurrir las dos temporizaciones de 30 segundos,

ha de desactivarse la alarma AG y no activarse la alarma AC, ya que el sujetó ha continuado su recorrido, desplazándose una distancia mayor de 10 durante la segunda temporización y no se encuentra inmóvil al no estar activa la alarma AL. En las Figuras 25 y 26, encontramos la sucesión de dichos acontecimientos descritos mediante las tramas enviadas por el módulo XBee, donde el impacto y la finalización de las temporizaciones se encuentran resaltadas por una flecha.

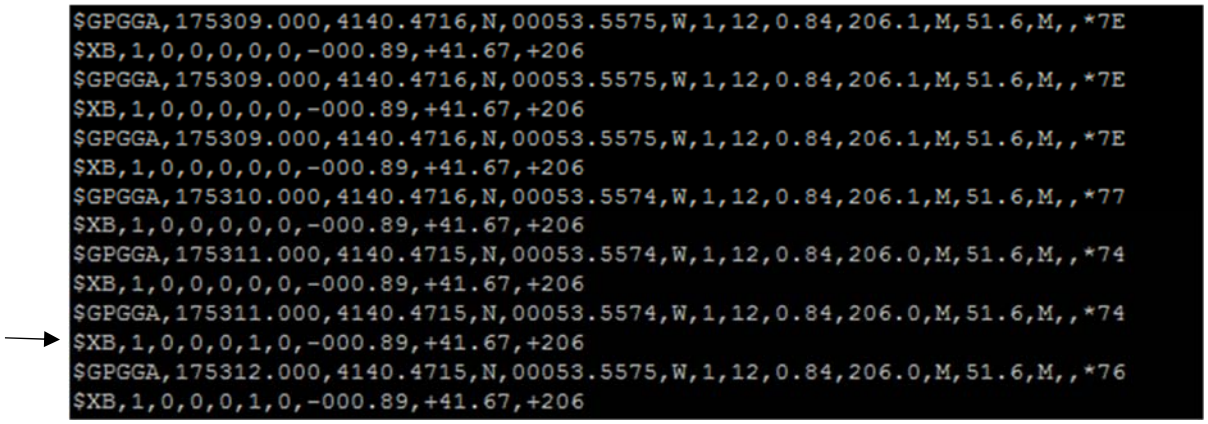


Figura 25. Tramas enviadas por el módulo XBee

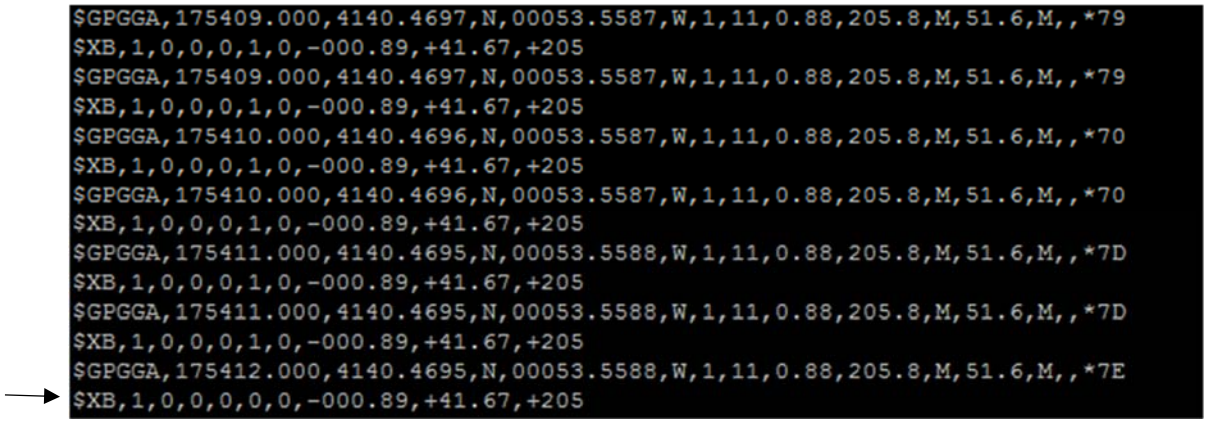


Figura 26. Tramas enviadas por el módulo XBee

4. Pruebas del funcionamiento de la brújula 2D

Para comprobar el funcionamiento del cálculo de la orientación con respecto al norte magnético, se ha recogido una serie de valores de orientación calculados para unas determinadas orientaciones del módulo. Posteriormente se ha calculado el error medio cometido por el módulo. Esta información se encuentra recogida en la Tabla 7.

Orientación (grados)	Orientación Calculada (grados)	Error (grados)
0,00	1,40	1,40
0,00	357,30	2,70
0,00	359,94	0,06
90,00	87,71	2,29
90,00	91,37	1,37
90,00	85,17	4,83
180,00	188,33	8,33
180,00	183,33	3,33
180,00	184,45	4,45
270,00	261,82	8,18
270,00	264,62	5,38
270,00	263,58	6,42
	Error Medio (grados)	4,06

Tabla 7. Valores de orientación obtenidos por el módulo

Un error de 4.06 grados es despreciable, ya que el error humano cometido por el individuo buscador es de un orden de magnitud mayor, aproximadamente +/- 10 grados.

5. Pruebas del funcionamiento de la comunicación con la aplicación móvil

Para comprobar el correcto funcionamiento del puerto SPI, se ha comprobado que las tramas enviadas por este posean la estructura deseada y contengan la información que se desea enviar.

La trama de pruebas enviada que contiene la información del módulo se encuentra estructurada de la siguiente manera:

Byte 1 → Carácter “&” para la identificación de la trama.

Byte 2 → Carácter “B” para la identificación de la trama.

Byte 3 → Carácter “T” para la identificación de la trama.

Byte 4 → Carácter “A”, el cual representa el número identificador 1 y la activación de la alarma de golpe.

Byte 5:8 → Caracteres “abcd”, los cuales representan los 4 bytes que conforman una variable float.

Byte 9:12 → Caracteres “abcd”, los cuales representan los 4 bytes que conforman una variable float.

Byte 13:14 → Caracteres “ab”, los cuales representan los 2 bytes que conforman una variable int

Byte 15 → Carácter “A”, el cual representa el número identificador 1 y la activación de la alarma de golpe.

Byte 16:19 → Caracteres “abcd”, los cuales representan los 4 bytes que conforman una variable float.

Byte 20:23 → Caracteres “abcd”, los cuales representan los 4 bytes que conforman una variable float.

Byte 24 → Carácter “X”, que representa la instrucción “R” / ”L”.

Byte 25:26 → Caracteres “ab”, los cuales representan los 2 bytes que conforman una variable int

Byte 27 → Carácter “X”, que representa la instrucción “U” / ”D” .

Las tramas enviadas a través del módulo Bluetooth aparecen en la Figura 27, donde se puede comprobar que poseen la estructura y la información correcta.

```
&BTAabcdabcdabEAabcdabcdXabX
&BTAabcdabcdabEAabcdabcdXabX
&BTAabcdabcdabEAabcdabcdXabX
&BTAabcdabcdabEAabcdabcdXabX
&BTAabcdabcdabEAabcdabcdXabX
&BTAabcdabcdabEAabcdabcdXabX
&BTAabcdabcdabEAabcdabcdXabX
```

Figura 27. Tramas enviadas por el puerto SPI

Además, se ha comprobado visualmente durante la ejecución de la aplicación que en el buffer de transmisión del puerto SPI se encontraba la información correspondiente a las alarmas y la posición del módulo y la información correspondiente a los módulos accidentados.

6. Pruebas de funcionamiento del cálculo de la distancia y de la orientación

Con el objetivo de facilitar la visualización de la información, se ha modificado la estructura de las tramas enviadas por el puerto SPI, conteniendo ahora la misma información, pero utilizando la nomenclatura ASCII. La estructura de dicha trama se describe a continuación.

Para la trama que almacena la información del módulo, la estructura es la siguiente:

&BT , NI , AGPS , A_LGC , EG , EM , AB , LONG , LAT , ALT , NA

&BT → Identificador de la trama.

NI → Número identificador del módulo emisor de la trama.

AGPS → Medida errónea de la posición (activada “1” y desactivada “0”).

A_LGC → Alarma leve activada o alarma de golpe activada o alarma crítica activada (una o varias alarmas activas “1” y todas desactivadas “0”).

EG → Medida errónea de la velocidad angular (activada “1” y desactivada “0”).

EM → Medida errónea del campo magnético (activada “1” y desactivada “0”).

AB → Medida errónea de la orientación (activada “1” y desactivada “0”).

LONG → Longitud en grados.

LAT → Latitud en grados.

ALT → Altitud en metros.

NA → Número de módulos que han enviado una alarma de detección de accidente.

Para la trama que almacena la información de un módulo el cual ha enviado una alarma de detección de accidente, la estructura es la siguiente:

NI , AGPS , AC, AL , AG , AA , DIST , DIR , DDIR, DIF , DDIF

NI → Número identificador del módulo emisor de la trama.

AGPS → Medida errónea de la posición (activada “1” y desactivada “0”).

AC → Alarma crítica (activada “1” y desactivada “0”).

AL → Alarma leve (activada “1” y desactivada “0”).

AG → Alarma de golpe (activada “1” y desactivada “0”).

AA → Medida errónea de la aceleración (activada “1” y desactivada “0”).

DIST → Distancia en metro entre el módulo y el módulo emisor de la alarma de detección de accidente.

DIR → Cambio de dirección del módulo para apuntar al módulo emisor de la alarma de detección de accidente.

DDIR → Indica si el cambio de dirección es hacia la derecha (“R”)o hacia la izquierda (“L”).

DIF → Diferencia de altura entre el módulo y el módulo emisor de la alarma de detección de accidente.

DDIF →Indica si la diferencia de altitud es positiva (“U”) o negativa (“D”).

Para comprobar el correcto cálculo de la distancia y la posición entre el módulo y el módulo emisor de la alarma de detección de impacto, se plantea una situación en la cual hay tres módulos. De uno de estos módulos se obtendrá la información transmitida por el puerto SPI y al cual llamaremos módulo 1 (Punto A de las Figuras 28 y 29). Los módulos restantes serán llamados módulo 2 (Punto B de la Figura 28) y módulo 3 (Punto B de la Figura 29).

La distancia del módulo 1 al módulo 2 es de 50.2 metros y la dirección con respecto al norte magnético es de 70,59 grados. La distancia del módulo 1 al módulo 3 es de 115,5 m y la dirección con respecto al norte magnético es de 112,67 grados.

Figura 28. Posición módulo 1 y módulo 2

Figura 29. Posición módulo 1 y módulo 3

Orientando el módulo 1 en dirección al norte magnético, se obtiene las tramas recogidas en la Figura 30. En ella se puede observar que tanto la distancia como la dirección poseen valores similares a los proporcionados anteriormente. En consecuencia, se puede asegurar el correcto cálculo de la distancia y de la dirección.

Además, cabe destacar la diferencia entre las distintas tramas enviadas. En la primera de ellas, ni el módulo 2 ni el módulo 3 han enviado una alarma de detección de accidente, por lo que únicamente se transmite la información del módulo 1. Al transcurrir entre 0 y 5 segundos, se produce la activación de una de estas alarmas por parte del módulo 2. En consecuencia, la información transmitida se corresponde con el módulo 1 y el módulo 2. Al transcurrir entre 5 y 10 segundos, la alarma enviada por el módulo 2 sigue activa y el módulo 3 envía una alarma de detección de impactos. En consecuencia, la información transmitida engloba a los tres módulos.

```
$GPGGA,191039.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,6,1.44,219.9,M,51.6,M,,*42
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,0
$GPGGA,191045.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,6,1.44,219.9,M,51.6,M,,*49
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,0
$GPGGA,191051.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,6,1.44,219.9,M,51.6,M,,*4C
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,0
$GPGGA,191057.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,6,1.44,219.9,M,51.6,M,,*4A
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,1,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+074.33,R,+001,D
$GPGGA,191103.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,6,1.44,219.9,M,51.6,M,,*4A
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,1,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+074.55,R,+001,D
$GPGGA,191109.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,6,1.44,219.9,M,51.6,M,,*40
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+073.91,R,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+114.37,R,+000,U
```

Figura 30. Tramas enviadas por el puerto SPI

Seguidamente se procede a cambiar la dirección del módulo 1 en el sentido de las agujas del reloj. Como se puede observar en las Figuras 31, 32 y 33, el cambio de dirección hacia la derecha va disminuyendo hasta alcanzar el valor cero. A partir de este punto, distinto para el módulo 2 y el módulo 3, el cambio de dirección va aumentando, pero en este caso es un cambio de dirección hacia la izquierda.

```
$GPGGA,191109.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,6,1.44,219.9,M,51.6,M,,*40
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+073.91,R,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+114.37,R,+000,U
$GPGGA,191115.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,7,1.34,219.9,M,51.6,M,,*4B
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+073.50,R,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+113.96,R,+000,U
$GPGGA,191121.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,8,1.22,219.9,M,51.6,M,,*44
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+044.67,R,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+085.13,R,+000,U
```

Figura 31. Tramas enviadas por el puerto SPI

```
$GPGGA,191127.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,8,1.22,219.9,M,51.6,M,,*42
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+011.69,R,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+052.14,R,+000,U
$GPGGA,191133.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,8,1.22,219.9,M,51.6,M,,*47
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+001.50,L,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+038.95,R,+000,U
$GPGGA,191139.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,8,1.22,219.9,M,51.6,M,,*4D
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+020.70,L,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+019.75,R,+000,U
```

Figura 32. Tramas enviadas por el puerto SPI

```
$GPGGA,191145.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,8,1.22,219.9,M,51.6,M,,*46
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+032.98,L,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+007.47,R,+000,U
$GPGGA,191151.000,4140.4678,N,00053.5574,W,1,8,1.22,219.9,M,51.6,M,,*43
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+048.87,L,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+008.41,L,+000,U
$GPGGA,191157.000,4140.4678,N,00053.5571,W,1,7,1.34,219.9,M,51.6,M,,*48
&BT,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+219,2,
2,0,1,0,0,0,+00050.36,+064.33,L,+001,D,
3,0,1,0,0,0,+00117.41,+023.87,L,+000,U
```

Figura 33. Tramas enviadas por el puerto SPI

Finalmente, se procede a comprobar la correcta lectura de los comandos de control recibidos a través del puerto SPI. En las Figuras 34, 35, 36, 37 y 38, podemos observar la correcta modificación en la transmisión de las tramas tras recibir los comandos &0 (Desactivación de la transmisión), &1 (Reset), &2 (transmisión cada segundo), &3 (transmisión cada 5 segundos) y &4 (transmisión cada 10 segundos).

```
$GPGGA,120655.000,4140.4665,N,00053.5437,W,1,7,1.33,283.4,M,51.6,M,,*41
&,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+283,0
$GPGGA,120705.000,4140.4663,N,00053.5440,W,1,8,1.13,279.7,M,51.6,M,,*48
&,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+279,0
&2$GPGGA,120706.000,4140.4662,N,00053.5440,W,1,7,1.33,279.6,M,51.6,M,,*46
&,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+279,0
$GPGGA,120707.000,4140.4661,N,00053.5440,W,1,7,1.33,279.6,M,51.6,M,,*44
&,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+279,0
```

Figura 34. Recepción del comando &2

```
$GPGGA,120523.000,4140.4611,N,00053.5293,W,1,8,1.30,403.3,M,51.6,M,,*4D
&,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+403,0
$GPGGA,120524.000,4140.4602,N,00053.5295,W,1,8,1.30,399.1,M,51.6,M,,*48
&,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+399,0
&3$GPGGA,120529.000,4140.4614,N,00053.5307,W,1,9,1.12,384.8,M,51.6,M,,*4C
&,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+384,0
$GPGGA,120534.000,4140.4614,N,00053.5315,W,1,9,1.12,381.5,M,51.6,M,,*4B
&,1,0,1,0,0,0,-000.89,+41.67,+381,0
```

Figura 35. Recepción del comando &3

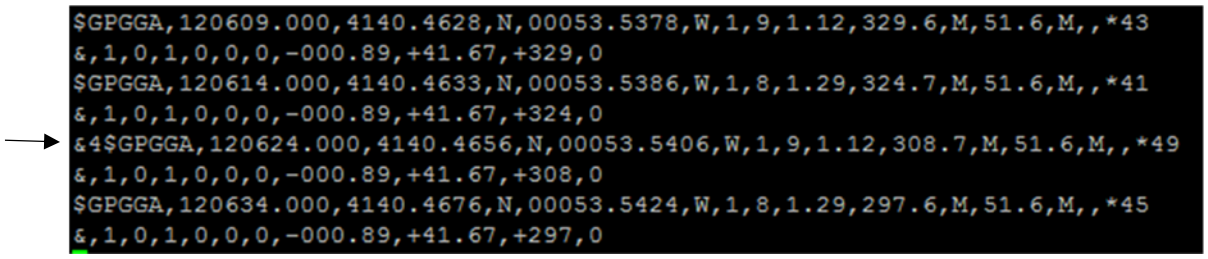


Figura 36. Recepción del comando &4

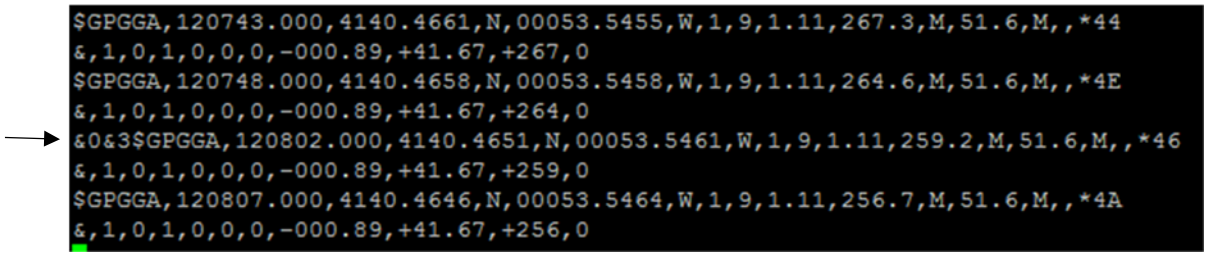


Figura 37. Recepción del comando &0

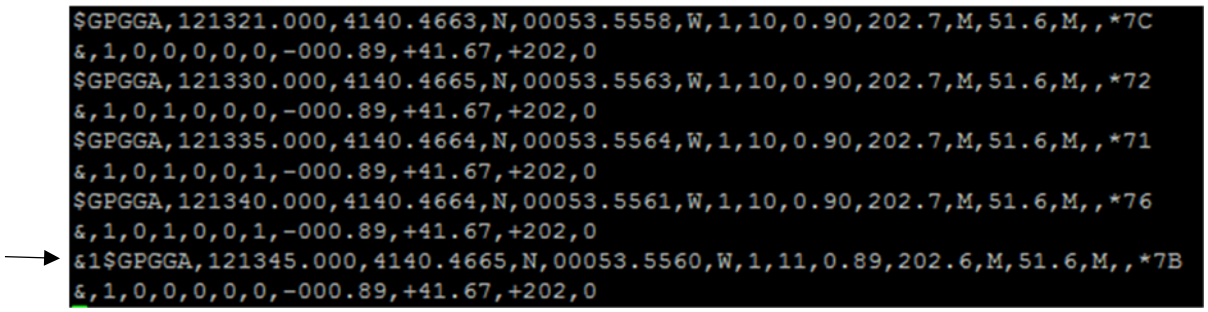


Figura 38. Recepción del comando &1

CAPITULO 7: Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto ha sido el diseño de una aplicación para la localización y búsqueda, la cual debía ser capaz de guiar a un individuo hasta otro individuo accidentado. Todo ello se ha desarrollado a partir de los módulos KYNEO V0.2 suministrados por la empresa Geko Navsat.

El objetivo principal ha sido dividido en cinco subobjetivos: obtención de la posición GPS de cada módulo, compartir dicha información entre los diferentes módulos que componen la red ad-hoc, obtener y enviar las instrucciones de búsqueda a través del módulo Bluetooth y obtener los comandos de control recibido a través del módulo Bluetooth.

Se ha diseñado un driver de comunicación software para el puerto UART1, estableciendo un canal de comunicación con el módulo GNSS. Además, se ha implementado un paquete de manejo de las tramas NMEA, el cual permite gestionar la recepción y el envio de tramas GNSS, las identifica y las interpreta.

Se ha diseñado un driver de comunicación software para el puerto UART0, estableciendo un canal de comunicación con el módulo XBee. Además, se ha implementado un paquete de manejo de la red ad-hoc, el cual permite gestionar la recepción y el envio de las tramas de posicionamiento y alarma de los módulos, las cuales genera, identifica, interpreta y almacena.

Para la generación de alarmas, ha sido necesario implementar un paquete de funciones para la activación y desactivación de las alarmas, las cuales se valen de la información suministrada por el acelerómetro.

Se ha diseñado un driver de comunicación software para el puerto SPI, estableciendo un canal de comunicación con el módulo Bluetooth. Además, se ha implementado un paquete de manejo de la comunicación con la aplicación móvil, el cual permite identificar, interpretar y gestionar la recepción de los comandos de control. También permite generar y enviar las instrucciones de búsqueda.

Para la generación de las instrucciones de búsqueda, ha sido necesario implementar una brújula para determinar la orientación del individuo buscador partiendo de la información suministrada por el magnetómetro. También ha sido necesario implementar un paquete de funciones para el cálculo de la distancia y la dirección entre el módulo buscador y un módulo emisor de una alarma de detección de accidente.

Todas las tareas independientes realizadas por la aplicación se han implementado dentro de un ejecutivo cíclico, permitiendo así la ejecución de cada una de las tareas y el cumplimiento de los requisitos temporales impuestos por cada una de ellas.

Una aproximación del tamaño de la aplicación desarrollada es el número de líneas de código implementadas para su correcto funcionamiento, 3654 líneas.

Finalmente, se ha llevado a cabo una serie de pruebas de funcionamiento, las cuales indican el correcto funcionamiento de la aplicación, ya que suministraba las instrucciones de búsqueda correctas para la localización de un módulo emisor de una alarma de detección de accidente.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Wilmshurst Tim. *Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers*. Elsevier, 2007.

[2] Sutter. *Ed. Embedded Systems Firmware Demystified*. CMP Books. 2002.

[3] Benito Úbeda Miñarro. *Sistemas embebidos. http://ocw.um.es/ingenierias/sistemas-embebidos/material-de-clase-1/ssee-t01.pdf*. 2009.

[4] Antonio Nadal Galiana Llinares. *Sistemas embebidos. http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/PAEEES/2005-06/A07%-20%20Sistemas%20Embebidos.pdf.* 2012.

[5] Raúl Sánchez Vítores. *Estado del arte de los sistemas embebidos. http://www.coitt.es/res/revistas/Antena161_05_Reportaje.pdf*. 2005.

[6] Sun Earth Tools. *Distancia y ángulo de orientación. http://www.sunearthtools.com/es/tools/distance.php. 2016.*

[7] Atmel. *Datasheet ATmega 1284P. http://www.atmel.com/images/doc8059.pdf.* 2009.

[8] Atmel. *Atmel Studio 7.0 RELEASE NOTE. http://www.atmel.com/Images/Atmel%20Studio%207.0.1006%20Release%20Notes.pdf*. 2016.

[9] GlobalTop Technology Inc. *Gms-gp GNSS Module Datasheet. http://www.alphamicrowireless.com/media/513113/globaltop-gms-g9-datasheet-v0e.pdf*. 2012.

[10] Honeywell. *3-Axis Digital Compass IC HMC5883. https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf*. 2013.

[11] InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. https://www.cdiweb.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf*. 2013.

[12] InvenSense. *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.0. https://store.invensense.com/Datasheets/invensense/RM-MPU-6000A.pdf*. 2012.

[13] measurement SPECIALTIES. *MS5611-01BA01 Variometer Module. http://www.daedalus.ei.tum.de/attachments/article/61/MS5611-01BA01.pdf*. 2011.

[14] Laird. *BT730 Series. http://www.mouser.com/catalog/specsheets/LWS-DS-BT730-0713.pdf*. 2013.

[15] Difi International. *XBee-PRO 868 RF Modules. https://elmicro.com/files/digi/xbee-pro-868-manual.pdf*. 2011.

[16] Jose Luis Villarroel Salcedo. Aplicaciones concurrentes y Ejecutivos cíclicos.2015.

ANEXOS

Módulo de posicionamiento y búsqueda basado en GPS y redes ad-hoc

Anexo: Unidad de procesamiento y puertos de expansión del módulo KYNEO V0.2

A continuación, se describe microcontrolador y los puertos de expansión integrados en el módulo KYNEO V0.2.

- Unidad de Procesamiento

El módulo KINEO V0.2 incluye un microcontrolador ATmega1284P con un rendimiento de hasta 1 MIPS/MHz que soporta velocidades de reloj de hasta 20 MHz (en este caso trabajará a 16 MHz). Se trata de un microcontrolador de Atmel AVR de 8-bit que dispone de 128 kB de memoria flash, 16 kB de memoria SRAM y 4 kB de memoria EEPROM, y hasta 32 pines de entrada y salida de propósito general.

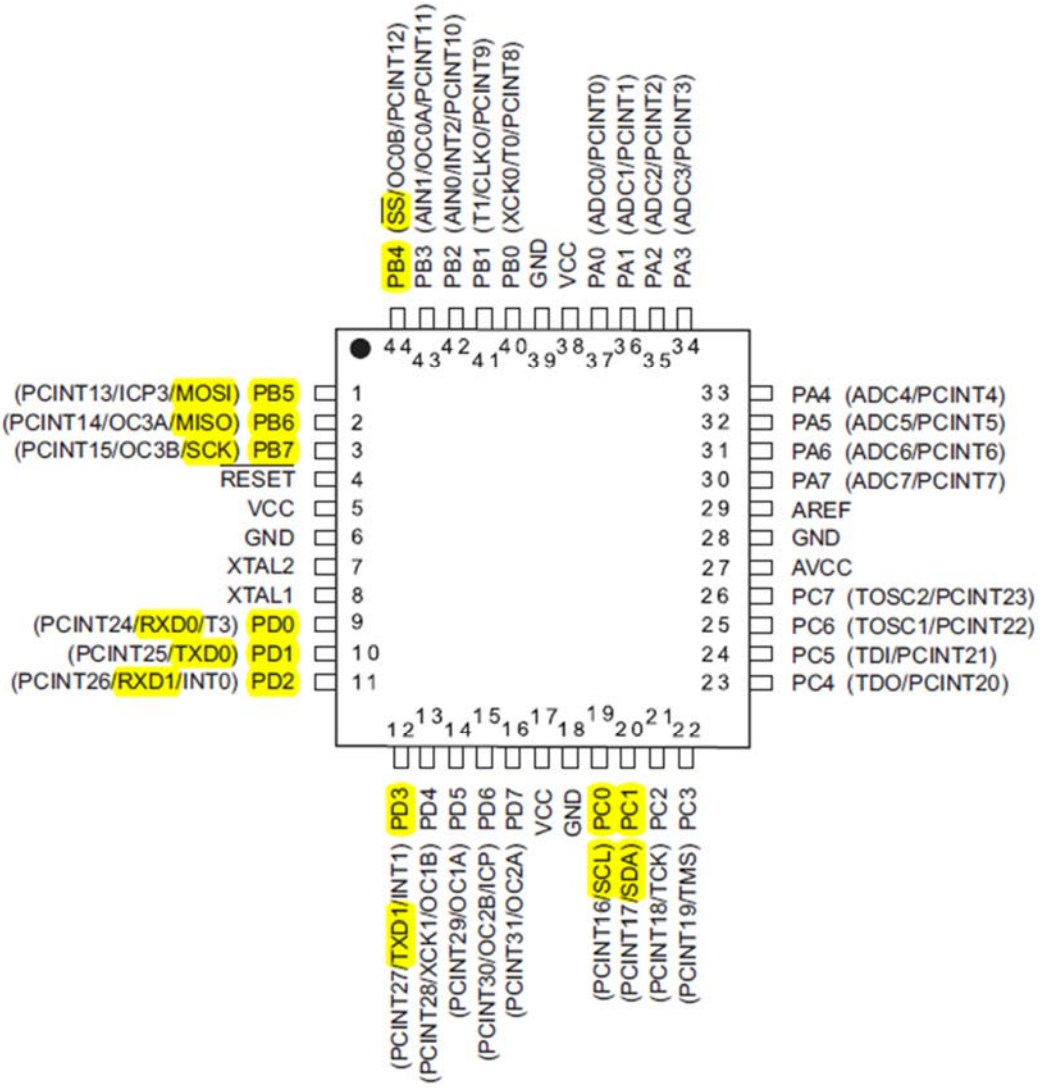


Figura 39. Configuración de los pines del microcontrolador ATmega1284P [7]

- Puertos de Expansión

En ambos laterales del módulo, se hayan dos puertos de expansión que permiten conectar otros dispositivos mediante los interfaces de comunicación UART, SPI e I2C. La conexión de estas líneas se muestra en la Tablas 8 y 9.

P1	Nomenclatura	Función/es	Utilización
1	PB3 / AIN1 / OC0A / PCINT11	Línea digital. Modulación por ancho de pulso.	Disponible
2	PD4 / OC1B / XCK1 / PCINT28	Línea digital. Modulación por ancho de pulso.	Disponible
3	PC0 / SCL / PCINT16	Línea digital. Reloj de interfaz I2C.	I2C
4	PC1 / SDA / PCINT17	Línea digital. Bus de datos de interfaz I2C.	I2C
5	PC2 / TCK / PCINT18	Línea digital. Reloj de temporizador.	Disponible
6	PC3 / TMS / PCINT19	Línea digital.	Disponible
7	PC4 / TDO / PCINT20	Línea digital.	Disponible
8	PC5 / TDI / PCINT21	Línea digital.	Disponible
9	PD0 / T3 / RXD0 / PCINT24	Línea digital. Línea de recepción UART0.	UART0
10	PD1 / TXD0 / PCINT25	Línea digital. Línea de transmisión UART0.	UART0
11	PD2 / INT0 / RXD1 / PCINT26	Línea digital. Línea de recepción UART1.	UART1
12	PD3 / INT1 / TXD1 / PCINT27	Línea digital. Línea de transmisión UART1.	UART1
13	+3V3	Tensión de alimentación 3.3 V regulada.	Alimentación

Tabla 8. Puerto de expansión P1

P1	Nomenclatura	Función/es	Utilización
1	PB4 / SS / OC0B / PCINT12	Línea digital. Slave Select por defecto (SPI)	SPI
2	PB5 / MOSI / ICP3 / PCINT13	Línea digital. Bus direccional MOSI (SPI)	SPI
3	PB6 / MISO / OC3A / PCINT14	Línea digital. Bus direccional MISO (SPI)	SPI
4	PB7 / SCK / OC3B / PCINT15	Línea digital. Reloj de interfaz SPI.	SPI
5	RESET	Reset del sistema, activo a nivel bajo.	RESET
6	PD6 / ICP / OC2B / PCINT30	Línea digital. Modulación por ancho de pulso.	Disponible
7	PD7 / OC2A / PCINT31	Línea digital. Modulación por ancho de pulso.	Disponible
8	PA1 / ADC1 / PCINT1	Entrada analógica. Interrupción cambio de entrada.	Disponible
9	PA2 / ADC2 / PCINT2	Entrada analógica. Interrupción cambio de entrada.	Disponible
10	PA3 / ADC3 / PCINT3	Entrada analógica. Interrupción cambio de entrada.	Disponible
11	AREF	Referencia de tensión para entradas analógicas.	Disponible
12	GND	Tensión de referencia / Masa del circuito.	Alimentación
13	+5V	Tensión de alimentación 5 V regulada.	Alimentación

Tabla 9. Puerto de expansión P2

En color oro se han recalcado los pines utilizados para la comunicación con los distintos módulos utilizados en la aplicación.

Anexo: Calibración del acelerómetro

A continuación, se lleva a cabo la calibración del giróscopo. Dicho procedimiento consiste en obtener el offset de medida del sensor (error medio).

Los valores de medida de la aceleración obtenidos para la calibración del acelerómetro se recogen en la Tabla 10.

Medida	X (m/s2)	Y (m/s2)	Z (m/s2)	Módulo
1	-0,30625	0,87568	-9,32148	9,3675287
2	-0,17226	1,00967	-9,31670	9,3728334
3	-0,15791	0,77998	-9,28320	9,3172478
4	0,00000	0,89004	-9,34063	9,38293379
5	-0,27275	0,88525	-9,32627	9,37215942
6	-0,11484	0,91396	-9,29277	9,33831575
7	-0,15313	0,97617	-9,34541	9,39750197
8	0,05264	0,86132	-9,36455	9,40422455
9	0,03350	0,80390	-9,27363	9,30847174
10	-0,10018	0,77998	-9,35020	9,38320681

Tabla 10. Medidas de la aceleración

Los valores de error medio obtenidos se recogen en la Tabla 11.

	X (m/s2)	Y (m/s2)	Z (m/s2)
Error medio	0,1191183	-0.877595	-0,4785163

Tabla 11. Error medio de los valores de aceleración

Tras aplicar los valores de corrección tomados del error medio, las medidas obtenidas quedan tal y como se muestra en la Tabla 12.

Medida	X (m/s2)	Y (m/s2)	Z (m/s2)	Módulo	Error (m/s2)
1	-0,18713	-0,00192	-9,80000	9,80178	-0,00178
2	-0,05314	0,13208	-9,79522	9,79625	0,00375
3	-0,03879	-0,09762	-9,76172	9,76228	0,03772
4	0,11912	0,01245	-9,81914	9,81987	-0,01987
5	-0,15363	0,00765	-9,80479	9,80599	-0,00599
6	0,00428	0,03637	-9,77129	9,77136	0,02864
7	-0,03401	0,09858	-9,82393	9,82448	-0,02448
8	0,17175	-0,01628	-9,84307	9,84458	-0,04458
9	0,15261	-0,07370	-9,75215	9,75362	0,04638
10	0,01894	-0,09762	-9,82871	9,82922	-0,02922
				Error medio	-0,00094

Tabla 12. Medidas de la aceleración tras aplicar la corrección

Anexo: Calibración del giróscopo

A continuación, se lleva a cabo la calibración del giróscopo. Dicho procedimiento consiste en obtener el offset de medida del sensor (error medio).

Los valores de medida de velocidad angular obtenidos para la calibración del giróscopo se recogen en la Tabla 13.

Medida	X (º/s)	Y (º/s)	Z (º/s)	Modulo
1	-1,7099	-0,9924	73,4962	73,5228
2	-1,1603	-0,0611	73,5267	73,5359
3	-1,1756	-0,1374	72,7939	72,8035
4	-1,0534	-0,3511	73,2824	73,2909
5	-1,0382	-0,1069	73,3435	73,3509
6	-1,0387	0,1221	72,7481	72,7556
7	-1,3435	-0,1832	72,3664	72,3791
8	-1,0382	-0,1985	72,5802	72,5878
9	-0,3359	0,3511	72,0611	72,0627
10	-1,2672	-0,0153	71,7099	71,7211

Tabla 13. Medidas de la velocidad angular

Los valores de error medio obtenidos se recogen en la Tabla 14.

	X (º/s)	Y (º/s)	Z (º/s)
Error medio	1,1161	0.1573	-72,7908

Tabla 14. Error medio de los valores de velocidad angular

Tras aplicar los valores de corrección tomados del error medio, las medidas obtenidas quedan tal y como se muestra en la Tabla 15.

Modulo	Medida	X (º/s)	Y (º/s)	Z (º/s)	Módulo	Error (º/s)
73,5228	1	-0,5938	-0,8351	0,7054	1,2440	1,2440
73,5359	2	-0,0442	0,0962	0,7359	0,7435	0,7435
72,8035	3	-0,0595	0,0198	0,0031	0,0628	0,0628
73,2909	4	0,0626	-0,1939	0,4916	0,5322	0,5322
73,3509	5	0,0779	0,0504	0,5527	0,5604	0,5604
72,7556	6	0,0774	0,2794	-0,0427	0,2930	0,2930
72,3791	7	-0,2274	-0,0260	-0,4244	0,4822	0,4822
72,5878	8	0,0779	-0,0412	-0,2107	0,2284	0,2284
72,0627	9	0,7802	0,5084	-0,7298	1,1831	1,1831
71,7211	10	-0,1511	0,1420	-1,0809	1,1006	1,1006
					Error medio	0,6430

Tabla 15. Medidas de la velocidad angular tras aplicar la corrección

Anexo: Calibración del magnetómetro

A continuación, se lleva a cabo la calibración del magnetómetro. Dicho procedimiento consiste en obtener el offset de medida del sensor (Error medio).

Los valores de medida del campo magnético en las direcciones X e Y, tangentes a la superficie terrestre, se recogen en la Tabla 16.

Orientación norte (º)	X (Ga)	Y (Ga)	Modulo
0	-0,187	-0,397	0,439
45	0,109	-0,236	0,260
90	0,249	0,093	0,266
135	0,116	0,518	0,530
180	-0,204	0,598	0,632
225	-0,614	0,476	0,777
270	-0,661	0,050	0,663
315	-0,479	-0,292	0,561
180	-0,188	0,579	0,609

Tabla 16. Medidas del campo magnético

En la Figura 40 se representa en los ejes X e Y las medidas tomadas.

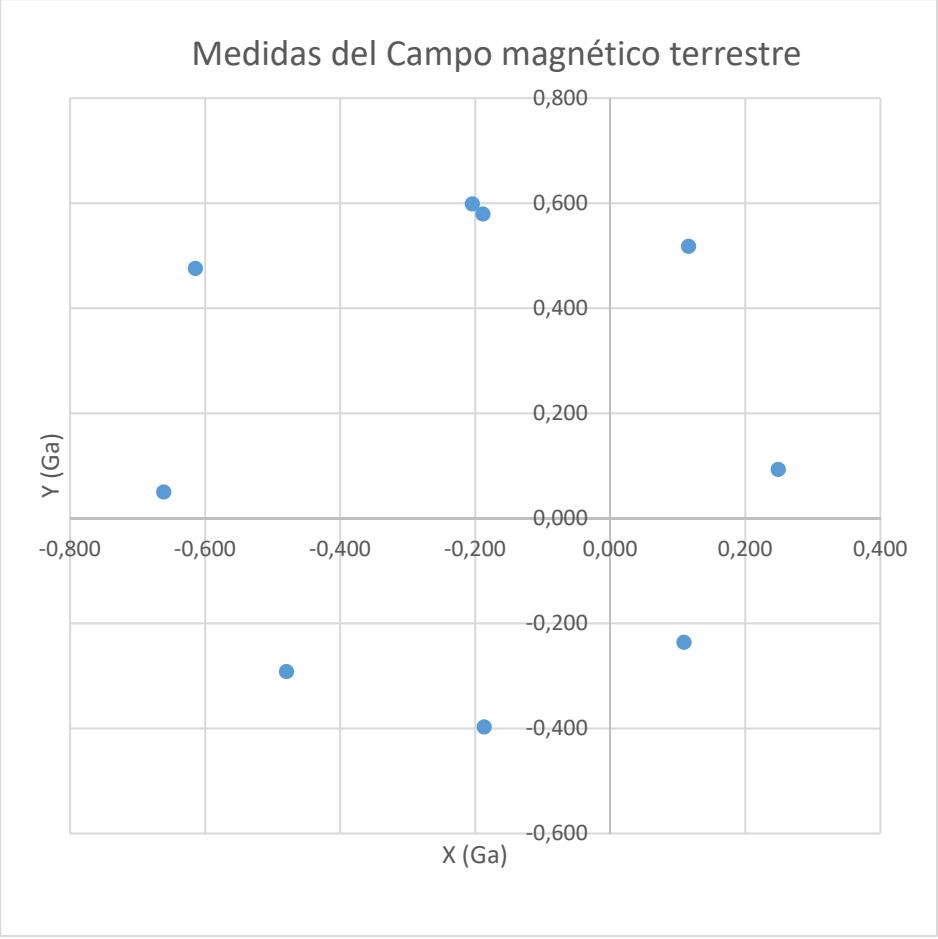


Figura 40. Representación X – Y de las medidas de campo magnético

Los valores de error medio obtenidos se recogen en la Tabla 17.

	X (Ga)	Y (Ga)
Error medio	0,206055	-0,09082

Tabla 17. Error medio de las medidas de campo magnético

Tras aplicar los valores de corrección tomados de la desviación media, las medidas obtenidas quedan tal y como se muestra en la Tabla 18.

Orientación norte (º)	X (Ga)	Y (Ga)	Modulo	Argumento (rad)	Normalización (º)	Error (º)
0	0,020	-0,488	0,489	-1,531	2,288	2,288
45	0,315	-0,327	0,454	-0,804	43,953	1,047
90	0,455	0,002	0,455	0,004	90,246	0,246
135	0,322	0,427	0,535	0,924	142,943	7,943
180	0,002	0,507	0,507	1,567	179,782	0,218
225	-0,408	0,385	0,561	0,756	226,691	1,691
270	-0,455	-0,041	0,457	-0,090	275,150	5,150
315	-0,273	-0,383	0,470	-0,951	324,464	9,464
180	0,018	0,488	0,489	1,535	182,059	2,059
					Error medio	1,773

Tabla 18. Medidas del campo magnético tras aplicar la corrección

En la Figura 41 se representa en los ejes X e Y los valores obtenidos tras la corrección.

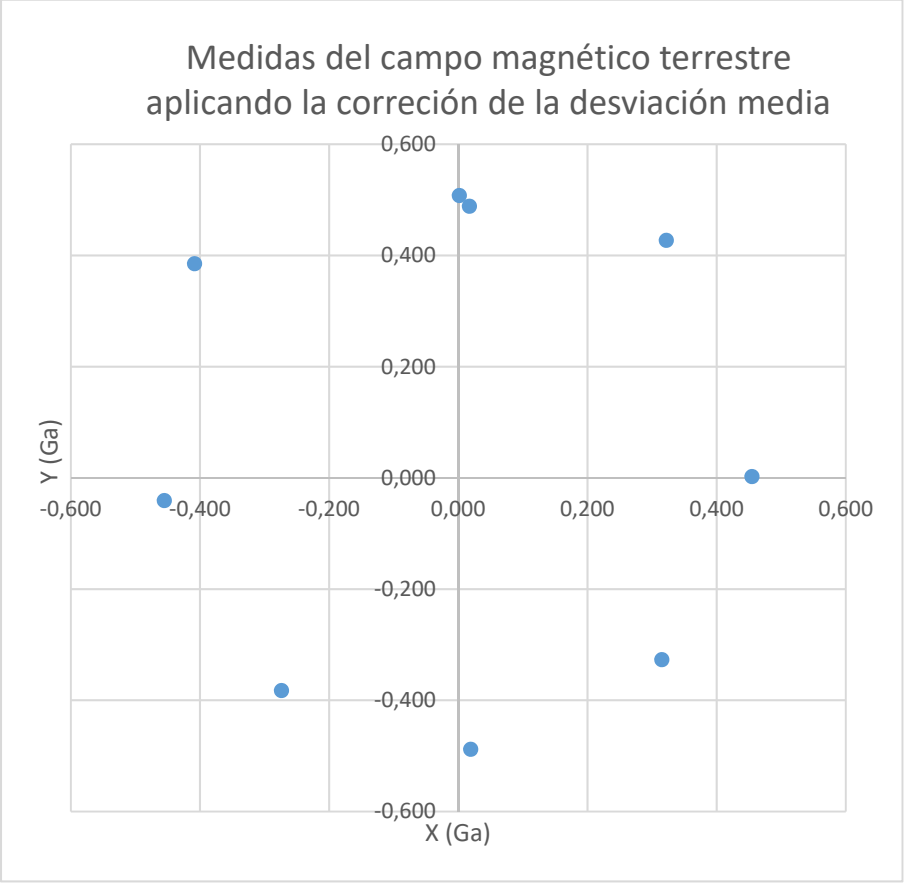


Figura 41. Representación X-Y de las medidas del campo magnético tras la corrección

Como el módulo del campo magnético no es relevante para la aplicación, se trabaja con valores unitarios, eliminando así la posible influencia de los valores extremos de X e Y sobre el argumento, quedando así la representación gráfica de la Figura 42.

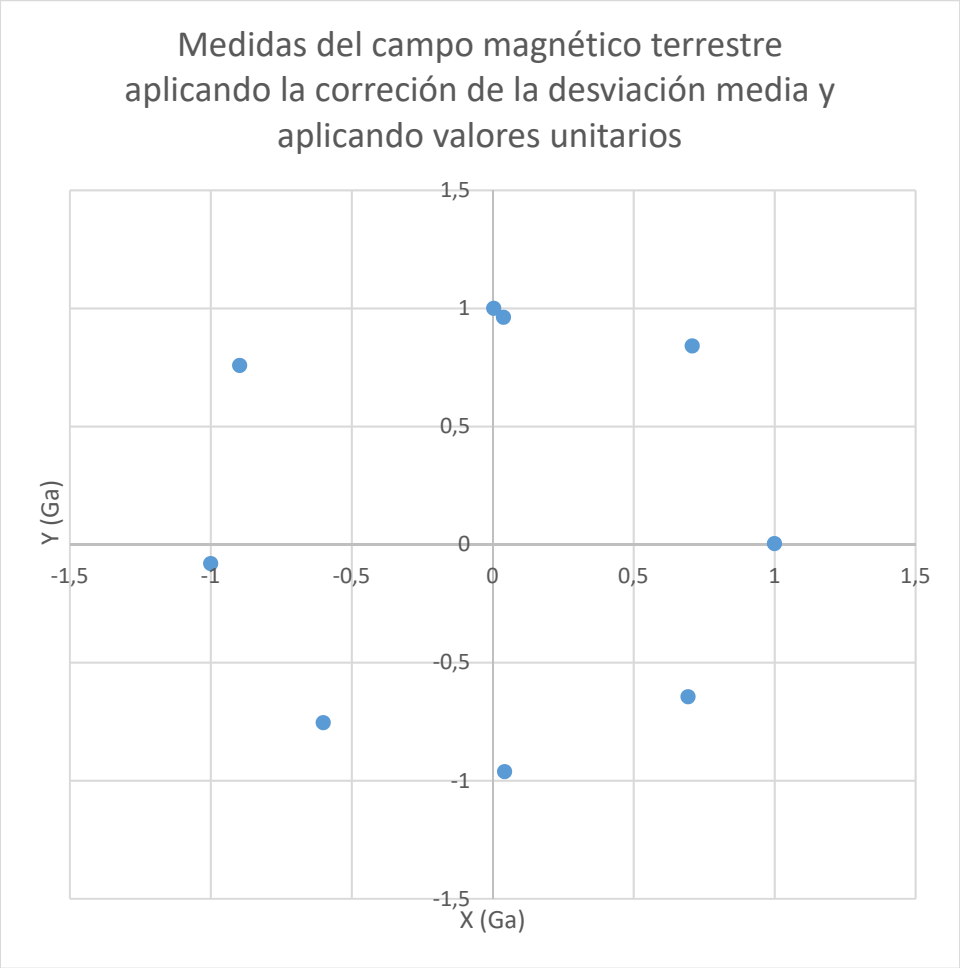


Figura 42. Representación X-Y de las medidas de campo magnético tras la corrección y con valores unitarios

Anexo: Planificación

El conjunto de tareas que conforman la aplicación se recogen en la Tabla 19.

Tarea	C	D	T	S
RXBee	<0.005 ms	0.102 ms	-	0.102 ms
RGPS	<0.005 ms	0.102 ms	-	0.102 ms
Alarma	0.46 ms	20 ms	20 ms	-
Orient	0.87 ms	50 ms	50 ms	
TXBee	14.25 ms	500 ms	500 ms	-
TBt	14.96 ms	250	250	-

Tabla 19. Conjunto de tareas que conforman la aplicación

El conjunto de tareas a planificar se recoge en la Tabla 20.

Tarea	C	D	T
Alarma	0.46 ms	20 ms	20 ms
Orient	0.87 ms	20 ms	20 ms
TXBee	14.25 ms	500 ms	500 ms
TBt	14.96 ms	250 ms	250 ms

Tabla 20. Conjunto de tareas a planificar

Se comienza seleccionando la duración del hiperperiodo M:

$$M = mcm\ (20, 20, 250{,}500) = 500$$

A continuación, se comprueba qué duración del marco (m) cumple las condiciones necesarias para que todas las tareas cumplan plazos y no se produzca desbordamiento:

$$m\ \leq \min(D_i)\ , m \geq \max(C_i)\ , \exists k: M = k * m\ \rightarrow m = 20$$

Se elige m = 20, ya que es marco de mayor tamaño posible, lo que evitará en mayor medida realizar la partición de alguna de las tareas.

Se comprueba que para m = 20 se cumpla la última condición:

$$Alarma: 20 + \big(20 - mcd(20{,}20)\big) = 20\ \leq 20$$

$$Orient: 20 + \big(20 - mcd(20{,}20)\big) = 20 \leq 20$$

$$TXBee: 20 + \big(20 - mcd(20{,}250)\big) = 30 \leq 250$$

$$TBt: 20 + \big(20 - mcd(20{,}500)\big) = 20 \leq 500$$

Finalmente, el ejecutivo cíclico consta de un marco principal de 500 ms y 25 marcos secundarios de 20 ms. La planificación queda de esta forma:

Marco 1 → Ejecuta: Alarma, Orient y TXBee. La suma de tiempo más el tiempo de cómputo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 14.25 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 17.54\ s < m = 20\ ms$$

Marco 2 → Ejecuta: Alarma, Orient y TBt. La suma de tiempo más el tiempo de cómputo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 14.96 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 18.25\, ms < m = 20\, ms$$

Marco 3 → Ejecuta: Alarma y Orient. La suma de tiempo más el tiempo de cómputo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 6.23\, ms < m = 20\, ms$$

[…]

Marco 13 → Ejecuta: Alarma, Orient y TBt. La suma de tiempo más el tiempo de cómputo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 14.96 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 18.25\, ms < m = 20\, ms$$

[…]

Marco 25 → Ejecuta: Alarma, Orient y TXBee. La suma de tiempo más el tiempo de cómputo de las tareas RXBee y RGPS es:

$$0.46 + 0.87 + 14.25 + 2 * 0.005 * \frac{20}{0.102} = 20.48\, ms < m = 50\, ms$$

Como se puede observar, en ninguno de los marcos se produce ningún desbordamiento, por lo que el ejecutivo cíclico funcionará de forma correcta.

Anexo: Comunicación I^2C

Las reglas de comunicación I2C utilizadas para la lectura y escritura de los registros de los diferentes sensores que componen la unidad MARG se describen en las siguientes imágenes.

Las reglas para la lectura de datos se presentan en las Figuras 43 y 44:

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		

Figura 43. Reglas de comunicación I2C para la lectura de un registro [11]

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			ACK		NACK	P
Slave			ACK		ACK			ACK	DATA		DATA		

Figura 44. Reglas de comunicación I2C para la lectura de varios registros consecutivos [11]

Las reglas para la escritura de datos se presentan en las Figuras 45 y 46:

Master	S	AD+W		RA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK	

Figura 45. Reglas de comunicación I2C para la escritura de un registro [11]

Master	S	AD+W		RA		DATA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK		ACK	

Figura 46. Reglas de comunicación I2C para la escritura de varios registros consecutivos [11]

Las abreviaturas utilizadas en las figuras anteriores tienen el siguiente significado:

S → Comando START de comienzo de la comunicación

P → Comando STOP de finalización de la comunicación

AD + W → Dirección del esclavo + Comando de escritura WRITE

AD + R → Dirección del esclavo + Comando de lectura READ

RA → Puntero a la dirección de memoria del esclavo RA

DATA → Dato enviado por el maestro o dato enviado por el esclavo

ACK → Comando o dato recibido

NACK → Comando o dato recibido y finalización de la lectura o de la escritura

Anexo: Fichero SCI.c

Código implementado en el fichero SCI.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

#include "sci.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of local functions                    */
/*****************************************************************************/

static void (*scia_tx_callback)(void);  // Función que hace de puntero a un
argumento de SCIa_Init().
static void (*scib_tx_callback)(void);  // Función que hace de puntero a un
argumento de SCIb_Init().
static void (*scia_rx_callback)(unsigned char);  // Función que hace de puntero a
un argumento de SCIa_Init();
static void (*scib_rx_callback)(unsigned char);  // Función que hace de puntero a
un argumento de SCIb_Init();

static void SCIARX_ISR (void) ; // Función ejecutable en la interrupción del SCIa
para la recepción de un dato.
static void SCIBRX_ISR (void) ; // Función ejecutable en la interrupción del SCIb
para la recepción de un dato.
static void SCIATX_ISR (void) ; // Función ejecutable en la interrupción del SCIa
para la trasmisión de un dato.
static void SCIBTX_ISR (void) ; // Función ejecutable en la interrupción del SCIb
para la trasmisión de un dato.

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of exported functions                 */
/*****************************************************************************/

void SCIa_Init(void (*tx_int)(void), void (*rx_int)(unsigned char)); // Función
de inicialización del UART0.
void SCIb_Init(void (*tx_int)(void), void (*rx_int)(unsigned char)); // Función
de inicialización del UART1.
void SCIa_PutChar(unsigned char Send_Data); // Función que trasmite un char por
el UART0.
void SCIa_TXINT(TX_STATUS st); // Función que habilita la interrupción  trasmitir
un dato por la UART0.
void SCIb_PutChar(unsigned char Send_Data); // Función que trasmite un char por
el UART1.
void SCIb_TXINT(TX_STATUS st); // Función que habilita la interrupción al
trasmitir un dato por la UART1.

/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

// Inicialización de la SCIa
```

```
void SCIa_Init(void (*tx_int)(void), void (*rx_int)(unsigned char))
  {
       /* Para una frecuencia de oscilación (fosc) de 8MHz y
         una velocidad de trasmisión (BR) de 9600 bps obtenemos
         un BRR de 51 (BR=fosc/16(BRR+1)) */

       const unsigned int BRR = 103 ;
       UBRR0 = BRR ;

   /* SCI - USART Control and Status Register B
            RXEN - Habilitación de la recepción
                    TXEN - Habilitación de la trasmisión
                    RXCIE - Habilitación de la interrupción de recepción
                    TXCIE - Habilitación de la interrupción de trasmisión */

       UCSR0B = (1<<RXEN0)|(1<<TXEN0)|(1<<RXCIE0)|(0<<TXCIE0);

   /* SCI - USART Control and Status Register C
            USBS - Un bit de stop
                    UCSZ - 8 bits para el dato */

       UCSR0C = (0<<USBS0)|(3<<UCSZ00) ;

       // Asignamos las funciones del argumento
       scia_tx_callback=tx_int;
       scia_rx_callback=rx_int;

   return ;
}

// Inicialización de la SCIb
void SCIb_Init(void (*tx_int)(void), void (*rx_int)(unsigned char))
  {
       /* Para una frecuencia de oscilación (fosc) de 8MHz y
         una velocidad de trasmisión (BR) de 9600 bps obtenemos
         un BRR de 51 (BR=fosc/16(BRR+1)) */

   const unsigned int BRR = 103 ;

   UBRR1 = BRR ;

   /* SCI - USART Control and Status Register A */

   /* SCI - USART Control and Status Register B
            RXEN - Habilitación de la recepción
                    TXEN - Habilitación de la trasmisión
                    RXCIE - Habilitación de la interrupción de recepción
                    TXCIE - Habilitación de la interrupción de trasmisión */

       UCSR1B = (1<<RXEN1)|(1<<TXEN1)|(1<<RXCIE1)|(0<<TXCIE1);

   /* SCI - USART Control and Status Register C
            USBS - one stop bit
                    UCSZ - 8 bits data size */

       UCSR1C = (0<<USBS1)|(3<<UCSZ10) ;

       // Asignamos las funciones del argumento
       scib_tx_callback=tx_int;
       scib_rx_callback=rx_int;

   return ;
```

```
}

// Enviar dato por la UART0
void SCIa_PutChar(unsigned char Send_Data)
{
  while(!(UCSR0A & (1<<UDRE0))); // Esperamos a que el registro haya enviado
  UDR0 = Send_Data;              // Escribimos el dato en el registro de envio

  return ;
}

// Habilitación de la interrupción de trasmisión de la UART0
void SCIa_TXINT(TX_STATUS st) {
       if (st == ENABLED) UCSR0B |= (1<<TXCIE0) ; // Interrupción deshabilitada
       else UCSR0B = (1<<RXEN0)|(1<<TXEN0)|(1<<RXCIE0)|(0<<TXCIE0) ; //
Interrupción habilitada
}

// Enviar dato por la UART1
void SCIb_PutChar(unsigned char Send_Data)
{
  while(!(UCSR1A & (1<<UDRE1))); // Esperamos a que el registro haya enviado
  UDR1 = Send_Data;              // Escribimos el dato en el registro de envio

  return ;
}

// Habilitación de la interrupción al enviar por UART1
void SCIb_TXINT(TX_STATUS st) {
       if (st == ENABLED) UCSR1B |= (1<<TXCIE1) ; // Interrupción deshabilitada
       else UCSR1B &= ~(0<<TXCIE1) ;  // Interrupción habilitada
}


/*****************************************************************************/
/*                          Local functions                                  */
/*****************************************************************************/

// Interrupción de recepción del SCIa
 ISR (USART0_RX_vect)
 {
       SCIARX_ISR () ;
 }

 static void SCIARX_ISR (void)
 {
       unsigned char SCI0_Data ;

       SCI0_Data = UDR0 ; // Reset del flag de la interrupción

       if(scia_rx_callback != 0)
       (*scia_rx_callback)(SCI0_Data); // Ejecutamos la función asignada en la
inicialización

 }

// Interrupción de trasmisión del SCIa
 ISR (USART0_TX_vect)
 {
       SCIATX_ISR () ;
 }
```

```
 static void SCIATX_ISR (void)
 {

        if(scia_tx_callback != 0)
        (*scia_tx_callback)(); // Ejecutamos la función asignada en la
inicialización

 }

// Interrupción de recepción del SCIb
 ISR (USART1_RX_vect)
 {
        SCIBRX_ISR () ;
 }

 static void SCIBRX_ISR (void)
 {
        unsigned char SCI0_Data ;

        SCI0_Data = UDR1 ; // Reset del flag de la interrupción

        if(scib_rx_callback != 0)
        (*scib_rx_callback)(SCI0_Data); // Ejecutamos la función asignada en la
interrupción

 }

// Interrupción de trasmisión del SCIb
 ISR (USART1_TX_vect)
 {
        SCIBTX_ISR () ;
 }


 static void SCIBTX_ISR (void)
 {

        if(scib_tx_callback != 0)
        (*scib_tx_callback)(); // Ejecutamos la función asignada en la
interrupción

 }
```

Anexo: Fichero SCI.h

Código implementado en el fichero SCI.h:

```
#ifndef _SCI_H
#define _SCI_H

/*****************************************************************************/
/*                          Typedefs and structures                          */
/*****************************************************************************/

typedef enum {ENABLED, DISABLED} TX_STATUS ; // Activar o desactivar las
interrupciones de trasmisión

/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

void SCIa_Init(void (*tx_int)(void), void (*rx_int)(unsigned char)); // Función
de inicialización del UART0.
void SCIb_Init(void (*tx_int)(void), void (*rx_int)(unsigned char)); // Función
de inicialización del UART1.
void SCIa_PutChar(unsigned char Send_Data); // Función que trasmite un char por
el UART0.
void SCIa_TXINT(TX_STATUS st); // Función que habilita la interrupción  trasmitir
un dato por la UART0.
void SCIb_PutChar(unsigned char Send_Data); // Función que trasmite un char por
el UART1.
void SCIb_TXINT(TX_STATUS st); // Función que habilita la interrupción al
trasmitir un dato por la UART1.


#endif
```

Anexo: Fichero SPI.c

Código implementado en el fichero SPI.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include "SPI.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of local functions                    */
/*****************************************************************************/

static void (*spi_tx_callback)(unsigned char); // Función que hace de puntero a
un argumento
static void (*spi_rx_callback)(unsigned char); // Función que hace de puntero a
un argumento

static void SPITRX_ISR (void); // Función ejecutable en la interrupción del SPI

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of exported functions                 */
/*****************************************************************************/

void SPI_MasterTransmit(char cData); // Trasmisión de un byte por el SPI
void SPI_MasterInit(void (*tx_int)(unsigned char),void (*rx_int)(unsigned char));
// Inicialización del SPI
void SPI_SPIE(TRX_STATUS st); // Función que habilita / deshabilita la
interrupción SPI

/*****************************************************************************/
/*                          exported functions                               */
/*****************************************************************************/

// Inicialización del SPI
void SPI_MasterInit(void (*tx_int)(unsigned char), void (*rx_int)(unsigned char))
{

	/* Establecemos como salida el puerto MOSI y SCK y como entradas el MISO y
SS */
	DDRB = (1<<DDB5)|(1<<DDB7);
	PORTB = (1<<PORTB4); // Conectado con resistencia de pull-up para evitar
valor 0 y entrada en modo esclavo


	/* SPCR: SPI Control Register
		SPIE >> habilitación de la interrupción
		SPE  >> habilitación de la comunicación SPI
		DORD >> inicio de la comunicación a partir del LSB o el MSB
		MSTR >> Selección de la función de Master
		CPOL >> polaridad del reloj (pulsos de subida)
		CPHA >> Envio de datos con el flanco de subida.
		SPR0/1 >> Selección de la frecuencia de reloj. // 14204 bps - 15625
	*/
```

```
	SPCR =
(1<<SPIE)|(1<<SPE)|(1<<MSTR)|(1<<SPR1)|(1<<SPR0)|(0<<CPOL)|(0<<CPHA)|(0<<DORD);

	/* SPSR: SPI Status Register
		SPIF >> Flag de finalización de la trasmisión (Flag de
interrupción)
		SPI2X >> Bit para completar la selección de la frecuencia de reloj.
	*/

	SPSR = (0<<SPI2X);

	// Asignamos las funciones del argumento
	spi_tx_callback = tx_int;
	spi_rx_callback = rx_int;

}

// Trasmisión de un byte a través del SPI
void SPI_MasterTransmit(char cData)
{
	/* Comenzamos la trasmisión con la escritura del dato a trasmitir */
	SPDR = cData;
	/* Esperamos a la finalización de la tramisión */
	//while(!(SPSR & (1<<SPIF))); //eliminado al usar interrupciones

}

// Habilitación / Deshabilitación de la interrupción
void SPI_SPIE(TRX_STATUS st)
{
	if (st == ENABLEDSPI) SPCR |= (1<<SPIE); // Interrupción habilitada
	else SPCR &= ~(0<<SPIE); // Interrupción deshabilitada
}


/*************************************************************************/
/*                        local functions
*/
/*************************************************************************/

// Interrupción de fin de trasmisión del SPI
ISR (SPI_STC_vect)
{
	SPITRX_ISR ();
}

// Función que ejecutamos en la interrupción tras finalizar la trasmisión SPI
static void SPITRX_ISR(void)
{
	unsigned char SPI_Data;

	SPI_Data = SPDR;

	if(spi_rx_callback !=0)
	(*spi_rx_callback)(SPI_Data); // Ejecutamos la función asignada para la
interrupción (Recepción)

	if(spi_tx_callback != 0)
	(*spi_tx_callback)(SPI_Data); // Ejecutamos la función asignada para la
interrupción (Trasmisión)
}
```

Anexo: Fichero SPI.h

Código implementado en el fichero SPI.h:

```
#ifndef SPI_H_
#define SPI_H_

/*****************************************************************************/
/*                        Typedefs and structures                            */
/*****************************************************************************/

typedef enum {ENABLEDSPI, DISABLEDSPI} TRX_STATUS ; // Variable que utilizamos
para habilitar o deshabilatar las interrupciones

/*****************************************************************************/
/*                        Exported functions                                 */
/*****************************************************************************/

void SPI_MasterTransmit(char cData); // Tramisión de un byte a través del SPI
void SPI_MasterInit(void (*tx_int)(unsigned char), void (*rx_int)(unsigned
char)); // Inicialización del SPI
void SPI_SPIE(TRX_STATUS st); // Función que habilita / deshabilita la
interrupción SPI

#endif /* SPI_H_ */
```

Anexo: Fichero I2C.c

Código implementado en el fichero I2C.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <compat/twi.h>

#include "I2C.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/
#define MAX_TRIES 50 // Número máximo de intento para establecer la comunicación

#define I2C_START 0 // Indicativo para la trasmisión del comando START
#define I2C_DATA_ACK  1 // Indicativo para el comienzo de la trasmisión/lectura
de un dato
#define I2C_DATA_NACK 2 // Indicativo para la lectura del ultimo dato
#define I2C_STOP  3 // Indicativo para la trasmisión del comando STOP

static MAGNETOMETER_Data Measure_Magnetometer;
static ACCELEROMETER_Data Measure_Accelerometer;
static GYROSCOPE_Data Measure_Gyroscope;

static int Magnetometer_Measure_Trasmited;
static int Gyroscope_Measure_Trasmited;
static int Accelerometer_Measure_Trasmited;

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of local functions                    */
/*****************************************************************************/

static unsigned char i2c_transmit(unsigned char type); // Set de los bits
necesarós para la trasmisión
static void Accelerometer_Gyroscope_Init (void); // Inicialización del los
registros del MPU6050
static void Magnetometer_Init (void); // Inicialización de los registros del
magnetómetro
static int i2c_write_byte(unsigned int i2c_register, char data, I2C_SENSOR
sensor); // Escritura de un byte en un registro de los sensores
static int i2c_read (double *valueX, double *valueY, double *valueZ, I2C_SENSOR
sensor); // Lectura de 16 bits de las medidas en los ejes X, Y y Z de los
sensores
static int i2c_read_byte (int* data, unsigned int i2c_register, I2C_SENSOR
sensor);
static void Magnetometer_Init (void); // Inicialización Magnetómetro
static void Accelerometer_Gyroscope_Init (void); // Inicialización acelerómetro y
giróscopo

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of exported functions                 */
/*****************************************************************************/

void I2C_Init(void); // Inicialización de la comunicación 2-wire y de los
sensores
GYROSCOPE_Data Get_Data_Gyroscope (void); // Lectura de las medidas
```

```
MAGNETOMETER_Data Get_Data_Magnetometer (void); // Lectura de las medidas
ACCELEROMETER_Data Get_Data_Accelerometer (void); // Lectura de las medidas
int Received_Measure_Magnetometer (void); // Informa sobre la correcta lectura de
las medidas
int Received_Measure_Gyroscope (void); // Informa sobre la correcta lectura de
las medidas
int Received_Measure_Accelerometer (void); // Informa sobre la correcta lectura
de las medidas
void Get_Measure_Magnetometer (void); // Obtiene las medidas
void Get_Measure_Accelerometer (void); // Obtiene las medidas
void Get_Measure_Gyroscope (void); // Obtiene las medidas

/****************************************************************************/
/*                          exported functions
*/
/****************************************************************************/

// Inicialización de la comunicación 2-wire y de los sensores
void I2C_Init(void)
{

       /*TWBR: Bit rate register
              SCL frequency = (CPU Clock frequency)/(16+2*TWBR*4^(TWPS))
              Con TWPS = 1 y TWBR = 3 >>> SCLf = 200 kHz
       */

       TWBR = 0b00000011; // 3

       /* TWSR: TWI Status Register
              TWPS >> Prescaler (TWPS0 y TWPS1)
       */

       TWSR = (0<<TWPS1)|(0<<TWPS0);

       /* TWCR: TWI Control Register
              TWEA >> Activamos/Desacitvamos de la comunicación
              TWEN >> Habilitación de la comunicación
              TWIE >> Habilitación de la interrupción
       */

       TWCR = (0<<TWEA)|(1<<TWEN)|(0<<TWIE);

       // Inicialización de los sensores

       Accelerometer_Gyroscope_Init();
       Magnetometer_Init();

}

// Lectura de las medidas
void Get_Measure_Magnetometer (void){
       if(i2c_read(&Measure_Magnetometer.X, &Measure_Magnetometer.Z,
&Measure_Magnetometer.Y, MAGNETOMETER)){
              Magnetometer_Measure_Trasmited = 1;
              } else {
              Magnetometer_Measure_Trasmited = 0;
       }
}

// Lectura de las medidas
void Get_Measure_Accelerometer (void){
```

```
	if(i2c_read(&Measure_Accelerometer.X, &Measure_Accelerometer.Y,
&Measure_Accelerometer.Z, ACCELEROMETER)){
		Accelerometer_Measure_Trasmited = 1;
		} else {
		Accelerometer_Measure_Trasmited = 0;
	}
}

// Lectura de las medidas
void Get_Measure_Gyroscope (void){
	if(i2c_read(&Measure_Gyroscope.X, &Measure_Gyroscope.Y,
&Measure_Gyroscope.Z, GYROSCOPE)){
		Gyroscope_Measure_Trasmited = 1;
		} else {
		Gyroscope_Measure_Trasmited = 0;
	}
}

MAGNETOMETER_Data Get_Data_Magnetometer (void){
	return Measure_Magnetometer;
}

ACCELEROMETER_Data Get_Data_Accelerometer (void){
	return Measure_Accelerometer;
}

GYROSCOPE_Data Get_Data_Gyroscope (void){
	return Measure_Gyroscope;
}

int Received_Measure_Magnetometer (void){
	return Magnetometer_Measure_Trasmited;
}

int Received_Measure_Gyroscope (void){
	return Gyroscope_Measure_Trasmited;
}

int Received_Measure_Accelerometer (void){
	return Accelerometer_Measure_Trasmited;
}

/*****************************************************************************/
/*                        local functions
*/
/*****************************************************************************/

// Escritura de un byte en un registro de los sensores
static int i2c_write_byte(unsigned int i2c_register, char data, I2C_SENSOR
sensor)
{
	unsigned char n = 0;
	unsigned char twi_status;
	unsigned int i2c_address = 0;
	char r_val = -1;

	// Selección de la dirección del sensor
	if (sensor == MAGNETOMETER){
		i2c_address = 0b00011110;
	} else {
		i2c_address = 0b01101000;
	}
```

```
	// Inicio de la comunicación:

	// Maestro: START >> ___ >> Sensor Address + W >> ___ >> Register >> ___
>> DATA >> ___ >> STOP // fin
	// Esclavo: _____ >> ACK >> ___________________ >> ACK >> ________ >> ACK
>> ____ >> ACK >> ____ // fin

	i2c_retry:

	// Realización máxima de 50 intentos de comunicación
	if (n++ >= MAX_TRIES) return r_val;

	// Trasmitimos la condición de inicio
	twi_status = i2c_transmit(I2C_START);
	// Comprobamos el estado de la comunicación
	if (twi_status == TW_MT_ARB_LOST) goto i2c_retry;
	if ((twi_status != TW_START) && (twi_status != TW_REP_START)) goto
i2c_quit;

	// Enviamos la condición de escritura junto con la dirección del esclavo
(SLA_W)
	TWDR = (i2c_address << 1 | TW_WRITE);
	// Trasmitimos el dato
	twi_status = i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	// Comprobamos el estado de la comunicación
	if ((twi_status == TW_MT_SLA_NACK) || (twi_status == TW_MT_ARB_LOST)) goto
i2c_retry;
	if (twi_status != TW_MT_SLA_ACK) goto i2c_quit;

	// Enviamos un puntero al registro en el que deseamos escribir
	TWDR = i2c_register;
	// Trasmitimos el dato
	twi_status = i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	// Comprobamos el estado de la comunicación
	if (twi_status != TW_MT_DATA_ACK) goto i2c_quit;

	// Enviamos el dato que deseamos escribir
	TWDR = data;
	// Trasmitimos el dato
	twi_status = i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	// Comprobamos el estado de la comunicación
	if (twi_status != TW_MT_DATA_ACK) goto i2c_quit;

	// I2C trasmisión correcta
	r_val=1;

	i2c_quit:

	// Trasmitimos la condición de stop
	twi_status=i2c_transmit(I2C_STOP);
	return r_val;
}

// Lectura de 16 bits de las medidas en los ejes X, Y y Z de los sensores
static int i2c_read (double *valueX1, double *valueX2, double *valueX3,
I2C_SENSOR sensor)
{
	unsigned char n = 0;
	unsigned char twi_status;
	unsigned int i2c_address = 0;
	unsigned int i2c_register = 0;
```

```
	char r_val = -1;

	// Selección de la dirección del sensor y del registro que almacena las
medidas
	if (sensor == MAGNETOMETER){
		i2c_address = 0b00011110;
		i2c_register = 0x03;
		} else {
		i2c_address = 0b01101000;
		if (sensor == ACCELEROMETER){
			i2c_register = 0b00111011;
		} else {
			i2c_register = 0b01000011;
		}
	}

	// Ejemplo de la comunicación:
	// Maestro: START >> ___ >> "Sensor Address + W >> ___ >> Register >> ___
>> START >> ___" >> ...
	// Esclavo: _____ >> ACK >> "_____________________ >> ACK >> ________ >> ACK
>> _____ >> ACK" >> ...

	// Maestro: ... >> SensorAddress + R >> ___ >> ____ >> ACK >> [...] >>
NACK >> STOP // fin
	// Esclavo: ... >> ___________________ >> ACK >> DATA >> ___ >> [...] >>
____ >> ____ // fin

	// Inicio de la comunicación:
	i2c_retry:

	// Establecemos un número máximo de intentos de trasmisión
	if (n++ >= MAX_TRIES) return r_val;

	// Trasmitimos la condición de START
	twi_status=i2c_transmit(I2C_START);
	// Comprobamos el estado de la trasmisión
	if (twi_status == TW_MT_ARB_LOST) goto i2c_retry;
	if ((twi_status != TW_START) && (twi_status != TW_REP_START)) goto
i2c_quit;

	// Enviamos la condición de escritura junto con la dirección del esclavo
(SLA_W)
	TWDR =  i2c_address << 1 | TW_WRITE;
	// Trasmisión del dato
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	// Comprobamos el estado de la comunicación
	if ((twi_status == TW_MT_SLA_NACK) || (twi_status == TW_MT_ARB_LOST)) goto
i2c_retry;
	if (twi_status != TW_MT_SLA_ACK) goto i2c_quit;

	// Enviamos un puntero al registro que deseamos leer
	TWDR = i2c_register;
	// Trasmitimos el dato
	twi_status = i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	// Comprobamos el estado de la comunicación
	if (twi_status != TW_MT_DATA_ACK) goto i2c_quit;

	twi_status=i2c_transmit(I2C_STOP);

	// Trasmitimos la condición START
	twi_status=i2c_transmit(I2C_START);
	// Comprobamos el estado de la trasmisión
```

```
	if (twi_status == TW_MT_ARB_LOST) goto i2c_retry;
	if ((twi_status != TW_START) && (twi_status != TW_REP_START)) goto
i2c_quit;

	// Enviamos el comando de lectura junto con la direccón del esclavo
(SLA_R)
	TWDR =i2c_address << 1 | TW_READ;
	// Trasmitimos el dato
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	// Comprobamos el estado de la comunicación
	if ((twi_status == TW_MR_SLA_NACK) || (twi_status == TW_MR_ARB_LOST)) goto
i2c_retry;
	if (twi_status != TW_MR_SLA_ACK) goto i2c_quit;

	// Lectura de dato (MSB X1)
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	if ((twi_status != TW_MR_DATA_ACK)) goto i2c_quit;
	// Almacenamiento del dato
	*valueX1=(double)(TWDR<<8);

	// Lectura del dato (LSB X1)
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	if ((twi_status != TW_MR_DATA_ACK)) goto i2c_quit;
	// Almacenamiento del dato
	*valueX1=*valueX1+(double)(TWDR);//dataX1=TWDR+dataX1;

	// Lectura del dato (MSB X2)
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	if ((twi_status != TW_MR_DATA_ACK)) goto i2c_quit;
	// Almacenamiento del dato
	//dataX2=TWDR;
	//dataX2=dataX2<<8;

	*valueX2=(double)(TWDR<<8);
	// Lectura del dato (LSB X2)
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	if ((twi_status != TW_MR_DATA_ACK)) goto i2c_quit;
	// Almacenamiento de dato
	*valueX2=*valueX2+(double)(TWDR);

	// Lectura del dato (MSB X3)
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	if ((twi_status != TW_MR_DATA_ACK)) goto i2c_quit;
	// Almacenamiento del dato
	*valueX3=(double)(TWDR<<8);
	// Lectura del dato (LSB X3)
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_NACK);
	if ((twi_status != TW_MR_DATA_NACK)) goto i2c_quit;
	// Almacenamiento del dato
	//dataX3=TWDR+dataX3;
	*valueX3=*valueX3+(double)(TWDR);
	// Trasmisión correcta
	r_val=1;

	// Transformación del valor obtenido del ADC a unidades del SI
	if(sensor==MAGNETOMETER){
		(*valueX1)=*valueX1/1024+0.2;
		(*valueX2)=*valueX2/1024;
		(*valueX3)=*valueX3/1024-0.09;
	} else if(sensor==ACCELEROMETER){
		(*valueX1)=*valueX1*9.8/2048+0.1191183;
		(*valueX2)=*valueX2*9.8/2048-0.4785163;
```

```
                (*valueX3)=*valueX3*9.8/2048-0.877595;
        } else {
                (*valueX1)=*valueX1/65.5+1.06256;
                (*valueX2)=*valueX2/65.5+0.1573;
                (*valueX3)=*valueX3/65.5-72.7908;
        }

        i2c_quit:
        // Envio del comando STOP
        twi_status=i2c_transmit(I2C_STOP);

        // Devolvemos si la trasmisión a sido correcta
        return r_val;
}

// Lectura de un byte del uno de los registros de un sensor
static int i2c_read_byte (int* data, unsigned int i2c_register, I2C_SENSOR
sensor)
{
        unsigned char n = 0;
        unsigned char twi_status;
        unsigned int i2c_address = 0;//0b00011110;
        char r_val = -1;

        // Selección de la dirección del sensor y del registro que almacena las
medidas
        if (sensor == MAGNETOMETER){
                i2c_address = 0b00011110;
                } else {
                i2c_address = 0b01101000;
        }

        // Inicio de la comunicación:

        // Maestro: START >> ___ >> "Sensor Address + W >> ___ >> Register >> ___
>> START >> ___" >> ...
        // Esclavo: _____ >> ACK >> "_____ >> ACK >> ________ >> ACK
>> _____ >> ACK" >> ...

        // Maestro: ... >> SensorAddress + R >> ___ >> ____ >> NACK >> STOP // fin
        // Esclavo: ... >> _____ >> ACK >> DATA >> ____ >> ____ // fin

        i2c_retry:

        // Establecemos un número máximo de intentos de trasmisión
        if (n++ >= MAX_TRIES) return r_val;

        // Trasmitimos la condición de START
        twi_status=i2c_transmit(I2C_START);
        // Comprobamos el estado de la trasmisión
        if (twi_status == TW_MT_ARB_LOST) goto i2c_retry;
        if ((twi_status != TW_START) && (twi_status != TW_REP_START)) goto
i2c_quit;

        // Enviamos la condición de escritura junto con la dirección del esclavo
(SLA_W)
        TWDR =  i2c_address << 1 | TW_WRITE;
        // Trasmisión del dato
        twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
        // Comprobamos el estado de la comunicación
        if ((twi_status == TW_MT_SLA_NACK) || (twi_status == TW_MT_ARB_LOST)) goto
i2c_retry;
```

```
	if (twi_status != TW_MT_SLA_ACK) goto i2c_quit;

	// Enviamos un puntero al registro que deseamos leer
	TWDR = i2c_register;
	// Trasmitimos el dato
	twi_status = i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	// Comprobamos el estado de la comunicación
	if (twi_status != TW_MT_DATA_ACK) goto i2c_quit;

	twi_status=i2c_transmit(I2C_STOP);

	// Trasmitimos la condición START
	twi_status=i2c_transmit(I2C_START);
	// Comprobamos el estado de la trasmisión
	if (twi_status == TW_MT_ARB_LOST) goto i2c_retry;
	if ((twi_status != TW_START) && (twi_status != TW_REP_START)) goto
i2c_quit;

	// Enviamos el comando de lectura junto con la cireccón del esclavo
(SLA_R)
	TWDR =i2c_address << 1 | TW_READ;
	// Trasmitimos el dato
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_ACK);
	// Comprobamos el estado de la comunicación
	if ((twi_status == TW_MR_SLA_NACK) || (twi_status == TW_MR_ARB_LOST)) goto
i2c_retry;
	if (twi_status != TW_MR_SLA_ACK) goto i2c_quit;

	// Lectura de dato (MSB X1)
	twi_status=i2c_transmit(I2C_DATA_NACK);
	if ((twi_status != TW_MR_DATA_NACK)) goto i2c_quit;
	// Almacenamiento del dato
	*data=TWDR;

	// Trasmisión correcta
	r_val=1;

	i2c_quit:
	// Envio del comando STOP
	twi_status=i2c_transmit(I2C_STOP);

	// Devolvemos si la trasmisión a sido correcta
	return r_val;
}

// Inicio de la trasmisión de un dato
static unsigned char i2c_transmit(unsigned char type) {
	switch(type) {
		case I2C_START:    // Enviamos la condición de START
		TWCR = (1 << TWINT) | (1 << TWSTA) | (1 << TWEN);
		break;
		case I2C_DATA_ACK:     // Envio/Lectura de un dato;
		TWCR = (1 << TWINT) | (1 << TWEN) | (1<<TWEA);
		break;
		case I2C_DATA_NACK:     // Lectura del último dato;
		TWCR = (1 << TWINT) | (1 << TWEN);
		break;
		case I2C_STOP:     // Enviamos la condición de STOP
		TWCR = (1 << TWINT) | (1 << TWEN) | (1 << TWSTO);
		return 0;
	}
	// Esperamos a que se confirme la trasmisión a través del flag TWINT
```

```
	while (!(TWCR & (1 << TWINT)));
	// Devuelve es estado de la trasmisión (TWSR), eliminando a través de la
mascara el registro del prescaler.
	return (TWSR & 0xF8);
}

// Inicialización del acelerómetro/giróscopo
static void Accelerometer_Gyroscope_Init (void){

	// Registro 25: Sample Rate Divider (0x19) (Giroscopo) >> 0x19
	// Sample Rate = Gyroscope Output Rate/(1+SMLRT_DIV) >> 0x07 >> 1 kHz
(Acelerometro 1kHz no problemas)

	i2c_write_byte(0x19, 0x07, ACCELEROMETER);

	// Registro 26: Configuration >> 0x1A
	// FSYNC disable and Gyroscope Output Rate 8kHz >> 0x00000000

	i2c_write_byte(0x1A, 0x00, ACCELEROMETER);

	// Registro 27: Gyroscope Configuration >> 0x1B
	// No testeamos y rango de +/-  1000 º/s >> 0b00010000

	i2c_write_byte(0x1B, 0x10, ACCELEROMETER);

	// Registro 28: Accelerometer Configuration >> 0x1C
	// No testeamos y rango de +/- 16g >> 0b00011000

	i2c_write_byte(0x1C, 0x18, ACCELEROMETER);

	// FIFO Enable >> 0x23 >> 0b00000000

	i2c_write_byte(0x23, 0x00, ACCELEROMETER);

	// Bypass mode >> 0x37
	// Able bypass mode>> 0b00000010;

	i2c_write_byte(0x37, 0x02, ACCELEROMETER);

	// User Control >> 0x6A
	// I2C, conexión auxiliar con principal,
	// desactivar FIFO>> 0b00000000;

	i2c_write_byte(0x6A, 0x00, ACCELEROMETER);

	// User Control >> 0x6B
	// Clock source to gyro reference X
	// desactivar FIFO>> 0b00000001;

	i2c_write_byte(0x6B, 0x00, ACCELEROMETER);

}

// Inicialización del magnetometro
static void Magnetometer_Init (void){

	// Configuration Register A >> 0x00
	// Actualización del valor y medidas por defecto>> 0b00011000

	i2c_write_byte(0x00, 0x18, MAGNETOMETER);

	// Configuration Register B >> 0x01
```

```
        // Campo terrestre 0.25-0.65 Ga >> +/- 0.9 Ga >> 0b00000000

        i2c_write_byte(0x01, 0x00, MAGNETOMETER);

        // Mode Register >> 0x02
        // Actualización de la medida continua >> 0x00

        i2c_write_byte(0x02, 0x00, MAGNETOMETER);

}
```

Anexo: Fichero I2C.h

Código implementado en el fichero I2C.h:

```
#ifndef I2C_H_
#define I2C_H_

/*****************************************************************************/
/*                          Typedefs and structures                          */
/*****************************************************************************/

	// Estructura para nombrar los sensores
	typedef enum {ACCELEROMETER, GYROSCOPE, MAGNETOMETER} I2C_SENSOR ;

	// Estructura para almacenar las medidas del magnetómetro
	typedef struct {
		double X;
		double Y;
		double Z;
	} MAGNETOMETER_Data;

	// Estructura para almacenar las medidas del acelerómetro
	typedef struct {
		double X;
		double Y;
		double Z;
	} ACCELEROMETER_Data;

	// Estructura para almacenar las medidas de giróscopo
	typedef struct {
		double X;
		double Y;
		double Z;
	} GYROSCOPE_Data;

/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

	void I2C_Init(void); // Inicialización de la comunicación 2-wire y de los
sensores

	// Lectura de las medidas
	MAGNETOMETER_Data Get_Data_Magnetometer (void);
	ACCELEROMETER_Data Get_Data_Accelerometer (void);
	GYROSCOPE_Data Get_Data_Gyroscope (void);

	// Comprobación de la lectura correcta de valores
	int Received_Measure_Magnetometer (void);
	int Received_Measure_Gyroscope (void);
	int Received_Measure_Accelerometer (void);

	// Obtención de las medidas
	void Get_Measure_Magnetometer (void);
	void Get_Measure_Accelerometer (void);
	void Get_Measure_Gyroscope (void);

#endif /* I2C_H_ */
```

Anexo: Fichero CLOCk.c

Código implementado en el fichero CLOCK.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include "CLOCK.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/

static unsigned char top; // Indica el máximo valor del contador

volatile static unsigned long tick_counter;
static unsigned long Timer=0, Timer2=0;
static char TO=0, TO2 = 0;
static char Active_Timer=0, Active_Timer2 = 0;

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of local functions                    */
/*****************************************************************************/

static void clock (void); // Función de incremento del reloj durante la
interrupción
static unsigned char Get_Time (void); // Función para la lectura del contador

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of exported functions                 */
/*****************************************************************************/

void Init_clock (void); // Inicialización del reloj
void Reset_clock (void); // Puesta a cero del reloj
void Start_clock (void); // Activación del contador
void Stop_clock (void); // Desactivación del tontador
unsigned long Get_tick_counter (void); // Devuelve el valor del reloj
void Set_Timer (unsigned long T_ms); // Activación temporización
char Time_Out (void); // Comprobación de la finalización de la temporización
void Remove_Timer (void); // Desactivación de la temporización
void Set_Timer2 (unsigned long T_ms); // Activación temporización 2
char Time_Out2 (void); // Comprobación de la finalización de la temporización 2
void Remove_Timer2 (void); // Desactivación de la temporización
void delay_Until (unsigned long t); // Espera de t milisegundos

/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

// Inicialización del reloj
void Init_clock (void){
	Reset_clock(); // Inicialización del reloj (contador detenido y puesto a
cero)
	Start_clock(); // Comienza a incrementar el contador
}
```

```
// Inicialización del reloj
void Reset_clock (void){
	/* TCCR0A, Registro de control A:
			COO1A -> Modo de operación normal
			WGM0 -> Operación CTC comparar el máximo con el registro
OCR0A
	*/
	TCCR0A =
(0<<COM0A1)|(0<<COM0A0)|(0<<COM0B1)|(0<<COM0B0)|(1<<WGM11)|(0<<WGM10);

	/* TCCR0B, Registro de control B:
			WGM1 -> Operación CTC comparar el máximo con el registro
OCR0A
			CS0 -> Prescaler: 64 (1ms) / 8 (us)
	*/
	TCCR0B =(0<<WGM12)|(0<<CS02)|(1<<CS01)|(1<<CS00);

	/* OCR0A, Registro de comparación A:
			Comparación con el registro TCNT0:
				f_tcnt0 = fclock/prescaler
				top = 0.0001[s]/(1/ftcnt0) = 250 (1ms) / 2 (1us)

	*/
	top = 250;
	OCR0A = top;

	/* TIMSK0, Registro de interrupción:
			OCIE0A -> Flag de interrupción para la comparación
			TOIE0 -> Flag de interrupción para el desvordamiento
	*/
	TIMSK0 = (1<<OCIE0A)|(0<<TOIE0);


}

// Activación del contador
void Start_clock (void){
	/* TCCR0B, Registro de control B:
			CS0 -> Prescaler: 64 (1ms)(011) / 8 (us)(010)
	*/
	TCCR0B =(0<<CS02)|(1<<CS01)|(1<<CS00); // Iniciamos con un prescaler de 64
}

// Desactivación del contador
void Stop_clock (void){
	TCCR0B =(0<<CS02)|(0<<CS01)|(0<<CS00); // Detenemos el reloj
}

// Devuelve el valor del reloj
unsigned long Get_tick_counter (void){
	return tick_counter;
}

// Funciones para las temporizaciones:
void Set_Timer (unsigned long T_ms){
	Timer = Get_tick_counter()+T_ms;
	TO=0;
	Active_Timer = 1;
}
```

```
void Set_Timer2 (unsigned long T_ms){
	Timer2 = Get_tick_counter()+T_ms;
	TO2=0;
	Active_Timer2 = 1;
}
char Time_Out (void){
	return TO;
}
char Time_Out2 (void){
	return TO2;
}
void Remove_Timer (void){
	Active_Timer = 0;
	TO = 0;
}
void Remove_Timer2 (void){
	Active_Timer2 = 0;
	TO2 = 0;
}
void delay_Until (unsigned long t){
	while (t!=tick_counter){

	}
}

/*****************************************************************************/
/*                          Local functions                                  */
/*****************************************************************************/

//Función para la lectura del contador de pulsos del reloj del microprocesador
static unsigned char Get_Time (void){
	unsigned char Aux_TC;
	//unsigned char Aux_SREG;

	//Aux_SREG = SREG; // Almacenamos el flag global de interrupción

	cli(); // Desactivamos las interrupciones
	Aux_TC=TCNT0;
	sei(); // Activamos las interrupciones

	//SREG = Aux_SREG;

	return Aux_TC;
}

// Incremento del reloj
static void clock (void){
	tick_counter ++;
	if (Active_Timer && (Timer<tick_counter)){
		TO=1;
		Active_Timer = 0;
	}
	if (Active_Timer2 && (Timer2<tick_counter)){
		TO2=1;
		Active_Timer2 = 0;
	}
}
// Interrupción del timer
ISR(TIMER0_COMPA_vect){
	TIFR0 |= (1<<OCF0A) ; // Reseteamos el flag
	clock(); // Incrementamos el contador y comprobamos las temporizaciones
}
```

Anexo: Fichero CLOCK.h

Código implementado en el fichero CLOCLK.h:

```
#ifndef CLOCK_H_
#define CLOCK_H_

/*******************************************************************************/
/*                          Exported functions                                 */
/*******************************************************************************/

void Init_clock (void); // Inicialización del reloj
void Reset_clock (void); // Puesta a cero del reloj
void Start_clock (void); // Activación del contador
void Stop_clock (void); // Desactivación del tontador
unsigned long Get_tick_counter (void); // Devuelve el valor del reloj
void Set_Timer (unsigned long T_ms); // Activación temporización
char Time_Out (void); // Comprobación de la finalización de la temporización
void Remove_Timer (void); // Desactivación de la temporización
void Set_Timer2 (unsigned long T_ms); // Activación temporización 2
char Time_Out2 (void); // Comprobación de la finalización de la temporización 2
void Remove_Timer2 (void); // Desactivación de la temporización
void delay_Until (unsigned long t); // Espera de t milisegundos

#endif /* CLOCK_H_ */
```

Anexo: Fichero GPS.c

Código implementado en el fichero GPS.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include "GPS.h"
#include "SCI.h"

#include <stdlib.h>
#include <math.h>

/*****************************************************************************/
/*                          Typedefs and structures                          */
/*****************************************************************************/

enum recogniced_NMEA_type {
  NONE, DATA
};

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/

// Funciones para almacenar e interpretar una trama NMEA
static char GPS_NMEA_received = 0 ;
static char NMEA_buffer [2][100] ;
static unsigned char NMEAB_Row, NMEAB_Index ;
static char st[8] ;
static char st2[8] ;
static char st3[8] ;
static char Error_GPS;


/*****************************************************************************/
/*                          Local functions prototypes                       */
/*****************************************************************************/

int Send_CHAR (char C) ; // Envia un byte a través del puerto SCIb (TX1)
static unsigned char Calculate_CHS (char *NMEA) ; // Calcula del CHS para el
envio de comandos al módulo GPS
static void Receive_NMEA (unsigned char C) ; // Almacena una trama GPGGA recibida
static char Move_to_comma (char i, NMEA_frame_type F) ; // Obtiene la posición
del caracter "," en un string
extern void DelayMs(volatile unsigned int Msec) ; // Realiza una espera en ms

/*****************************************************************************/
/*                                    Exported functions prototypes
*/
/*****************************************************************************/

int Init_GPS (void); // Inicialización del GPS y del SCIb
int Send_NMEA (char *NMEA) ; // Envio de una trama al módulo GPS
char NMEA_Received (void) ; // Comprueba la recepción de una nueva trama GPGGA
int Read_NMEA  (NMEA_frame_type NMEA_frame, char *length) ; // Lectura de la
trama GPGGA recibida
position Read_GPS (void); // Lectura de la posición
char Get_error (void); // Error en la medida de posición
```

```
position Modificate_Range(position pos); // Rango 90/-90 lat y 180/-180 long
char Is_GGA (NMEA_frame_type NMEA_frame) ; // Comprobamos si se trata de una
trama GPGGA
char Have_Position (NMEA_frame_type NMEA_frame) ; // Comprobamos si la trama
posee una posición distinta de cero
position Interpret_GGA (NMEA_frame_type NMEA_frame) ; // Obtención de las
coordenadas
Earth_float GGA_Get_Latitude (NMEA_frame_type NMEA_frame) ;  // Obtención de la
latitud en radianes
Earth_float GGA_Get_Longitude (NMEA_frame_type NMEA_frame) ; // Obtención de la
longitud en radianes
int GGA_Get_Altitude (NMEA_frame_type NMEA_frame) ;  // Obtención de la altitud
en metros


/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

// Inicialización del Módulo del GPS y del SCIb
int Init_GPS (void) {

       char *SET_NMEA_OUTPUT ;

       // Inicialización puerto UART1
       SCIb_Init (0, Receive_NMEA) ;

       // Trasmisión trama GPGGA
       SET_NMEA_OUTPUT = "PMTK314,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0" ;
    Send_NMEA (SET_NMEA_OUTPUT) ;

       // Frecuencia de trasmisión de 5 Hz
    SET_NMEA_OUTPUT = "PMTK220,200" ;
       Send_NMEA (SET_NMEA_OUTPUT) ;

       DelayMs (20) ;

       // Desavilitación de la velocidad del módulo
       SET_NMEA_OUTPUT = "PMTK397,0.0" ;
    Send_NMEA (SET_NMEA_OUTPUT) ;

    NMEAB_Row = 0 ;
       NMEAB_Index = 0 ;

    return 0 ;
}

// Envia una trama NMEA al módulo GNSS
int Send_NMEA (char *NMEA) {
       unsigned char CHS, i ;
       char C ;

       Send_CHAR ('$') ;
    for (i=0 ; i<100 ; i++) {
       if (NMEA[i] == '\0') break ;
       Send_CHAR (NMEA[i]) ;
    }
    if (i == 100) return -1 ;
    Send_CHAR ('*') ;
    CHS =  Calculate_CHS (NMEA) ;
    C = CHS >> 4 ;
    if (C < 10) Send_CHAR (C + 48) ;
```

```
    else Send_CHAR (C + 55) ;
    C = CHS&0x0F ;
    if (C < 10) Send_CHAR (C + 48) ;
    else Send_CHAR (C + 55) ;
    Send_CHAR ('\r') ;
    Send_CHAR ('\n') ;

       return 0 ;
}

// Devuelve si se ha recibido una trama NMEA
char NMEA_Received (void) {
       return GPS_NMEA_received ;
}

// Lectura de la trama NMEA recibida
int Read_NMEA  (NMEA_frame_type NMEA_frame, char *length) {

       unsigned char i ;

       //if (!GPS_NMEA_received) return -1 ;
       *length = 0 ;
       for (i=0; i<100; i++) {
              NMEA_frame[i] = NMEA_buffer [(NMEAB_Row+1)%2][i] ;
              if (NMEA_frame[i] == '\n') {
                     *length = i+1 ;
                     break ;
              }
       }
       GPS_NMEA_received = 0 ;
       return 0 ;
}

// Devuelve la posición obtenida de la trama GPGGA
position Read_GPS (void){

       NMEA_frame_type frame;
       char longitude;
       position pos, Aux;

       if(NMEA_Received()){
              Read_NMEA(frame, &longitude);
              Aux=Interpret_GGA(frame);
              pos=Modificate_Range(Aux);
       }

       if(!Have_Position(frame)){
              Error_GPS = 1;
       } else {
              Error_GPS = 0;
       }

       return pos;
}
```

```
// Normaliza los valores de posición
position Modificate_Range(position pos){

	position Aux;

	if(pos.Latitude>90){
		Aux.Latitude = pos.Latitude-360;
	} else if(pos.Latitude<-90){
		Aux.Latitude = pos.Latitude+360;
	} else {
		Aux.Latitude = pos.Latitude;
	}

	if(pos.Longitude>180){
		Aux.Longitude = pos.Longitude-360;
	} else if(pos.Longitude<-180){
		Aux.Longitude = pos.Longitude+360;
	} else {
		Aux.Longitude = pos.Longitude;
	}

	Aux.Altitude = pos.Altitude;

	return Aux;
}

// Devuelve si hay un error en la lectura de la trama GPGGA
char Get_error (void){
	return Error_GPS;
}

// Comprueba si es una trama GPGGA
char Is_GGA (NMEA_frame_type NMEA_frame) {
   if ((NMEA_frame[0] == '$') & (NMEA_frame[1] == 'G') & (NMEA_frame[2] == 'P') &
   (NMEA_frame[3] == 'G') & (NMEA_frame[4] == 'G') & (NMEA_frame[5] == 'A'))
return 1 ;
   else return 0 ;
}

// Comprueba si la trama recibida es correcta
char Have_Position (NMEA_frame_type NMEA_frame) {
	char result = 0 ;
	unsigned char Last_comma = 1 ;

	if (Is_GGA(NMEA_frame)) {
		Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
		Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
		Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
		Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
		Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
		Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
		if (NMEA_frame[Last_comma+1] != '0') result = 1 ;
	}
	return result ;
}
```

```
// Obtiene la latitud contenida en una trama GPGGA
Earth_float GGA_Get_Latitude (NMEA_frame_type NMEA_frame) {  // In radians

    Earth_float Degrees, Minutes, Minutes2;
    unsigned char Last_comma = 1 ;

    Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
    Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
    st[0] = NMEA_frame[Last_comma+1] ;
    st[1] = NMEA_frame[Last_comma+2] ;
    st[2] = '\0' ;
    Degrees = (float)atoi (st) ;
       st2[0] = NMEA_frame[Last_comma+3];
       st2[1] = NMEA_frame[Last_comma+4];
       st2[2] = '\0';
       Minutes = (float)atoi (st2) ;
       st3[0] = NMEA_frame[Last_comma+6];
       st3[1] = NMEA_frame[Last_comma+7];
       st3[2] = NMEA_frame[Last_comma+8];
       Minutes2 = (float) atoi(st3) ;

       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame);
       if(NMEA_frame[Last_comma+1]==0x4E){ // Norte
              return (Degrees + Minutes/60.0 + Minutes2/1000.0/60.0);
       } else { // Sur
              return (-Degrees - (float)Minutes/60.0 - Minutes2/1000/60.0);
       }
}

// Obtiene la longitud contenida en una trama GPGGA
Earth_float GGA_Get_Longitude (NMEA_frame_type NMEA_frame) { // In radians

       Earth_float Degrees, Minutes, Minutes2 ;
       unsigned char Last_comma = 1 ;

       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       st[0] = NMEA_frame[Last_comma+1] ;
       st[1] = NMEA_frame[Last_comma+2] ;
       st[2] = NMEA_frame[Last_comma+3] ;
       st[3] = '\0' ;
       Degrees = (float)atoi (st) ;
       st2[0] = NMEA_frame[Last_comma+4];
       st2[1] = NMEA_frame[Last_comma+5];
       st2[2] = '\0';
       Minutes = (float)atoi (st2) ;
       st3[0] = NMEA_frame[Last_comma+7];
       st3[1] = NMEA_frame[Last_comma+8];
       st3[2] = NMEA_frame[Last_comma+9];
       st3[3] = '\0';
       Minutes2 = (float)atoi (st3) ;

       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame);
       if(NMEA_frame[Last_comma+1]==0x57){
              return (-Degrees - Minutes/60.0 - Minutes2/1000.0/60.0) ;
       } else {
              return (Degrees + Minutes/60.0 + Minutes2/1000.0/60.0 ) ;
       }

}
```

```
// Obtiene la altitud contenida en una trama GPGGA
int GGA_Get_Altitude (NMEA_frame_type NMEA_frame) {  // In meters

       unsigned char Last_comma = 1 ;
       int Altitude;

       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       Last_comma = Move_to_comma (Last_comma, NMEA_frame) ;
       st[0] = NMEA_frame[Last_comma+1] ;
       st[1] = NMEA_frame[Last_comma+2] ;
       st[2] = NMEA_frame[Last_comma+3] ;
       st[3] = '\0' ;
       Altitude = atoi (st) ;

       return Altitude;
}

// Obtiene la posición contenida en una trama GPGGA
position Interpret_GGA (NMEA_frame_type NMEA_frame) {

       position ESF_position ;


       ESF_position.Latitude = GGA_Get_Latitude (NMEA_frame) ;
       ESF_position.Longitude = GGA_Get_Longitude (NMEA_frame) ;
       ESF_position.Altitude = GGA_Get_Altitude (NMEA_frame) ;

       return ESF_position ;
}

/*****************************************************************************/
/*                          Local functions                                  */
/*****************************************************************************/

// Envía un char C por el puerto UART1
int Send_CHAR (char C) {
       SCIb_PutChar(C) ;
       return 0 ;
}

// Cálculo de las tramas de comunicación con el módulo GPS
static unsigned char Calculate_CHS (char *NMEA) {

  unsigned char CHS, i ;

  CHS = NMEA[0] ;
  for (i=1 ; i<100 ; i++) {
       if (NMEA[i] == '\0') return CHS ;
       CHS ^= NMEA[i] ;
  }
  return 0 ;
}
```

```
// Comprueba si la trama recivida es GPGGA
void Receive_NMEA (unsigned char C) {

  static enum recogniced_NMEA_type recogniced_NMEA = NONE;

  switch (recogniced_NMEA) {
         case NONE: if (C == '$') {
                recogniced_NMEA = DATA ;
                NMEA_buffer [NMEAB_Row][NMEAB_Index] = C ; NMEAB_Index++ ;
                break ; }
         case DATA: NMEA_buffer [NMEAB_Row][NMEAB_Index] = C ; NMEAB_Index++ ;
              if (C == 0x0A) {
                     recogniced_NMEA = NONE ;
                     NMEAB_Index = 0 ;
                     GPS_NMEA_received = 1 ;
                     if(Is_GGA(NMEA_buffer [NMEAB_Row])){
                            NMEAB_Row = (NMEAB_Row + 1)%2 ;
                     }
              } else if (NMEAB_Index == 100) {
                     recogniced_NMEA = NONE ;
                     NMEAB_Index = 0 ;
              }
  }
  return ;
}

// Obtiene la posición en una trama del caracter ',' a partir de la posición i
static char Move_to_comma (char i, NMEA_frame_type F) {

   unsigned char j ;

   for (j=i+1; j < 100; j++) if (F[j] == ',') return j ;
   return 0 ;

}
```

Anexo: Fichero GPS.h

Código implementado en el fichero GPS.h:

```
#ifndef GPS_H_
#define GPS_H_

/*****************************************************************************/
/*                          Typedefs and structures                          */
/*****************************************************************************/

typedef char NMEA_frame_type[100] ;

typedef float Earth_float ;

// Estructura para almacenar la posición
typedef struct {
   float Longitude ;   // Grados
   float Latitude ;    // Grados
   float Altitude ;    // Metros
} position ;


/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

int Init_GPS (void); // Inicialización del GPS y del SCIb
int Send_NMEA (char *NMEA) ; // Envio de una trama al módulo GPS
char NMEA_Received (void) ; // Comprueba la recepción de una nueva trama GPGGA
int Read_NMEA  (NMEA_frame_type NMEA_frame, char *length) ; // Lectura de la
trama GPGGA recibida
position Read_GPS (void); // Lectura de la posición
char Get_error (void); // Error en la medida de posición
position Modificate_Range(position pos); // Rango 90/-90 lat y 180/-180 long
char Is_GGA (NMEA_frame_type NMEA_frame) ; // Comprobamos si se trata de una
trama GPGGA
char Have_Position (NMEA_frame_type NMEA_frame) ; // Comprobamos si la trama
posee una posición distinta de cero
position Interpret_GGA (NMEA_frame_type NMEA_frame) ; // Obtención de las
coordenadas
Earth_float GGA_Get_Latitude (NMEA_frame_type NMEA_frame) ;  // Obtención de la
latitud en radianes
Earth_float GGA_Get_Longitude (NMEA_frame_type NMEA_frame) ; // Obtención de la
longitud en radianes
int GGA_Get_Altitude (NMEA_frame_type NMEA_frame) ;  // Obtención de la altitud
en metros

#endif /* GPS_H_ */
```

Anexo: Fichero ALARMA.c

Código implementado en el fichero ALARMA.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <avr/io.h>
#include <compat/twi.h>
#include "CLOCK.h"
#include "I2C.h"
#include "ALARMA.h"
#include "BUFFER.h"
#include "GPS.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/

static double aT;

position point1, point2;
float distance_1_2 = -2;
char time1=0;

int pasos = 1;

static char Alarma_Leve = 0;
static char Alarma_Golpe = 0;
static char Alarma_MedidaA = 0;
static char Alarma_Critica = 0;

static ACCELEROMETER_Data DataA;

/*****************************************************************************/
/*                          Local functions prototypes                       */
/*****************************************************************************/

static double total_aceleration (void); // Cálcula el módulo de la acelereción

/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions prototypes                    */
/*****************************************************************************/

void Alarm (void); // Activa las alarmas
char Get_Alarma_Golpe (void); // Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarma_Leve (void); // Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarm_MedidaA (void); // Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarma_Critica (void); // Devuelve la activación de la alarma
void Reset_Alarma_Golpe (void); // Puesta a cero de la alarma
void Reset_Alarma_Critica (void); // Puesta a cero de la alarma
```

```
/*****************************************************************************/
/*                          Local functions                                  */
/*****************************************************************************/

static double total_aceleration (void){
	double total=0.0;

	Get_Measure_Accelerometer();
	DataA = Get_Data_Accelerometer();
	total = sqrt(DataA.X*DataA.X+DataA.Y*DataA.Y+DataA.Z*DataA.Z);

	return total;
}


/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

// Activa las alarmas
void Alarm (void){

	// Obtenemos la aceleración total
	aT = total_aceleration();

	// Comprobamos si hay un fallo en la recepción de los datos del
acelerometro
	if(!Received_Measure_Accelerometer()){
		Alarma_MedidaA = 1;
	} else {
		Alarma_MedidaA = 0;

		if((aT>12.5) && (Alarma_Golpe != 1)){
			Alarma_Golpe = 1;
			Remove_Timer();
			Set_Timer(30000); //ms
		}

		if((aT<10.5)&&(aT>8.5)){
			if(pasos == 1){
				Set_Timer2(5000);
				pasos = 0;
			}
		} else {
			Alarma_Leve = 0;
			pasos = 1;
			Remove_Timer2();
		}
	}

	if (Time_Out()){

		if(time1 ==0){
			point1 = Read_GPS();
			if(Get_error()){
				time1 = 2;
			} else {
				time1 = 1;
			}
			Remove_Timer();
			Set_Timer(30000);
```

```
		} else {
			point2 = Read_GPS();
			if ((Get_error())||(time1 ==2)){
				distance_1_2 = -1;
			} else {
				distance_1_2 = Distance(point2, point1);
			}
			if(((distance_1_2>-1)&&(distance_1_2<1))||(Alarma_Leve ==
1)){
				Alarma_Golpe = 1;
			} else {
				Alarma_Golpe = 0;
			}
			if((Alarma_Leve == 1)){
				Alarma_Critica = 1;
			}
			Remove_Timer();
		}
	}

	if (Time_Out2()){
		Alarma_Leve = 1;
		Remove_Timer2();
	}



}

// Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarma_Golpe (void){
	return Alarma_Golpe;
}

// Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarma_Leve (void){
	return Alarma_Leve;
}

// Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarm_MeasureA (void){
	return Alarma_MedidaA;
}

// Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarma_Critica (void){
	return Alarma_Critica;
}

// Puesta a cero de la alarma
void Reset_Alarma_Golpe (void){
	Alarma_Golpe = 0;
}

// Puesta a cero de la alarma
void Reset_Alarma_Critica (void){
	Alarma_Critica = 0;
}
```

Anexo: Fichero ALARMA.h

Código implementado en el fichero ALARMA.h:

```
#ifndef ALARMA_H_
#define ALARMA_H_

/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

void Alarm (void); // Activa las alarmas
char Get_Alarma_Golpe (void); // Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarma_Leve (void); // Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarm_MeasureA (void); // Devuelve la activación de la alarma
char Get_Alarma_Critica (void); // Devuelve la activación de la alarma
void Reset_Alarma_Golpe (void); // Puesta a cero de la alarma
void Reset_Alarma_Critica (void); // Puesta a cero de la alarma


#endif /* ALARMA_H_ */
```

Anexo: Fichero BRUJULA.c

Código implementado en el fichero BRUJULA.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <avr/io.h>
#include <compat/twi.h>
#include "BRUJULA.h"
#include "XBEE.h"
#include "I2C.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/

static float orientation;

static char Alarm_MeasureG = 0;
static char Alarm_MeasureM = 0;
static char Alarm_MeasureO = 0;

static GYROSCOPE_Data DataG;
static MAGNETOMETER_Data DataM;

/*****************************************************************************/
/*                          Local functions prototypes                       */
/*****************************************************************************/

static float norm (float X); // Normacilización de un ángulo X

/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions prototypes                    */
/*****************************************************************************/

void Calculate_orientation (void); // Cálculo de la orientación
float Get_Orientation (void); // Devuelve la orientación
char Get_Error_MeasureG (void); // Devuelve un posible error
char Get_Error_MeasureM (void); // Devuelve un posible error
char Get_Error_MeasureB (void); // Devuelve un posible error

/*****************************************************************************/
/*                          Local functions                                  */
/*****************************************************************************/

// Normacilización de un ángulo X
static float norm (float X){
	float aux=X;

	if (X<0){
		aux = X + 360;
	} else if(X>360){
		aux = X - 360;
	}

	return aux;
}
```

```
/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

// Cáculo de la orientación
void Calculate_orientation (void){

	float Modulo;

	Alarm_MeasureG = 0;
	Alarm_MeasureM = 0;
	Alarm_MeasureO = 0;

	Get_Measure_Magnetometer();
	Get_Measure_Gyroscope();

	if(!Received_Measure_Gyroscope()) Alarm_MeasureG = 1;
	if(!Received_Measure_Magnetometer()) Alarm_MeasureM = 1;

	if(Alarm_MeasureM || Alarm_MeasureG){
		 Alarm_MeasureO = 1;
	}

	if(!(Alarm_MeasureM) || !(Alarm_MeasureG)){

		DataG = Get_Data_Gyroscope();
		DataM = Get_Data_Magnetometer();

		Modulo = sqrt(DataM.X*DataM.X+DataM.Y*DataM.Y);

		if ((DataG.X > 15) || (DataG.Y > 15) || (DataG.Z > 15) || (Modulo <
0.0)){
			Alarm_MeasureO = 1;
		} else {
			orientation = norm((float)(atan2(DataM.Y/0.25,
DataM.X/0.25))*180.0/3.1415);
			orientation = norm(orientation+90.0);
		}
	}
}

// Devuelve la orientación
float Get_Orientation (void){
	return orientation;
}

// Devuelve un posible error
char Get_Error_MeasureG (void){
	return Alarm_MeasureG;
}

// Devuelve un posible error
char Get_Error_MeasureM (void){
	return Alarm_MeasureM;
}

// Devuelve un posible error
char Get_Error_MeasureB (void){
	return Alarm_MeasureO;
}
```

Anexo: Fichero BRUJULA.h

Código implementado en el fichero BRUJULA.h:

```
#ifndef BRUJULA_H_
#define BRUJULA_H_

/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

void Calculate_orientation (void); // Cálculo de la orientación
float Get_Orientation (void); // Devuelve la orientación
char Get_Error_MeasureG (void); // Devuelve un posible error
char Get_Error_MeasureM (void); // Devuelve un posible error
char Get_Error_MeasureB (void); // Devuelve un posible error

#endif /* BRUJULA_H_ */
```

Anexo: Ficher XBEE.c

Código implementado en el fichero XBEE.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#include "XBEE.h"
#include "SCI.h"
#include "GPS.h"
#include "BUFFER.h"
#include "GPS.h"
#include "BLUETOOTH.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/

static char RX_Buffer [180] ;
  // Circular receiver buffer of two frames
static unsigned char RXB_Index, RXB_Lenght ;
static char receiving_frame, RXB_Frame_Received ;

static char TX_Buffer [180] ;
  // Transmit buffer
static unsigned char TXB_Index, TXB_Length ;
static unsigned char TXB_Transmited = 1 ;

static enum {SINGLE, CONTINOUS} rx_mode ;
static char rx_end ;
static char B ;
static char Begin_Frame, End_Frame ;

/*****************************************************************************/
/*                          Local functions prototype                        */
/*****************************************************************************/

static void Get_Char (unsigned char C); // Función que almacena un char de la
trama recibida.
static void TXINT_Action (void); // Envia un char de la trama a trasmitir.
void DelayMs(volatile unsigned int Msec); // Función que realiza una espera con
unidad en ms.
static int Set_Command_Mode (void); // Activa la comunicación por comando con el
XBee
static int AT_comand (char comand[], char response[]); // Envia un comando y
espera la respuesta
static int Exit_Command_Mode (void); // Desactiva la comunicación por comandos
con el XBee
static int Get_RSSI_Sw (void) ; // Preguntar


/*****************************************************************************/
/*                  Exported functions prototype                             */
/*****************************************************************************/

int Init_XBee (void); // Inicializa el XBee
```

```
int Send_BYTE (char B); // Envia un char al XBee
char Receive_BYTE (void); // Recibe un char del XBee
int Send_Frame (unsigned char *data, char lenght); // Envia una trama al XBee
char Sent_Frame (void); // Comprueba que se ha enviado la trama
void Receive_Frames (char BF); // Recibe una trama del XBee
void Stop_Receive_Frames (void); // Detiene la recepción de tramas
int Read_Frame (char *data, char length); // Almacena el valor del buffer de
comunicación
char Received_Frame (void); // Comprueba si se ha recibido la trama
Information_XBee Generate_information_XBee (char num_Ident, char ErrorPos, char
AlarmaC, char AlarmaP, char AlarmaG, char AlarmaM, position pos); // Genera la
trama de la red
void Send_information (Information_XBee Inf); // Tramisión de la trama con
información en float e int
void Send_information_ASCII (Information_XBee Inf); // Trasmisión de la trama con
nomenclatura ASCII
unsigned char change_ASCII (char num); // Trasforma num en ASCII

/*****************************************************************************/
/*                        Local functions                                    */
/*****************************************************************************/

// Función que almacena un char de la trama recivida
static void Get_Char (unsigned char C) {
       if (rx_mode == SINGLE){ // Modo de operación SINGLE, un único char (usado
para la inicialización)
              B = C ;
                rx_end = 1 ;
       }
       else {
              if (receiving_frame){ // Modo de operación continuo y hemos
recibido frame (usado para la comunicación)
                     RX_Buffer [RXB_Index] = C ; // Almacenamos el char en el
buffer
                     if (RXB_Index == (RXB_Lenght-1)) { // Comprobamos si nos
encontramos en el final de la trama
                            // Indicamos que no recibimos el frame y apuntamos a
la otra posición del buffer.
                            receiving_frame = 0 ;
                            RXB_Frame_Received = 1 ;
                            Save_Information(RX_Buffer);
                     }
                     RXB_Index ++ ;
                     if (RXB_Index == 180) { // Comprobamos si la trama es
demasiado larga
                            receiving_frame = 0 ;
                     }
              }
              else if (C == Begin_Frame) { // Modo de operación continuo y no
hemos recibido un frame
                     RXB_Index = 0 ;
                     RX_Buffer [RXB_Index] = C ; // Almacena la primera posición
del buffer actual el comienzo del frame
                     receiving_frame = 1 ; // Indicamos que hemos recibido un
frame
                     RXB_Index ++ ;
              }
       }
  return ;
}
```

```
// Función enviar un char de la trama enviada
static void TXINT_Action (void) {
	SCIa_PutChar (TX_Buffer[TXB_Index]) ; // Enviamos el char por el SCIa
(USART0)
	TXB_Index ++ ;
	if (TXB_Index > (TXB_Length-1)) { // Comprobamos que llegamos al final de
la trama a enviar
		SCIa_TXINT (DISABLED) ; // Deshabilitamos las interrupciones
		TXB_Transmited = 1 ; // Indicamos que ya hemos enviado la trama
	}
}

// Función de espera n ms (Utilizado en la inicialización para esperar las
respuestas del Xbee)
void DelayMs(volatile unsigned int Msec)
{
	int i = 0 ;

	while( Msec-- )                                  // 1ms loop at 16MHz CPUCLK
o 2ms loop at 8MHz CPUCLK
	{
		for (i=0; i<8000; i++)     asm(" nop ");
	}

} // end DelayMs()

// Función que active la comunicación por comandos
static int Set_Command_Mode (void) {
	DelayMs (2) ;
	Send_BYTE ('+') ;
	Send_BYTE ('+') ;
	Send_BYTE ('+') ;
	DelayMs (2) ;
	if (Receive_BYTE() != 'O') return -1 ;
	if (Receive_BYTE() != 'K') return -1 ;
	if (Receive_BYTE() != '\r') return -1 ;
	return 0 ;
}

// Función que envia un comando y obtiene la respuesta
static int AT_comand (char comand[], char response[]) {

	unsigned char i ;

	for (i=0; i<80; i++) {
		Send_BYTE (comand[i]) ;
		if (comand[i] == '\r') break ;
	}
	for (i=0; i<80; i++) {
		response [i] = Receive_BYTE () ;
		if (response [i] == '\r') break ;
	}
	if (response[i] != '\r') return -1 ;
	return 0 ;
}
```

```
// Finalización de la comunicación por comandos con el XBee
static int Exit_Command_Mode (void) {
	Send_BYTE ('A') ;
	Send_BYTE ('T') ;
	Send_BYTE ('C') ;
	Send_BYTE ('N') ;
	Send_BYTE (' ') ;
	Send_BYTE ('\r') ;
	if (Receive_BYTE() != 'O') return -1 ;
	if (Receive_BYTE() != 'K') return -1 ;
	if (Receive_BYTE() != '\r') return -1 ;
	return 0 ;
}

// Preguntar
static int Get_RSSI_Sw (void) {
	char st[6] = {0,0,0,0,0,0} ;

	Set_Command_Mode () ;
	if (AT_comand ("ATDB\r", st) < 0) return -1 ;
	Exit_Command_Mode () ;
	return atoi (st) ;
}



/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

// Inicialización del XBee.
int Init_XBee (void) {

	char st[8] ;

	SCIa_Init (TXINT_Action, Get_Char) ; // Inicializamos el SCIa (USART0)

    DelayMs (550) ; // Esperamos mas de un segundo sin enviar datos al XBee
	//Activamos el modo de comunicación por comandos
    Send_BYTE ('+') ;
    Send_BYTE ('+') ;
    Send_BYTE ('+') ;

	// Esperamos hasta obtener la respuesta de XBee
    if (Receive_BYTE() != 'O') return -1 ;
    if (Receive_BYTE() != 'K') return -1 ;
    if (Receive_BYTE() != '\r') return -1 ;

    AT_comand ("ATGT 2\r", st) ;                    // Guard Times = 2 ms
    AT_comand ("ATRO 0\r", st) ;                    // Packetization Timeout.
RO=0 to transmit characters immediately
    AT_comand ("ATP0 1\r", st) ;                    // RSSI PWM enabled
    AT_comand ("ATRP FF\r", st) ;                   // PWM output always on
    Exit_Command_Mode () ; // Finalización del modo de comunicación por comandos
para la inicialización.

    return 0 ;
}
```

```
// Envia un char a través del RX0 del SCIa (USART0)
int Send_BYTE (char B) {
	SCIa_PutChar(B) ;

	return 0 ;
}

// Espera a la recepción de un BYTE
char Receive_BYTE (void) {
	rx_mode = SINGLE ;
	rx_end = 0 ;
	while (!rx_end) ;
	return B ;
}

// Enviamos la trama
int Send_Frame (unsigned char *data, char lenght) {

	TXB_Length = lenght ;
	//memcpy (TX_Buffer, data, TXB_Length) ;
	for(int i = 0; i<lenght ; i++){
		TX_Buffer[i]=data[i];
	}
	TXB_Index = 1 ;
	TXB_Transmited = 0 ;
	Send_BYTE(TX_Buffer[0]);
	SCIa_TXINT (ENABLED) ;

	DelayMs (1) ;
	return 0 ;
}

// Comprueba si hemos enviado la trama
char Sent_Frame (void) {
	return TXB_Transmited ;
}

// Recibe la trama indicandole el inicio y final de esta.
void Receive_Frames (char BF) {
	Begin_Frame = BF;
	RXB_Lenght = 13;
	rx_mode = CONTINOUS ;
     // BF = character that starts the frame
     // EF = character that ends the frame
}

// Interrumpe la recepción de una trama.
void Stop_Receive_Frames (void) {
	rx_mode = SINGLE ;
}

// Lee una trama recibida y la almacena en el buffer
int Read_Frame (char *data, char length) {

	unsigned char i ;

	if (!RXB_Frame_Received) return -1 ;
	for (i=0; i<80; i++) {
		data[i] = RX_Buffer [i] ;
		if (data[i] == End_Frame) break ;
	}
```

```
        length = i+1 ;
        RXB_Frame_Received = 0 ;
        return 0 ;
}

// Comprobamos si hemos recibido una trama
char Received_Frame (void) {
    // TRUE if a new frame has been received
        return RXB_Frame_Received ;
}

// Genera la información de la trama enviada
Information_XBee Generate_information_XBee (char num_Ident, char ErrorPos, char
AlarmaC, char AlarmaP, char AlarmaG, char AlarmaM, position pos){
        Information_XBee Data;
        char Aux=0;

        Aux = Aux | (num_Ident&(0b00000111));
        Aux = Aux | ((ErrorPos<<3)&(0b00001000));
        Aux = Aux | ((AlarmaC<<4)&(0b00010000));
        Aux = Aux | ((AlarmaP<<5)&(0b00100000));
        Aux = Aux | ((AlarmaG<<6)&(0b01000000));
        Aux = Aux | ((AlarmaM<<7)&(0b10000000));

        Data.Identification_Error_Alarm=Aux;
        Data.Longitude.number = pos.Longitude;
        Data.Latitude.number = pos.Latitude;
        Data.Altitude = pos.Altitude;

        return Data;
}

// Envia la trama con la información en formato float e int
void Send_information (Information_XBee Inf){

        // Información: $XB NºIdent,Error,Alarma(1) Lat(4) Long(4) Alt(4)

        unsigned char buffer[19];

        buffer[0]='$';
        buffer[1]='X';
        buffer[2]='B';

        buffer[3]=Inf.Identification_Error_Alarm;

        buffer[4]=Inf.Longitude.bytes[3];
        buffer[5]=Inf.Longitude.bytes[2];
        buffer[6]=Inf.Longitude.bytes[1];
        buffer[7]=Inf.Longitude.bytes[0];

        buffer[8]=Inf.Latitude.bytes[3];
        buffer[9]=Inf.Latitude.bytes[2];
        buffer[10]=Inf.Latitude.bytes[1];
        buffer[11]=Inf.Latitude.bytes[0];

        buffer[12]=Inf.Altitude>>8;
        buffer[13]=Inf.Altitude;


        Send_Frame(buffer, 14);
}
```

```
// Envia la trama en nomenclatura ASCII
void Send_information_ASCII (Information_XBee Inf){
	unsigned char buffer[100];
	char leght = 35;
	char Aux = 0;
	int Aux2 = 0;
	float Aux3 = 0.0;

	buffer[0]='$';
	buffer[1]='X';
	buffer[2]='B';
	buffer[3]=',';

	Aux = Inf.Identification_Error_Alarm & 0b00000111;
	buffer[4]=change_ASCII(Aux);
	buffer[5]=',';

	if (Inf.Identification_Error_Alarm & 0b00001000){
		buffer[6]='1';
	} else {
		buffer[6]='0';
	}
	buffer[7]=',';

	if (Inf.Identification_Error_Alarm & 0b00010000){
		buffer[8]='1';
		} else {
		buffer[8]='0';
	}
	buffer[9]=',';

	if (Inf.Identification_Error_Alarm & 0b00100000){
		buffer[10]='1';
		} else {
		buffer[10]='0';
	}
	buffer[11]=',';

	Aux = Inf.Identification_Error_Alarm & 0b00000111;
	if (Inf.Identification_Error_Alarm & 0b01000000){
		buffer[12]='1';
		} else {
		buffer[12]='0';
	}
	buffer[13]=',';

	Aux = Inf.Identification_Error_Alarm & 0b00000111;
	if (Inf.Identification_Error_Alarm & 0b10000000){
		buffer[14]='1';
		} else {
		buffer[14]='0';
	}
	buffer[15]=',';

	if(Inf.Longitude.number>=0){
		buffer[16]='+';
		Aux3 = Inf.Longitude.number;
	} else {
		buffer[16]='-';
		Aux3 = -Inf.Longitude.number;
	}
```

```
Aux2 = (int)Aux3;
Aux = Aux2/100;
Aux2 = Aux2%100;
buffer[17]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[18]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[19]=change_ASCII(Aux);

buffer[20]='.';

Aux2 = ((int)(Aux3*100)%100);
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[21]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[22]=change_ASCII(Aux);

buffer[23]=',';

if(Inf.Latitude.number>=0){
       buffer[24]='+';
       Aux3 = Inf.Latitude.number;
       } else {
       buffer[24]='-';
       Aux3 = -Inf.Latitude.number;
}
Aux2 = (int)Aux3;
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[25]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[26]=change_ASCII(Aux);

buffer[27]='.';

Aux2=((int)(Aux3*100)%100);
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[28]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[29]=change_ASCII(Aux);

buffer[30]=',';

if(Inf.Altitude>=0){
       buffer[31]='+';
       Aux2 = Inf.Altitude;
       } else {
       buffer[31]='-';
       Aux2 = -Inf.Altitude;
}
Aux = Aux2/100;
Aux2 = Aux2%100;
buffer[32]=change_ASCII(Aux);
```

```
        Aux = Aux2/10;
        Aux2 = Aux2%10;
        buffer[33]=change_ASCII(Aux);
        Aux = Aux2/1;
        Aux2 = Aux2%1;
        buffer[34]=change_ASCII(Aux);

        Send_Frame(buffer, leght);

}

// Trasforma a ASCII
unsigned char change_ASCII (char num){
        unsigned char ASCII='0';

        if(num == 1){
                ASCII = '1';
        }
        if(num == 2){
                ASCII = '2';
        }
        if(num == 3){
                ASCII = '3';
        }
        if(num == 4){
                ASCII = '4';
        }
        if(num == 5){
                ASCII = '5';
        }
        if(num == 6){
                ASCII = '6';
        }
        if(num == 7){
                ASCII = '7';
        }
        if(num == 8){
                ASCII = '8';
        }
        if(num == 9){
                ASCII = '9';
        }

        return ASCII;
}
```

Anexo: Fichero XBEE.h

Código implementado en el fichero XBEE.h:

```
#ifndef XBEE_H_
#define XBEE_H_

#include "GPS.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Typedefs and structures                          */
/*****************************************************************************/

typedef union{
	float number;
	unsigned char bytes[4];
} Byte_Float;

typedef struct {
	char Identification_Error_Alarm ; // (0123:identificador, 4:Error GPS,
5:Alarma, 67:Reservado)
	Byte_Float Longitude ;   // en grados
	Byte_Float Latitude ;    // en grados
	int Altitude ;    // en metros
} Information_XBee ;

/*****************************************************************************/
/*                          Exported functions                               */
/*****************************************************************************/

   int Init_XBee (void); // Inicializa el XBee
   int Send_BYTE (char B); // Envia un char al XBee
   char Receive_BYTE (void); // Recibe un char del XBee
   int Send_Frame (unsigned char *data, char lenght); // Envia una trama al XBee
   char Sent_Frame (void); // Comprueba que se ha enviado la trama
   void Receive_Frames (char BF); // Recibe una trama del XBee
   void Stop_Receive_Frames (void); // Detiene la recepción de tramas
   int Read_Frame (char *data, char length); // Almacena el valor del buffer de
comunicación
   char Received_Frame (void); // Comprueba si se ha recibido la trama
   Information_XBee Generate_information_XBee (char num_Ident, char ErrorPos,
char AlarmaC, char AlarmaP, char AlarmaG, char AlarmaM, position pos); // Genera
la trama de la red
   void Send_information (Information_XBee Inf); // Tramisión de la trama con
información en float e int
   void Send_information_ASCII (Information_XBee Inf); // Trasmisión de la trama
con nomenclatura ASCII
   unsigned char change_ASCII (char num); // Trasforma num en ASCII

#endif /* XBEE_H_ */
```

Anexo: Fichero BLUETOOTH.c

Código implementado en el fichero BLUETOOTH.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <string.h>
#include <stdlib.h>

#include "BLUETOOTH.h"
#include "SPI.h"
#include "BRUJULA.h"
#include "GPS.h"
#include "BUFFER.h"
#include "XBEE.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/

static char SPIR_Buffer [2][80]; // Almacenamos las tramas recibida a traves del
SPI
static char SPIR_Index = 0, SPIR_Row = 0, SPIR_Length = 0; // Nos desplazamos a
traves del buffer de recepción

static char SPIT_Buffer [80]; // Almacenamos la trama que trasmitimos a traves
del SPI
static char SPIT_Index = 0, SPIT_Length = 0; // Nos desplazamos a traves del
buffer de trasmisión

static char byte; // Almacenamos el byte recibido a traves del SPI en modo SINGLE

static enum {SINGLE, CONTINUOS} trx_mode; // Describe el modo de trasmisión (byte
/ trama)

static char end_trasmision=1; // Indica la finalización de la trasmisión de la
trama
static char end_reception = 1, first_received = 0; // Indica la finalización de
la recepción
static char end_byte=0; // Indica la finalización de la trasmisión del byte

Bluetooth_mode mode = ACTIVATE5;

/*****************************************************************************/
/*                          Local functions prototype                        */
/*****************************************************************************/

static void Get_Char(unsigned char C); // Función que almacena un byte individual
o un byte de una trama
static void Send_Char(unsigned char C); // Función que envia un byte individual
correspondiente a una trama

/*****************************************************************************/
/*                  Exported functions prototype                             */
/*****************************************************************************/

int Init_Bluetooth (void); // Inicializamos la comunicación bluetooth
int Send_byte (char B); // Enviamos un byte
int Send_frame (char *data, char length); // Enviamos una trama
```

```
char Send_Receive_byte (void); // Comprobamos si ha finalizado la trasmisión
char Sent_frame (void); // Comprobamos si ha finalizado la trasmisión
int Receive_frame (char BI, char length); // Lectura de una trama
char Received_frame (void); // Comprobamos si ha finalizado la recepción
int Get_Frame (char *data); // Almacenamos la trama recibida fuera del fichero
char Get_Byte (void); // Almacenamos el byte recibido fuera del fichero
Information_Bluetooth Generate_information_Bluetooth (char num_Ident, char
ErrorPos, char alarma1, char alarma2, char alarma3, char alarma4, char  ErrorG,
char ErrorM, char ErrorB, position pos, float orient); // Gneración de la trama
enviada
void Send_information_Bluetooth (Information_Bluetooth inf); // Envio de la trama
en formato float e int
void Change_Mode (char *data); // cambio de modo
Bluetooth_mode Get_Mode (void); // devuelve el modo de funcionamiento
void Send_information_Bluetooth_ASCII (Information_Bluetooth inf); // Envio de la
trama en nomenclatura ASCII

/*****************************************************************************/
/*                        Local functions                                    */
/*****************************************************************************/

// Almacenamos el byte individual o un byte de una trama
static void Get_Char (unsigned char C)
{
	if (trx_mode == SINGLE){
		byte = C;
		end_byte = 1;
	} else if(!end_reception){
		if (C == '&') first_received = 1;
		if (first_received){
			if(SPIT_Index != (SPIT_Length)){
				SPIR_Buffer[SPIR_Row][SPIR_Index] = C;
				SPIR_Index ++;
			} else {
				Change_Mode(SPIR_Buffer[SPIR_Row]);
				SPIR_Index = 0;
				SPIR_Row = (SPIR_Row+1)%2;
				end_reception = 1;
				first_received = 0;
			}
			if(end_trasmision){
				SPI_MasterTransmit (0);
			}
		} else {
			end_reception = 1;
			first_received = 0;
		}
	}
}
// Enviamos el siguiente byte de la trama a no ser que haya finalizado
static void Send_Char (unsigned char C)
{
	if (!end_trasmision && trx_mode==CONTINUOS && SPIT_Length>SPIT_Index){
		if(end_reception){
			if(C == (0x16)){
				end_trasmision=0;
				first_received = 1;
				SPIR_Buffer [SPIR_Row][SPIR_Index] = C;
				SPIT_Length = 3;
				SPIR_Index++;
			}
		}
```

```
		SPI_MasterTransmit (SPIT_Buffer[SPIT_Index]);
		SPIT_Index ++;
	} else {
		end_trasmision = 1;
		SPIT_Index = 0;
	}
}

/*****************************************************************************/
/*                        Exported functions                                 */
/*****************************************************************************/

// Inicialización de la comunicación bluetooth
int Init_Bluetooth (void)
{
	SPI_MasterInit(Get_Char, Send_Char);

	return 0;
}

// ENviamos un byte a través del SPI
int Send_byte (char B)
{
	end_byte = 0;
	trx_mode = SINGLE;
	SPI_MasterTransmit(B);


	return 0;
}

// Enviamos una trama a través del SPI
int Send_frame (char *data, char length)
{
	memcpy (SPIT_Buffer, data, length);
	SPIT_Length = length;
	end_trasmision = 0;

	if(end_reception==1){
		SPIT_Index = 1;
		trx_mode = CONTINUOS;
		SPI_MasterTransmit(data[0]);
	} else {
		SPIT_Index = 0;
	}
	return 0;
}

int Receive_frame (char BI, char length){

	SPIR_Length = length;
	end_reception =0;

	if(end_trasmision==1){
		trx_mode = CONTINUOS;
		SPI_MasterTransmit(0);
		SPIR_Index=0;
	}

	return 1;
}
```

```
// Comprobamos si ya ha sido trasmitido el byte.
char Send_Receive_byte (void)
{
	return end_byte;
}

// Comprobamos si la trama ya ha sido trasmitida
char Sent_frame (void)
{
	return end_trasmision;
}

char Received_frame (void)
{
	return end_reception;
}

// Almacenamos fuera del fichero la trama recibida
int Get_Frame (char *data)
{
	unsigned char i;

	if (!end_trasmision) return -1;
	for (i=0; i<80; i++){
		data[i] = SPIR_Buffer [(SPIR_Row+1)%2][i];
		if (i == SPIT_Length) break;
	}
	 end_trasmision = 0;
	 return 0;
}

// Almacenamos fuera del fichero el byte recibido
char Get_Byte (void)
{
	if(end_byte == 1){
		end_byte = 0;
		return byte;
	} else {
		return 10; // Modificar para avisar de que no se a recibido nada
	}
}

// Genera la trama enviada
Information_Bluetooth Generate_information_Bluetooth (char num_Ident, char
ErrorPos,char alarma1, char alarma2, char alarma3, char alarma4, char  ErrorG,
char ErrorM, char ErrorB, position pos, float orient){
	Information_Bluetooth inf;
	Informacion_Bluetooth_Alarma AuxPCBx;
	char Aux=0;
	char numErrores=0;

	Aux = Aux | (num_Ident&(0b00000111));
	Aux = Aux | ((ErrorPos<<3)&(0b00001000));
	if((alarma1==1)||(alarma2==1)||(alarma3==1)||(alarma4==1)){
		Aux = Aux | (0b00010000);
	} else {
		Aux = Aux | (0b00000000);
	}
	Aux = Aux | ((ErrorG<<5)&(0b00100000));
	Aux = Aux | ((ErrorM<<6)&(0b01000000));
	Aux = Aux | ((ErrorB<<7)&(0b10000000));
```

```
	inf.Identification_Error = Aux;
	inf.Longitude.number = pos.Longitude;
	inf.Latitude.number = pos.Latitude;
	inf.orientation.number = orient;
	inf.Altitude = pos.Altitude;

	for(char i=0; i<10; i++){
		AuxPCBx = Get_Information_PCBx(i);

		if((AuxPCBx.Identification_Alarm&0b10000000) ||
(AuxPCBx.Identification_Alarm&0b01000000) ||
(AuxPCBx.Identification_Alarm&0b00100000) ||
(AuxPCBx.Identification_Alarm&0b00010000) ||
(AuxPCBx.Identification_Alarm&0b00001000)){
			inf.Alarmas[numErrores]=AuxPCBx;
			numErrores ++;
		}
	}

	inf.numberE = numErrores;

	return inf;
}

// Envia la trama en formato float e int
void Send_information_Bluetooth (Information_Bluetooth inf){

	int i=0;
	int j=0;
	char buffer[15+10*13];

	buffer[0]='&';//0x16;
	buffer[1]='B';
	buffer[2]='T';

	buffer[3]=inf.Identification_Error;

	buffer[4]=inf.Longitude.bytes[3];
	buffer[5]=inf.Longitude.bytes[2];
	buffer[6]=inf.Longitude.bytes[1];
	buffer[7]=inf.Longitude.bytes[0];

	buffer[8]=inf.Latitude.bytes[3];
	buffer[9]=inf.Latitude.bytes[2];
	buffer[10]=inf.Latitude.bytes[1];
	buffer[11]=inf.Latitude.bytes[0];

	buffer[12]=inf.Altitude>>8;
	buffer[13]=inf.Altitude;

	buffer[14]=inf.numberE;

	j=17;
	if (inf.numberE!=0){
		for(i=0; i<inf.numberE; i++){
			buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].Identification_Alarm;
			j++;

			buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].distance.bytes[3];
			j++;
			buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].distance.bytes[2];
			j++;
```

```
                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].distance.bytes[1];
                        j++;
                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].distance.bytes[0];
                        j++;

                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].direction.bytes[3];
                        j++;
                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].direction.bytes[2];
                        j++;
                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].direction.bytes[1];
                        j++;
                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].direction.bytes[0];
                        j++;

                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].direction_R_L;
                        j++;

                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].Difference_Altitude>>8;
                        j++;
                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].Difference_Altitude;
                        j++;

                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].direction_up_down;
                        j++;
                }
        }
        Send_frame(buffer, 15+15*inf.numberE);
}

// Envia la trama en nomenclatura ASCII
void Send_information_Bluetooth_ASCII (Information_Bluetooth inf){

        unsigned char buffer[500];
        char leght = 40+inf.numberE*39;
        char Aux = 0;
        int Aux2 = 0;
        float Aux3 = 0.0;
        int i=0;
        int j=0;

        buffer[0]='&';
        buffer[2]='B';
        buffer[3]='T';
        buffer[4]=',';

        Aux = inf.Identification_Error & 0b00000111;
        buffer[5]=change_ASCII(Aux);
        buffer[6]=',';

        if (inf.Identification_Error & 0b00001000){
                buffer[7]='1';
                } else {
                buffer[7]='0';
        }
        buffer[8]=',';

        if (inf.Identification_Error & 0b00010000){
                buffer[9]='1';
                } else {
                buffer[9]='0';
        }
        buffer[10]=',';
```

```
if (inf.Identification_Error & 0b00100000){
       buffer[11]='1';
       } else {
       buffer[11]='0';
}
buffer[12]=',';

if (inf.Identification_Error & 0b01000000){
       buffer[13]='1';
       } else {
       buffer[13]='0';
}
buffer[14]=',';

if (inf.Identification_Error & 0b10000000){
       buffer[15]='1';
       } else {
       buffer[15]='0';
}
buffer[16]=',';

if(inf.Longitude.number>=0){
       buffer[17]='+';
       Aux3 = inf.Longitude.number;
       } else {
       buffer[17]='-';
       Aux3 = -inf.Longitude.number;
}
Aux2 = (int)Aux3;
Aux = Aux2/100;
Aux2 = Aux2%100;
buffer[18]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[19]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[20]=change_ASCII(Aux);

buffer[21]='.';

Aux2 = ((int)(Aux3*100)%100);
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[22]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[23]=change_ASCII(Aux);

buffer[24]=',';

if(inf.Latitude.number>=0){
       buffer[25]='+';
       Aux3 = inf.Latitude.number;
       } else {
       buffer[25]='-';
       Aux3 = -inf.Latitude.number;
}
Aux2 = (int)Aux3;
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
```

```
buffer[26]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[27]=change_ASCII(Aux);

buffer[28]='.';

Aux2=((int)(Aux3*100)%100);
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[29]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[30]=change_ASCII(Aux);

buffer[31]=',';

if(inf.Altitude>=0){
       buffer[32]='+';
       Aux2 = inf.Altitude;
       } else {
       buffer[32]='-';
       Aux2 = -inf.Altitude;
}
Aux = Aux2/100;
Aux2 = Aux2%100;
buffer[33]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[34]=change_ASCII(Aux);
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[35]=change_ASCII(Aux);

buffer[36]=',';
buffer[37]= change_ASCII(inf.numberE);

j=38;
if (inf.numberE!=0){
       for(i=0; i<inf.numberE; i++){

              buffer[i+j]=',';
              j++;

              buffer[j+i]=11;
              j++;
              buffer[j+i]=13;
              j++;

              Aux = inf.Alarmas[i].Identification_Alarm & 0b00000111;
              buffer[j+i]=change_ASCII(Aux);
              j++;
              buffer[j+i]=',';
              j++;

              if (inf.Alarmas[i].Identification_Alarm & 0b00001000){
                     buffer[j+i]='1';
                     } else {
                     buffer[j+i]='0';
              }
              j++;
              buffer[j+i]=',';
```

```
j++;

if (inf.Alarmas[i].Identification_Alarm & 0b00010000){
       buffer[j+i]='1';
       } else {
       buffer[j+i]='0';
}
j++;
buffer[j+i]=',';
j++;

if (inf.Alarmas[i].Identification_Alarm & 0b00100000){
       buffer[j+i]='1';
       } else {
       buffer[j+i]='0';
}
j++;
buffer[j+i]=',';
j++;

if (inf.Alarmas[i].Identification_Alarm & 0b01000000){
       buffer[j+i]='1';
       } else {
       buffer[j+i]='0';
}
j++;
buffer[j+i]=',';
j++;

if (inf.Alarmas[i].Identification_Alarm & 0b10000000){
       buffer[j+i]='1';
       } else {
       buffer[j+i]='0';
}
j++;
buffer[j+i]=',';
j++;

if(inf.Alarmas[i].distance.number>=0.0){
       buffer[i+j]='+';
       Aux3 = inf.Alarmas[i].distance.number;
       } else {
       buffer[i+j]='-';
       Aux3 = -inf.Alarmas[i].distance.number;
}
j++;
Aux2 = (int)Aux3;
Aux = Aux2/10000;
Aux2 = Aux2%10000;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;
Aux = Aux2/1000;
Aux2 = Aux2%1000;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;
Aux = Aux2/100;
Aux2 = Aux2%100;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
```

```
j++;
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;

buffer[i+j]='.';
j++;

Aux2 = ((int)(Aux3*100)%100);
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;

buffer[i+j]=',';
j++;

if(inf.Alarmas[i].direction.number>=0){
       buffer[i+j]='+';
       Aux3 = inf.Alarmas[i].direction.number;
       } else {
       buffer[i+j]='-';
       Aux3 = -inf.Alarmas[i].direction.number;
}
j++;
Aux2 = (int)Aux3;
Aux = Aux2/100;
Aux2 = Aux2%100;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;

buffer[i+j]='.';
j++;

Aux2 = ((int)(Aux3*100)%100);
Aux = Aux2/10;
Aux2 = Aux2%10;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;
Aux = Aux2/1;
Aux2 = Aux2%1;
buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
j++;

buffer[i+j]=',';
j++;

buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].direction_R_L;
j++;
```

```
                        buffer[i+j]=',';
                        j++;

                        if(inf.Alarmas[i].Difference_Altitude>=0){
                                buffer[i+j]='+';
                                Aux2 = inf.Alarmas[i].Difference_Altitude;
                                } else {
                                buffer[i+j]='-';
                                Aux2 = -inf.Alarmas[i].Difference_Altitude;
                        }
                        j++;
                        Aux = Aux2/100;
                        Aux2 = Aux2%100;
                        buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
                        j++;
                        Aux = Aux2/10;
                        Aux2 = Aux2%10;
                        buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
                        j++;
                        Aux = Aux2/1;
                        Aux2 = Aux2%1;
                        buffer[i+j]=change_ASCII(Aux);
                        j++;

                        buffer[i+j]=',';
                        j++;
                        buffer[i+j]=inf.Alarmas[i].direction_up_down;
                        j++;
                }
        }
        Send_frame(buffer, 38+42*inf.numberE);
}

// Cambia el modo de funcionamiento
void Change_Mode (char *data){
        if(data[1]==0){
                mode = DESACTIVATE;
        } else if(data[1]==2){
                mode=ACTIVATE1;
        } else if(data[1]==3){
                mode=ACTIVATE5;
        } else if(data[1]==4){
                mode=ACTIVATE10;
        } else {
                mode = RESET;
        }
}

// Devuelve el modo de funcionamiento
Bluetooth_mode Get_Mode(void){
        return mode;
}
```

Anexo: Fichero BLUETOOTH.h

Código implementado en el fichero BLUETOOTH.h:

```
#ifndef BLUETOOTH_H_
#define BLUETOOTH_H_

#include "XBEE.h"

/*******************************************************************************/
/*                          Typedefs and structures                            */
/*******************************************************************************/

typedef enum {SEND, RECEIVED, SEND_RECEIVED} BLUETOOTH_STATUS ;
typedef enum {DESACTIVATE, ACTIVATE1, ACTIVATE5, ACTIVATE10, RESET}
Bluetooth_mode;

// Estructura para los módulos externos
typedef struct {
	char Identification_Alarm; //
	Byte_Float distance; // en metros
	Byte_Float direction; // en grados
	char direction_R_L;
	int Difference_Altitude;
	char direction_up_down;
} Informacion_Bluetooth_Alarma;

// Estructura para los módulo
typedef struct {
	char Identification_Error ; // (0123:identificador, 4:Error GPS, 5:Error
Brújula, 67:Reservado)
	Byte_Float Longitude ;   // en grados
	Byte_Float Latitude ;    // en grados
	Byte_Float orientation; // en grados
	int Altitude ;    // en metros
	char numberE;
	Informacion_Bluetooth_Alarma Alarmas[10];
} Information_Bluetooth ;

/*******************************************************************************/
/*                          Exported functions                                 */
/*******************************************************************************/

int Init_Bluetooth (void); // Inicializamos la comunicación bluetooth
int Send_byte (char B); // Enviamos un byte
int Send_frame (char *data, char length); // Enviamos una trama
char Send_Receive_byte (void); // Comprobamos si ha finalizado la trasmisión
char Sent_frame (void); // Comprobamos si ha finalizado la trasmisión
int Receive_frame (char BI, char length); // Lectura de una trama
char Received_frame (void); // Comprobamos si ha finalizado la recepción
int Get_Frame (char *data); // Almacenamos la trama recibida fuera del fichero
char Get_Byte (void); // Almacenamos el byte recibido fuera del fichero
Information_Bluetooth Generate_information_Bluetooth (char num_Ident, char
ErrorPos, char alarma1, char alarma2, char alarma3, char alarma4, char  ErrorG,
char ErrorM, char ErrorB, position pos, float orient); // Gneración de la trama
enviada
void Send_information_Bluetooth (Information_Bluetooth inf); // Envio de la trama
en formato float e int
void Change_Mode (char *data); // cambio de modo
Bluetooth_mode Get_Mode (void); // devuelve el modo de funcionamiento
```

```
void Send_information_Bluetooth_ASCII (Information_Bluetooth inf); // Envio de la
trama en nomenclatura ASCII

#endif /* BLUETOOTH_H_ */
```

Anexo: Fichero BUFFER.c

Código implementado en el fichero BUFFER.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#include "XBEE.h"
#include "BLUETOOTH.h"
#include "GPS.h"
#include "BRUJULA.h"

/*****************************************************************************/
/*                          Local variables                                  */
/*****************************************************************************/

const double PI = 3.1415926535 ;
const Earth_float Earth_radius = 6378137.0 ;

static char numIdentification = 1;

static Informacion_Bluetooth_Alarma Information_PCBs_Bluetooth [10];
static Information_XBee Information_PCBs_XBee [10];

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of local functions                    */
/*****************************************************************************/

float haversine (float x);
float Distance (const position P1, const position P2);
float normpi (float tita);
float Direction (const position P1, const position P2);

/*****************************************************************************/
/*                          Prototypes of exported functions                 */
/*****************************************************************************/

void Save_Information (char *inf);
void Generate_information (void);
Informacion_Bluetooth_Alarma Get_Information_PCBx (char PCBx);

/*****************************************************************************/
/*                          Local functions                                  */
/*****************************************************************************/

float haversine (float x){
	return pow(sin(x/2),2) ;
}

float Distance (const position P1, const position P2){
	float h ;
	position X, Y;

	X.Latitude = P2.Latitude*3.1415/180.0;
	X.Longitude = P2.Longitude*3.1415/180.0;
	X.Altitude = 0;
```

```
	Y.Latitude = P1.Latitude*3.1415/180.0;
	Y.Longitude = P1.Longitude*3.1415/180.0;
	Y.Altitude = 0;

	h = haversine(Y.Latitude - X.Latitude) +
cos(Y.Latitude)*cos(X.Latitude)*haversine(Y.Longitude - X.Longitude) ;
	return 2*(Earth_radius + Y.Altitude)*asin(sqrt(h)) ;
}

float Direction (position P1, position P2){
	float d1, d2, nz, mz;
	position X, Y;

	X.Latitude = P2.Latitude*3.1415/180.0;
	X.Longitude = P2.Longitude*3.1415/180.0;
	X.Altitude = 0;

	Y.Latitude = P1.Latitude*3.1415/180.0;
	Y.Longitude = P1.Longitude*3.1415/180.0;
	Y.Altitude = 0;


	nz = log(tan(Y.Latitude/2+PI/4)/tan(X.Latitude/2+PI/4));
	mz = fabs(X.Longitude-Y.Longitude);
	d1 = atan2(mz,nz)*180/PI;
	d1=360-d1;
	d2=d1-Get_Orientation();
	d2=normpi(d2);

	return d2;
}

float normpi (float tita){
	float tita_aux;

	if(tita<0){
		tita_aux = tita+360;
	} else if(tita>360){
		tita_aux = tita-360;
	} else {
		tita_aux = tita;
	}

	return tita_aux;
}

int Diference (const position P1, const position P2){
	int h;
	h=P1.Altitude-P2.Altitude;
	return h;
}

/*****************************************************************************/
/*                        Exported functions                                 */
/*****************************************************************************/

void Save_Information (char *inf){
	char ident;
	ident= inf[2]&0b00000111;
	ident= ident;
	Information_XBee Aux;
```

```
        int auxA;

        if (ident>numIdentification){
                ident=ident-2;
        } else {
               ident = ident -1;
        }

        // Obtención del identificador
        Aux.Identification_Error_Alarm = inf[2];

        // Obtención de la long de la PCB emisora
        Aux.Longitude.bytes[3]=inf[3];
        Aux.Longitude.bytes[2]=inf[4];
        Aux.Longitude.bytes[1]=inf[5];
        Aux.Longitude.bytes[0]=inf[6];

        // Obtención de la lat de la PCB emisora
        Aux.Latitude.bytes[3]=inf[7];
        Aux.Latitude.bytes[2]=inf[8];
        Aux.Latitude.bytes[1]=inf[9];
        Aux.Latitude.bytes[0]=inf[10];

        // Obtención de la Alt de la PCB emisora
        auxA=inf[11];
        auxA=(auxA) <<8;
        Aux.Altitude= auxA + inf[12];

        // Almacenamos
        Information_PCBs_XBee[ident] = Aux;
}

void Generate_information (void){
        Informacion_Bluetooth_Alarma Aux;
        position aux1;
        position aux2;

        for (int i=0; i<10; i++){

               // Obtención del identificador
               Aux.Identification_Alarm =
Information_PCBs_XBee[i].Identification_Error_Alarm;

               if((Aux.Identification_Alarm&0b10000000) ||
(Aux.Identification_Alarm&0b00100000) || (Aux.Identification_Alarm&0b01000000) ||
(Aux.Identification_Alarm&0b00010000)){

                       // Obtención de la long de la PCB emisora
                       aux1.Longitude = Information_PCBs_XBee[i].Longitude.number;

                       // Obtención de la lat de la PCB emisora
                       aux1.Latitude = Information_PCBs_XBee[i].Latitude.number;

                       // Obtención de la Alt de la PCB emisora
                       aux1.Altitude = Information_PCBs_XBee[i].Altitude;

                       // Obtención de la posición de la PCB receptora
                       aux2 =  Read_GPS();

                       // Obtención de la distancia
                       Aux.distance.number = Distance(aux1,aux2);
```

```
                        // Obtención de la dirección
                        Aux.direction.number = Direction(aux1,aux2);

                        if(Aux.direction.number>180){
                                Aux.direction_R_L = 'R';
                                Aux.direction.number = 360-Aux.direction.number;
                        } else {
                                Aux.direction_R_L = 'L';
                        }

                        // Obtención del desnivel
                        Aux.Difference_Altitude = Diference(aux1,aux2);

                        if(Aux.Difference_Altitude<0){
                                Aux.direction_up_down = 'D';
                                Aux.Difference_Altitude = -Aux.Difference_Altitude;
                        } else {
                                Aux.direction_up_down = 'U';
                        }
                } else {
                        // Obtención de la long de la PCB emisora
                        aux1.Longitude = 0.0;

                        // Obtención de la lat de la PCB emisora
                        aux1.Latitude = 0.0;

                        // Obtención de la Alt de la PCB emisora
                        aux1.Altitude = 0;

                        // Obtención de la distancia
                        Aux.distance.number = 0.0;

                        // Obtención de la dirección
                        Aux.direction.number = 0.0;
                        Aux.direction_up_down = 0;

                        // Obtención del desnivel
                        Aux.Difference_Altitude = 0;
                        Aux.direction_up_down = 0;
                }

                // Almacenamos
                Information_PCBs_Bluetooth[i] = Aux;

        }
}

Informacion_Bluetooth_Alarma Get_Information_PCBx (char PCBx){
        return Information_PCBs_Bluetooth[PCBx];
}

void init_buffer (void){ // 50.2 m y 70.59º
        Information_XBee Aux;

        Aux.Identification_Error_Alarm = 0b00010010;
        Aux.Longitude.number = -0.89203;
        Aux.Latitude.number = 41.67456;
        Aux.Altitude = 218;

        Information_PCBs_XBee[0]=Aux;
}
```

```
void init_buffer2 (void){
	Information_XBee Aux;

	Aux.Identification_Error_Alarm = 0b00010011;
	Aux.Longitude.number = -0.89134;
	Aux.Latitude.number = 41.674;
	Aux.Altitude = 219;

	Information_PCBs_XBee[1]=Aux;

}
```

Anexo: Fichero BUFFER.h

Código implementado en el fichero BUFFER.h:

```
#ifndef BUFFER_H_
#define BUFFER_H_

#include "XBEE.h"
#include "BLUETOOTH.h"
#include "GPS.h"

/*******************************************************************************/
/*                          Exported functions                                 */
/*******************************************************************************/

void Save_Information (char *inf);
void Generate_information (void);
Informacion_Bluetooth_Alarma Get_Information_PCBx (char PCBx);

float haversine (float x);
float Distance (position P1, position P2);
float normpi (float tita);
float Direction (position P1,position P2);
void init_buffer (void);
void init_buffer2 (void);

#endif /* BUFFER_H_ */
```

Anexo: Fichero PRINCIPAL.c

Código implementado en el fichero PRINCIPAL.c:

```
/*****************************************************************************/
/*                          Used modules                                     */
/*****************************************************************************/

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

#include "XBEE.h"
#include "SCI.h"
#include "SPI.h"
#include "BLUETOOTH.h"
#include "I2C.h"
#include "GPS.h"
#include "CLOCK.h"
#include "ALARMA.h"
#include "BUFFER.h"
#include "BRUJULA.h"


/*****************************************************************************/
/*                          Global variables                                 */
/*****************************************************************************/

char identificationModule = 1;
unsigned long Siguiente=0;
int cont_marcos = 0;
int cont=0;
int cont_Bluetooth = 0;
int reset=0;
unsigned int marco = 1, num_marcos = 25;
unsigned char m = 25; /* interrupción 2.4 ms con 10us de tcomputo */

/*****************************************************************************/
/*                          Function Prototypes                              */
/*****************************************************************************/

void InitSystem(void);

void Send_XBee (void); // Tarea trasmisión al módulo XBee

void Send_Receive_Bluetooth (void); // Tarea trasmisión/recepción con el módulo
Bluetooth

void Calculation_Alarm (void); // Activación de las alarmas de detección de
accidente

void Calculation_Orientation (void); // Obtención de la orientación


/*****************************************************************************/
/*                          Main                                             */
/*****************************************************************************/
```

```
int main(void)
{
	Init_GPS ()  ;		// Inicialización del módulo GPS (SCIb)
	Init_XBee () ;		// Inicialización del módulo XBee (SCIa)
	Init_Bluetooth();	// Inicialización del módulo Bluetooth (SPI)
	I2C_Init();			// Inicialización de la comunicación I2C y de
los correspondientes sensores
	Init_clock();		// Inicialización del reloj

	Siguiente = Get_tick_counter(); // Toma del instante de tiempo inicial

	InitSystem();		// Habilitación de las interrupciones

	while(1) {
		/* Ejecutivo cíclico */
		Siguiente = Siguiente + 500;

		switch (marco){
			case 1:
				Calculation_Alarm();
				Calculate_orientation();
				Send_XBee();
				marco = 2;
				break;
			case 2:
				Calculation_Alarm();
				Calculate_orientation();
				Send_Receive_Bluetooth();
				marco = 3;
				break;
			case 3:
				Calculation_Alarm();
				Calculate_orientation();
				if(cont_marcos==12) marco=2;
				if(cont_marcos==24) marco=1;
				break;
		}

		cont_marcos++;
		if(cont_marcos > 24) cont_marcos = 0;

		delay_Until(Siguiente);
	}
	return 0;
}


/*****************************************************************************/
/*                        Functions                                          */
/*****************************************************************************/

// Inicialización del sistema
void InitSystem(void)
{
	sei(); // Habilitamos las interrupciones del video.
	return ;
}
```

```
// Tarea trasmisión al módulo XBee
void Send_XBee (void){

	position pos;
	Information_XBee inf;

	pos=Read_GPS(); //  FUNCIONA
	inf=Generate_information_XBee(identificationModule/*identificador*/,
Get_error()/* Error GPS*/ ,Get_Alarma_Critica(), Get_Alarma_Leve(),
Get_Alarma_Golpe(), Get_Alarm_MeasureA(), pos/*posicion PCB*/);

	// Trasmisión de información en float e int
	Send_information(inf);

	// Trasmisión de información en nomenclatura ASCII
	//Send_information_ASCII(inf);


}

// Tarea recepción/trasmión a través del módulo Bluetooth
void Send_Receive_Bluetooth (void){

	position pos;
	float orientacion;
	Information_Bluetooth inf;

	if((Get_Mode() == DESACTIVATE) && (Get_Mode() == RESET)){
		cont = 0;
	} else if(Get_Mode() == ACTIVATE1){
		cont = 3;
	} else if(Get_Mode() == ACTIVATE5){
		cont = 19;
	} else if(Get_Mode() == ACTIVATE10){
		cont = 39;
	}

	Generate_information();

	if(Get_Mode() != DESACTIVATE && cont_Bluetooth > cont){

		pos=Read_GPS();
		orientacion = Get_Orientation();

	inf=Generate_information_Bluetooth(identificationModule/*identificador*/,
Get_error()/* Error GPS*/,Get_Alarma_Critica(), Get_Alarma_Leve(),
Get_Alarma_Golpe(), Get_Alarm_MeasureA(), Get_Error_MeasureG(),
Get_Error_MeasureM(), Get_Error_MeasureB(), pos/*posicion PCB*/, orientacion);

		// Trasmisión de la información en formato float e int
		Send_information_Bluetooth(inf);

		// Trasmisión de la información en nomenclatura ASCII
		//Send_information_Bluetooth_ASCII(inf);

		cont_Bluetooth = 0;
	} else {
		Receive_frame(0x16, 2); // Recepción de la información
	}
	cont_Bluetooth ++;
}
```

```
// Tarea activación de detección de accidente
void Calculation_Alarm (void){ // Alarma de caida
	if((Get_Mode()==RESET) && (reset == 0)){
		reset = 1;
		Reset_Alarma_Critica();
		Reset_Alarma_Golpe();
	} else {
		reset = 0;
	}
	Alarm();
}

// Tarea obtención de la orientación
void Calculation_Orientation (void){
	Calculate_orientation();
}
```