



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Universitat Politècnica de València

Desarrollo de un sistema domótico inteligente con posicionamiento interior utilizando Bluetooth Low Energy

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA DE COMPUTADORES

Autor: D.JOSÉ MIGUEL ESTEVE ESTEVE

Directores: D.CARLOS TAVARES CALAFATE
D.PIETRO MANZONI

26 de julio de 2015

Índice general

1. Introducción	3
1.1. Resumen	3
1.2. Contexto	3
1.3. Objetivos	4
1.4. Trabajo realizado	4
1.5. Estructura de la memoria	4
2. Especificación de requisitos	6
2.1. Introducción	6
2.1.1. Propósito	6
2.1.2. Alcance	6
2.1.3. Visión global	7
2.2. Descripción general	7
2.2.1. Perspectiva del sistema domótico	7
2.2.2. Funciones del sistema domótico	10
2.2.3. Roles de los usuarios	12
2.2.4. Tipos de usuario	12
2.2.5. Restricciones	12
2.2.6. Supuestos y dependencias	13
2.2.7. Requisitos futuros	14
2.3. Requisitos Específicos	14
2.3.1. Requisitos de las interfaces externas	14
2.3.2. Requisitos funcionales	18
2.3.3. Requisitos de rendimiento	21
2.3.4. Restricciones del diseño	22
2.3.5. Atributos del firmware de los dispositivos	22
2.3.6. Otros requisitos	23
3. Análisis	24
3.1. Análisis del sistema de comunicación BLE	24
3.2. Análisis del sistema de posicionamiento interior	28
3.3. Análisis del consumo por dispositivo	30
4. Diseño	35
4.1. Diseño del sistema de comunicación BLE	35
4.2. Diseño del sistema de posicionamiento interior	40

4.3. Optimización del consumo por dispositivo	42
5. Implementación	46
5.1. Introducción	46
5.2. Tecnologías	46
5.2.1. BLE-STACK 1.4.0	46
5.2.2. Accelerometer KXCJ9	48
5.2.3. Temperature and Humidity sensor HDC1000	50
5.2.4. Hall Effect-Based linear Current Sensor ACS712	51
5.3. Entorno de desarrollo	52
5.3.1. IAR Embedded Workbench IDE	52
5.3.2. Control de versiones	53
5.4. Herramientas	54
5.4.1. HCI	54
5.4.2. GATT	54
5.4.3. Osciloscopio	54
5.4.4. Multimeter	54
5.5. Descripción de la implementación	54
6. Evaluación	56
6.1. Validación del sistema de comunicación BLE	56
6.1.1. Prueba de distancia máxima	56
6.1.2. Prueba de saturación canales	57
6.1.3. Test de velocidad	57
6.2. Validación del sistema de posicionamiento interior	58
6.3. Validación del consumo por dispositivo	61
6.3.1. Consumo real Hub parte BLE	61
6.3.2. Consumo real sensor temperatura y humedad	63
6.3.3. Consumo real sensor acelerómetro	65
6.3.4. Consumo real sensor reed	66
6.3.5. Consumo real actuadores luz, enchufe y repetidor	67
6.3.6. Consumo real cerradura electrónica	68
7. Conclusiones	70
7.1. Resumen	70
7.2. Valoración	70
7.3. Trabajo futuro	71
A. Definiciones, siglas y abreviaciones	72

Capítulo 1

Introducción

1.1. Resumen

El objetivo de este proyecto es la creación de un sistema domótico inteligente con posicionamiento interior.

Para cumplir con esta meta se ha realizado una especificación de requisitos, a partir de ésta, un análisis y diseño de un sistema domótico que será controlado mediante una aplicación móvil. A continuación se ha llevado a cabo una primera implementación, la cual se ha evaluado mediante una serie de pruebas específicas. En cada una de estas etapas cuando se detecta un error o una posible mejora se revisa la etapa correspondiente, volviendo a repetir el proceso hasta llegar al sistema deseado.

1.2. Contexto

El ámbito de este sistema se centra en la domótica aplicada a una casa o un negocio y el posicionamiento interior.

Se hace un estudio de las distintas tecnologías capaces de poder posicionar a una persona en una sala en concreto y la comunicación entre los distintos dispositivos que conforman el sistema.

El sistema pretende cubrir todo el conjunto de automatismos, sistemas de seguridad y gestión energética que necesita una casa.

El propósito concreto del sistema es que mediante una interfaz sencilla, pero segura, se pueda controlar una casa, se reciban avisos de seguridad y se gestione el consumo eléctrico de luces y dispositivos. Mediante el posicionamiento interior de personas el sistema es capaz de ahorrar energía, activar la seguridad por zonas, encender luces o abrir una puerta.

1.3. Objetivos

La finalidad principal de este sistema domótico es facilitar a las personas el control de su casa o negocio de una manera fácil, cómoda, rápida, segura y eficaz. Para ello habrá que crear una interfaz de usuario fácil de usar e intuitiva, la comunicación entre los dispositivos del sistema deberá ser rápida y segura, se tendrá que realizar un estudio de consumo de cada dispositivo con batería para maximizar su autonomía, y el posicionamiento interior deberá ser muy fiable.

1.4. Trabajo realizado

Este proyecto tiene cuatro partes: Circuitos electrónicos de los dispositivos domóticos, Firmware de los dispositivos domóticos, Servidores web, y Aplicaciones Móviles.

Como el proyecto consta de cuatro partes se ha planificado el trabajo a realizar para avanzar de manera conjunta y se han utilizado herramientas de control de versiones.

El trabajo de esta memoria se centra en la parte Firmware de los dispositivos. En esta parte se estudia la comunicación empleada entre los distintos dispositivos, los consumos de cada dispositivo, y el posicionamiento interior. Para el posicionamiento interior se verán algunos aspectos relacionados con la parte de aplicaciones móviles.

1.5. Estructura de la memoria

La memoria contiene siete capítulos.

El primero de ellos es la introducción, en la que se describe el documento de la memoria, el contexto y objetivos de este sistema domótico, el trabajo realizado en este proyecto y la estructura de la memoria.

El segundo capítulo consiste en la especificación de requisitos siguiendo el estándar IEEE Std.830-1998.[3] Este estándar consiste en la definición de las características que debe cumplir el sistema domótico para satisfacer las condiciones y objetivos propuestos de la forma más eficiente posible.

El tercer capítulo trata sobre el análisis del sistema. Se analiza el sistema de comunicación BLE, el sistema de posicionamiento interior y el consumo de cada dispositivo.

El cuarto capítulo tiene tres partes el diseño del sistema de comunicación BLE, el diseño del posicionamiento interior y la estrategia para optimizar el consumo de cada dispositivo.

El quinto capítulo explica detalles concretos de la implementación, las tecnologías utilizadas, las herramientas y el entorno de desarrollo.

El sexto capítulo especifica la evaluación realizada al sistema. Se han utilizado distintos tipos de pruebas que miden el correcto funcionamiento, el rendimiento y la calidad del Firmware de los distintos dispositivos. Estudio de los consumos obtenidos por cada dispositivo con batería. Estudio de la precisión del posicionamiento interior.

En el séptimo capítulo se exponen las conclusiones obtenidas en la realización del proyecto, una valoración de las mismas y trabajos futuros.

Capítulo 2

Especificación de requisitos

2.1. Introducción

2.1.1. Propósito

La especificación de requisitos tiene como propósito establecer el conjunto de características y funcionalidades del sistema. Estas funcionalidades deben satisfacer las necesidades de los usuarios del sistema. Esta especificación de requisitos cumple con el estándar IEEE Std.830-1998. [3]

Este documento sirve para formalizar las funcionalidades de los dispositivos que componen el sistema domótico^[8].

2.1.2. Alcance

Este proyecto nace bajo la idea de poder posicionar a personas en interiores, técnica Indoor Positioning System. A partir de esta técnica, se estudia su integración con el diseño de un sistema domótico^[8] inteligente que actúe en función de la sala donde estén las personas que utilicen el sistema.

El firmware^[10] desarrollado debe ser capaz de localizar a las personas en interiores de una manera fiable, con una comunicación rápida y segura. Los dispositivos móviles^[19] se comunicarán directamente con los dispositivos sin necesidad de utilizar una pasarela intermedia.

La utilización de nodos para la localización interior requiere que se comuniquen inalámbricamente y utilicen batería como fuente de alimentación.

Un aspecto clave será maximizar la autonomía de los dispositivos a batería. Se analizará el consumo por dispositivo domótico^[8].

Otro aspecto a tener muy en cuenta será la cobertura de las señales inalámbricas. Habrá que utilizar una tecnología capaz de alcanzar a la mayor parte de una vivienda. Para las zonas sin cobertura de señal habrá que diseñar otras estrategias para no perder funcionalidad con los distintos dispositivos domóticos.

2.1.3. Visión global

Esta especificación de requisitos se organiza en dos secciones, descripción general y requisitos específicos.

En la descripción general se detalla la perspectiva y funciones del sistema, las características generales de los usuarios, las restricciones globales del sistema y los factores que pueden afectar a los requisitos.

En la sección de requisitos específicos se describe los requerimientos, con nivel de detalle suficiente, para permitir a los diseñadores crear un sistema que cumpla estos requisitos, que permita al equipo de pruebas planificar y realizar las pruebas que demuestren si el sistema satisface, o no, los requisitos. [12, p. 6] Para ello se detallan las interfaces externas del sistema, los requisitos funcionales, los requisitos relacionados con la carga que tendrá que soportar el sistema, todo aquello que restrinja las decisiones relativas al diseño de la aplicación, los atributos de calidad del sistema o cualquier otro requisito relacionado con el sistema.

2.2. Descripción general

2.2.1. Perspectiva del sistema domótico

Estudio de mercado de los sistemas de posicionamiento interior

Esta subsección realiza una comparativa entre los distintos sistemas IPS.

Wi-Fi Positioning System(WPS) se basa en medir el RSSI[22] de las señales recibidas. Los parámetros más importantes que se reciben al analizar los paquetes de datos son el SSID[24] y address[17]. Consumen bastante energía, necesitan conectarse a la red eléctrica.

Near field communication(NFC) sistema de comunicación por proximidad. No nos es válido este sistema debido a que no sería posible establecer comunicación con los distintos dispositivos a menos que estés a una distancia máxima de 10 cm.

BLE[5] se basa en medir el RSSI[22] de las señales recibidas. Los parámetros más importantes que se reciben al analizar los paquetes de datos son address[17], advertising[1] y scan-response[3]. Consume muy poca energía, se puede utilizar con batería.

El resto de IPS no pueden comunicarse con los dispositivos móviles[19] de manera directa. No son aplicables a nuestro sistema.

Estudio de mercado sistemas domóticos

Esta subsección realiza una comparativa entre los distintos sistemas más representativos del sector domótico[8].

KNX es un estándar comunicaciones de red de código abierto que está gestionado por la asociación KNX. Es un sistema muy fiable pero que es complejo de instalar y no está concebido para conexiones inalámbricas, aunque también lo soporta. No dispone de IPS.

SimonVox es el estándar propio de la empresa Simon. Es un sistema inspirado en KNX pero bajo licencia. La instalación de este sistema es más económico que KNX. No dispone de IPS.

SmartThings es un sistema domótico[8] portable totalmente inalámbrico. Utiliza un Hub[12] que sirve de enlace entre los dispositivos domóticos[8] y los dispositivos móviles[19]. No dispone de IPS.

HomeKit es la plataforma de desarrollo de Apple para su propio sistema domótico. No dispone de IPS. Sólo se puede utilizar con productos Apple.

Nuestro sistema domótico

El sistema domótico[8] a desarrollar debe ser compatible con los dispositivos móviles[19] Android[2] e IOS[15]. Tiene que disponer de IPS que tanto Android como IOS sean capaces de reconocer.

Los dispositivos que se desarrollen deben de ser de bajo consumo, su fuente de alimentación será mediante baterías o red eléctrica.

Los dispositivos que conforman el sistema se comunicará inalámbricamente utilizando WI-FI o BLE[5]. Habrá un Hub[12] que servirá de enlace entre los dispositivos domóticos y los dispositivos móviles[19].

Los dispositivos móviles serán capaces de comunicarse directamente o a través del Hub con los dispositivos domóticos.

Tipos de dispositivos

La arquitectura empleada para este sistema domótico es mixta. Es centralizada, porque un controlador recibe información de los sensores y envía ordenes a los actuadores. Y es distribuida, porque todos los módulos permiten la comunicación directamente desde los dispositivos móviles.

El sistema domótico[8] está compuesto por los siguientes tipos de dispositivo que se resumen en la siguiente tabla.

Tipo	Descripción
Hub	Se comunicará con el resto de dispositivos mediante BLE[5]. Se comunicará con el servidor a través de Internet mediante el Router de la vivienda. El Hub se conectará al Router mediante WI-FI. El Hub tendrá 3 versiones, la más sencilla sólo se encargará de las comunicaciones. Otra versión se encargará de la transmisión del Live-Streaming[25] tanto audio como video, y tendrá la funcionalidad de la versión anterior. Una tercera versión que se utilizará como videoportero, se le añadirá un teclado táctil, y tendrá la funcionalidad de la versión anterior. Este proyecto se centra en el firmware[10] de comunicaciones BLE.
Sensores	Se trata de tres dispositivos. Uno para medir la temperatura y humedad. Otro para controlar los accesos, es decir si una puerta está abierta o cerrada. Y un último para detectar la rotura de un cristal o la apertura de un cajón, entre otras funcionalidades. Estos dispositivos utilizarán una batería como alimentación. Este proyecto se centra en el firmware[10] de comunicaciones BLE, estudio de optimización de los consumos de energía y en la funcionalidad de cada uno de los sensores.
Actuadores	Son tres dispositivos a desarrollar. El primero servirá para controlar el apagado y encendido de un punto de luz, deberá de convivir con un sistema conmutado tradicional. El segundo se utilizará para controlar el encendido o apagado de un enchufe. El tercero controlará dos enchufes, una persiana, una cortina o una puerta de garaje. Este grupo también controlará el consumo de energía. Irán conectados directamente a la red eléctrica. Este proyecto se centra en el firmware[10] de comunicaciones BLE, y además en la funcionalidad de cada uno de los actuadores.

Cerradura electrónica	Es el dispositivo encargado de abrir o cerrar una puerta. Se comunicará directamente con el Hub o un dispositivo móvil. Se conectará directamente a la red eléctrica o utilizará una batería. Este proyecto se centra en el firmware[10] de comunicaciones BLE, estudio de optimización de los consumos de energía y en funcionalidad.
Localización	Estos dispositivos sirven para posicionar a una persona en una determinada sala. Se determinará si se crea un dispositivo especial o si esta funcionalidad se añadirá a alguno de los dispositivos anteriores. Este proyecto se centra en el firmware[10] de comunicaciones BLE, y además en la creación de un IPS.
Repetidores	Estos dispositivos sirven para dar cobertura de señal a aquellos dispositivos a los que el Hub no puede llegar con su señal o la señal de estos no llega al Hub. Se determinará si se crea un dispositivo especial o si esta funcionalidad se añadirá a alguno de los dispositivos anteriores. Este proyecto se centra en el firmware[10] de comunicaciones BLE.
Combinados	Son aquellos dispositivos que resultan de la combinación de varios dispositivos de los anteriores. Por ejemplo, el termostato está compuesto por un sensor de temperatura y un actuador de enchufes doble. Este proyecto no trata ninguno de estos casos. Esta funcionalidad se realiza a través del servidor, no necesita realizar ningún cambio a nivel de firmware de los dispositivos.

2.2.2. Funciones del sistema domótico

Con el objetivo de automatizar toda la funcionalidad de una casa o negocio, se diseñan una serie de dispositivos que cubren los servicios de programación, ahorro energético, el confort, la seguridad y las comunicaciones.

A continuación se muestra un resumen de las principales funcionalidades del sistema domótico.

Funcionalidad	Descripción
Temperatura	Lectura de la temperatura en grados centígrados. El servidor se encarga de convertirlos a grados Fahrenheit en su caso.
Humedad	Lectura de la humedad relativa en porcentaje.
Acelerómetro	Medición de la fuerza ejercida en cualquier eje. Se utilizará en el sensor de rotura de cristales o en la cerradura electrónica para saber si se ha abierto manualmente la puerta.

Reed	Controlar si un determinado cajón, puerta, ventana, armario, etc. está abierto o cerrado. Se utilizará un Reed que es un interruptor de imán.
Gestión luces	Controlar mediante un relé el apagado o encendido de un determinado punto de luz. Es necesario que el diseño electrónico y de firmware contemplen la posibilidad de que el sistema automático conviva con el sistema conmutado tradicional.
Gestión enchufes	Controlar mediante un relé el apagado o encendido de un determinado punto de corriente.
Gestión puertas	Controlar mediante una cerradura electrónica la apertura y cierre de una puerta. Diseñar la distinta maniobras dependiendo del tipo de cerradura europea o americana.
Gestión termostato	Actuar sobre una caldera o aire acondicionado en función del sensor de temperatura y del posicionamiento de los usuarios en las salas de la vivienda.
Gestión electroválvula	Actuar sobre una electroválvula para encender y apagar el riego de un jardín.
Temporizador	Poder temporizar cada acción de los dispositivos para transcurrido un tiempo, se apaguen.
Consumo	Controlar el consumo de cada uno de los actuadores.
Autonomía baterías	Poder consultar la autonomía de las baterías de los dispositivos que las utilicen.
Seguridad Comunicaciones BLE	Se desarrollará un sistema de seguridad encriptando cada mensaje y realizando una distribución de claves segura. Por motivos de seguridad en este proyecto no se tratará este tema. El nivel de seguridad que permiten los chips actuales BLE es AES de 128 bits. Prevención frente ataques del tipo Man-in-the-middle[18].
Cobertura Comunicaciones BLE	Se realizará un estudio de tipos de antena y amplificadores de señal para llevar a la máxima distancia el intercambio de paquetes BLE.
Posicionamiento interior	Todo el sistema actuará dependiendo de si el usuario está en la vivienda y en una determinada sala. También se contemplará el número de usuario por sala. Si el usuario está en una sala en concreto, cuando abra la aplicación móvil le aparecerán los dispositivos de esa sala. Otro ejemplo cuando el usuario se acerque a la puerta de la calle se abrirá automáticamente sin tener que sacar el dispositivo móvil del bolsillo. La temperatura se ajustará dependiendo del número de usuarios por sala.
Permisos	Los permisos que tendrá cada usuario por dispositivo podrá ser revocado o caducar. Se permitirá invitar a una persona por un tiempo limitado.

Sistema inteligente	El sistema gestionará las luces, persianas, temperatura y apertura de puertas en función del posicionamiento interior y de algoritmos predictivos. Los algoritmos predictivos quedan fuera del alcance de esta memoria.
---------------------	---

2.2.3. Roles de los usuarios

Para simplificar la estructura jerárquica de los usuarios del sistema de comunicaciones se crean tres roles que agrupan una colección de permisos cada uno.

Los roles de usuario se detallan en la siguiente tabla.

Perfiles	Descripción
Usuario	Tiene permiso para leer información de los dispositivos y actuar sobre ellos, como encender o apagar una luz.
Usuario Administrador	Tiene los permisos del usuario y puede dar permisos a otro usuario.
Adminstrador	Tiene los permisos del usuario administrador y puede configurar los dispositivos aspectos relativos a la seguridad

2.2.4. Tipos de usuario

Para la comunicación entre los distintos dispositivos es necesario utilizar tres tipos diferenciados de usuario.

Los tipos de usuario se detallan en la siguiente tabla.

Tipos	Características
Usuario Servidor	Es el usuario que se comunica mediante el Hub[12] con los dispositivos domóticos. Tiene privilegios de administrador.
Usuario Dispositivo Domótico	Es el propio dispositivo domótico que se comunica mediante el Hub con el servidor. Tiene privilegios de usuario.
Usuario Dispositivo Móvil	Este usuario también se comunica con los dispositivos a través del servidor, según se explica en las características del usuario servidor. Puede tener privilegios de usuario o de usuario administrador.

2.2.5. Restricciones

A continuación se detallan las restricciones más relevantes en el ámbito de este trabajo:

- Las limitaciones de hardware son las relativas a que los dispositivos móviles soporten BLE[5] y tengan conexión a internet.
- La funcionalidad de cada dispositivo tiene que estar disponible en todo momento para cualquier usuario.
- El sistema tiene que ser escalable, pudiendo haber un número indeterminado de dispositivos por localización. Habrá que limitar el número de dispositivos.
- El lenguaje del firmware[10] para los distintos dispositivos tiene que ser programación en C y el entorno de desarrollo para programar los SOC[23] de BLE de Texas Instrument tiene que ser de IAR System.
- La comunicación entre los distintos dispositivos tiene que rápida, segura y fiable.
- Existe un límite de distancia entre la comunicación de dos dispositivos.
- Existe un límite de saltos entre la comunicación de dos dispositivos utilizando repetidores.
- Los dispositivos de control de acceso y de rotura de cristales necesitan un Hub para su uso. El resto de dispositivos se pueden usar directamente desde el dispositivo móvil, renunciando a acceder por internet.
- La aplicación debe cumplir la normativa española vigente en cuanto a la protección de datos de carácter personal.[1, 2]

2.2.6. Supuestos y dependencias

A continuación se detallan los supuestos y dependencias más relevantes en el ámbito de este trabajo:

- Los dispositivos deben de cumplir con el marcado CE [6] y estándar UL. [14]
- Para la comunicación BLE[5] se utilizará el SOC[23] de Texas Instrument CC2541 (figura 2.1), en el momento se deje de fabricar habrá que utilizar un chip sustitutivo y migrar el firmware[10].



Figura 2.1: system-on-chip CC2541

- Los dispositivos móviles deben de seguir soportando en futuras versiones de sus sistemas operativos la comunicación mediante BLE.
- Cualquier cambio en alguno de los chips deberá ser estudiado y posteriormente adaptado y verificado.

2.2.7. Requisitos futuros

Esta subsección esboza futuras mejoras al sistema, que podrán analizarse e implementarse en un futuro. A continuación se detallan los requisitos futuros más relevantes en el ámbito de este trabajo:

- Crear un dispositivo Hub básico pero sin compartir la arquitectura de los Hubs desarrollados. Sería un Hub que solo tendría un chip BLE y un chip WI-FI. Su coste y tamaño serían significativamente menores.
- Crear un dispositivo de tipo brazalete que serviría para posicionar a los usuarios del mismo modo que los hacen los dispositivos móviles.
- Desarrollar un sensor de humo.
- Desarrollar un sensor de inundaciones.
- Experimentar con el nuevo SOC[23] BLE de Texas instrument cc2640

2.3. Requisitos Específicos

Esta subsección especifica todos los requisitos necesarios para el desarrollo del sistema. Todos los requisitos aquí descritos reflejan alguna necesidad real del sistema, son modificables y se puede realizar su trazabilidad.

2.3.1. Requisitos de las interfaces externas

Requisitos de usuario

Los usuarios se comunicarán mediante un API[4] específica del sistema de comunicación BLE[5]. Este API debe de estar bien documentada para facilitar al usuario su uso, ser compatible con las restricciones de tamaño de los mensajes BLE, permitir la integración con otras plataformas domóticas, o dispositivos de otros fabricantes, ser muy sencilla y coherente consigo misma.

Requisitos de hardware

A continuación se detallan los requisitos de hardware más relevantes en el ámbito de este trabajo:

- Los dispositivos deben de cumplir con el marcado CE [6] y estándar UL. [14].

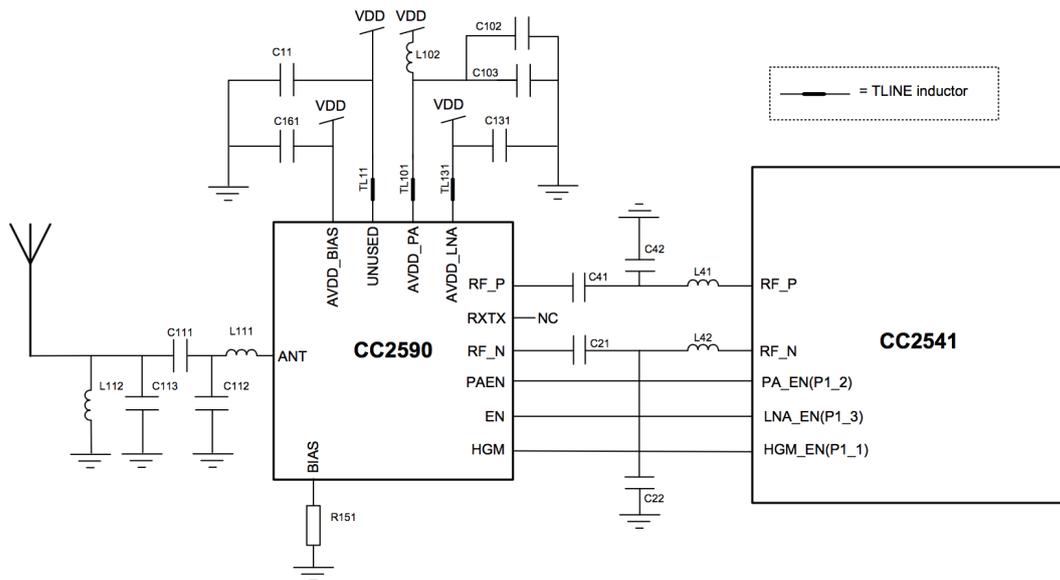


Figura 2.3: Application Circuit for the CC2541 with CC2590

- El sensor de temperatura y humedad que utilizaremos es el chip de Texas Instrument HDC-1000. La figura 2.4 muestra el sensor conectado al BLE.

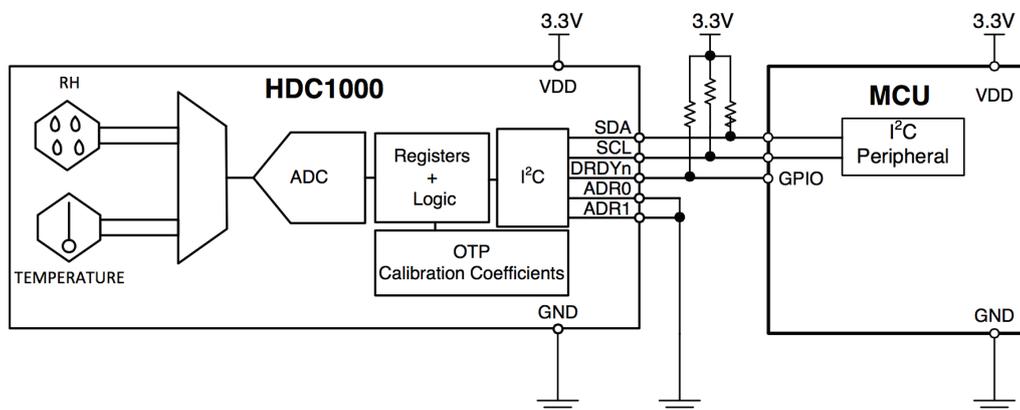


Figura 2.4: HDC-1000 Typical Application

- El acelerómetro que utilizaremos es el chip de Kionix KXCJ9. La figura 2.5 muestra el esquema de conexión del sensor.

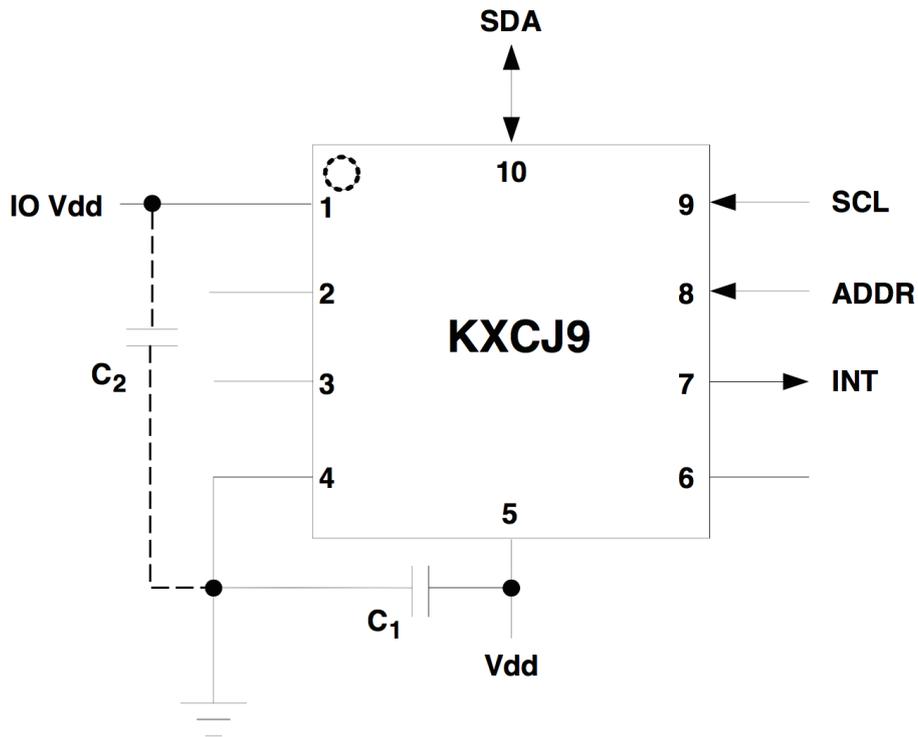
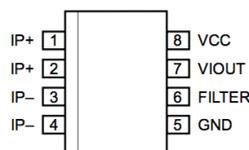


Figura 2.5: KIONIX KXCJ9 Application Schematic

- Se utilizará el sensor de intensidad de Allegro ACS712 para medir el consumo de los actuadores, hasta 20 A. La figura 2.6 muestra el diagrama pin-out .

Pin-out Diagram



Terminal List Table

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sensed; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sensed; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VIOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal

Figura 2.6: ACS712 Pinout Diagram

Los demás requisitos de hardware no forman parte del estudio realizado en esta memoria.

Requisitos de software

Se utilizará el entorno de desarrollo de IAR Systems, IAR Embedded Workbench. Este workbench usa el BLE stack 1.4 de Texas Instrument que permite compilar el Firmware de cada dispositivo BLE[5].

La configuración del resto de microprocesadores se realiza mediante la lectura y escritura de los registros indicados en el Datasheet de cada uno, no se requiere ningún software especial.

Requisitos de comunicación

Para el sistema de comunicación entre los dispositivos se utilizará BLE[5] y deberá cumplir con el estándar establecido.

2.3.2. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales de este proyecto se organizan siguiendo la tipología de usuario. Estos requisitos describen las distintas funcionalidades que cada uno de los usuarios del sistema puede realizar.

Acción	Gestión cerradura
Introducción	Orden de abrir o cerrar una cerradura.
Entradas	Identificador del dispositivo, y acción de abrir o cerrar.
Proceso	Se recibe paquete de datos encriptado que contiene la orden a realizar.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene la confirmación de la orden ejecutada.
Permisos	Usuario Servidor y Usuario Móvil.

Acción	Gestión alumbrado
Introducción	Orden de encender o apagar un punto de luz.
Entradas	Identificador del dispositivo, y acción de encender o apagar.
Proceso	Se recibe paquete de datos encriptado que contiene la orden a realizar.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene la confirmación de la orden ejecutada.
Permisos	Usuario Servidor y Usuario Móvil.

Acción	Gestión enchufes
Introducción	Orden de encender o apagar uno o dos enchufes.
Entradas	Identificador del dispositivo, y acción de encender o apagar uno o dos enchufes.
Proceso	Se recibe paquete de datos encriptado que contiene la orden a realizar.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene la confirmación de la orden ejecutada.
Permisos	Usuario Servidor y Usuario Móvil.

Acción	Gestión motor
Introducción	Orden de accionar motor en dos direcciones.
Entradas	Identificador del dispositivo, y acción de accionar motor en la dirección deseada o apagar.
Proceso	Se recibe paquete de datos encriptado que contiene la orden a realizar.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene la confirmación de la orden ejecutada.
Permisos	Usuario Servidor y Usuario Móvil.

Acción	Gestión leer Temperatura y Humedad
Introducción	Orden de leer la temperatura y humedad.
Entradas	Identificador del dispositivo y acción leer temperatura y humedad.
Proceso	Se recibe paquete de datos encriptado que contiene la orden a realizar.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene la lectura de la temperatura y de la humedad.
Permisos	Usuario Móvil.

Acción	Aviso Control de acceso
Introducción	Aviso de estado control de acceso.
Proceso	Al detectarse un cambio de estado se envía un aviso.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene identificador del dispositivo e información sobre estado abierto o cerrado.
Permisos	Usuario Dispositivo.

Acción	Aviso acelerómetro
Introducción	Aviso de alarma acelerómetro.
Proceso	Al detectarse una aceleración en cualquier eje se envía un aviso.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene identificador del dispositivo e información sobre la fuerza ejercida en cada eje.
Permisos	Usuario Dispositivo.

Acción	Aviso Temperatura y Humedad
Introducción	Aviso de un cambio en la temperatura o en la humedad respecto a la última lectura.
Proceso	Al detectarse un cambio en la temperatura o la humedad se envía un aviso.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene identificador del dispositivo e información sobre la temperatura y humedad.
Permisos	Usuario Dispositivo y Usuario Móvil

Acción	Aviso Nivel Batería
Introducción	Aviso de un cambio en el nivel de la batería respecto a la última lectura.
Proceso	Al detectarse un cambio en el nivel de la batería se envía un aviso.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene identificador del dispositivo e información sobre el nivel de batería.
Permisos	Usuario Dispositivo y Usuario Móvil

Acción	Aviso Nivel Consumo
Introducción	Aviso de un cambio en el nivel de consumo en corriente alterna respecto a la última lectura.
Proceso	Al detectarse un cambio en el nivel en el consumo en corriente alterna se envía un aviso.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene identificador del dispositivo e información sobre el nivel de consumo en corriente alterna.
Permisos	Usuario Dispositivo y Usuario Móvil

Acción	Validación dispositivo
Introducción	Validación de un dispositivo nuevo que se desea añadir a una determinada localización.
Entradas	Datos de autenticación validados por el servidor del sistema domótico.
Proceso	Para poder asignar un nuevo dispositivo hay que pulsar un botón determinado de éste y seleccionar la opción de reconocimiento automático de dispositivos en el dispositivo móvil.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene identificador del dispositivo e información sobre la autenticación.
Permisos	Usuario Móvil

Acción	Crear Usuario Móvil en el dispositivo
Introducción	Crear Usuario Móvil en un determinado dispositivo.
Entradas	Datos de autenticación validados por el servidor del sistema domótico.
Proceso	Si al realizar una acción el usuario móvil no está creado, se inicia automáticamente este proceso.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene identificador del dispositivo e información sobre la autenticación.
Permisos	Usuario Móvil

Acción	Configurar los parámetros de la red WI-FI
Introducción	Configurar los parámetros de la red WI-FI.
Entradas	Datos de autenticación validados por el servidor del sistema domótico, SSID y Password.
Proceso	Para poder configurar estos parámetros hay que pulsar un botón determinado y seleccionar la opción de reconocimiento automático de dispositivos en el dispositivo móvil.
Salidas	Paquete de datos encriptado que contiene identificador del dispositivo y estatus del proceso.
Permisos	Usuario Móvil

2.3.3. Requisitos de rendimiento

A continuación se detallan los requisitos de rendimiento más relevantes en el ámbito de este trabajo:

- Para la comunicación mediante Pairing[20] se limitará a una conexión simultánea para cada dispositivo. El dispositivo Hub[12] admitirá realizar tres conexiones simultaneas.
- Para la comunicación mediante Advertisement[1] se limitará a la recepción de un mensaje válido simultáneo para todos los dispositivos, a excepción del Hub que podrá recibir 32 mensajes en un mismo periodo de escaneo.
- La distancia entre el Hub y cada dispositivo no deberá de superar el umbral que garantice una correcta comunicación.
- El IPS tendrá unas fronteras de indeterminación en las que no será podrá garantizar el correcto posicionamiento dentro de una localización determinada.
- Los dispositivos tendrán unas condiciones operativas recomendadas que vendrán determinadas por su respectivo Datasheet[7].
- Los dispositivos tendrán una tensión de alimentación y consumo que estará establecida en su respectivo Datasheet.

2.3.4. Restricciones del diseño

Se entiende por restricciones del diseño a todo aquello que restringe las decisiones relativas al diseño del sistema. A continuación se detallan las restricciones de diseño más relevantes en el ámbito de este trabajo:

- El sistema de comunicaciones cumplirá con el estándar BLE[5], para poder utilizarse en IOS[15] y Android[2].
- Los límites de cada dispositivo vendrá determinado por la especificación indicada en su respectivo Datasheet[7].

Los demás requisitos del diseño no forman parte del estudio realizado en esta memoria.

2.3.5. Atributos del firmware de los dispositivos

Seguridad

La seguridad debe garantizar que las comunicaciones entre los dispositivos del sistema domótico [8] son lo suficientemente seguras para que aunque se inyecte un paquete ya enviado este sea invalidado por el sistema. Si un paquete se logra descifrar fuera del sistema, tendría que emplearse tanto tiempo que la clave ya estaría obsoleta.

Fiabilidad

Para garantizar la fiabilidad todo mensaje de comunicación entre el Hub[12] y los demás dispositivos tendrá que tener una confirmación de recepción. No así en las comunicaciones entre los dispositivos y el Hub, por lo que se enviarán ráfagas con el mensaje repetido para asegurarse de que le llegan.

Periódicamente el sistema comprobará que todos los dispositivos están operativos mediante la recepción de mensajes de status.

Si el Hub detecta alguna situación de saturación de mensajes, dará un aviso al servidor para añadir un segundo Hub al sistema domótico de esa localización.

La fiabilidad de todos los sensores se garantizará mediante comprobaciones estadísticas de las muestras que se consideren necesarias. A estas muestras se les realizarán los tests pertinentes que evalúen su correcto funcionamiento.

Disponibilidad

Cada dispositivo tendrá que estar siempre disponible a excepción de cuando no haya corriente eléctrica en el caso de los actuadores. El resto de dispositivos al llevar batería siempre estarán operativos.

En caso de que no haya internet entre el Hub y el servidor, el servidor avisará a los dispositivos móviles para que el usuario final actúe en consecuencia. Esta función no forma parte del estudio realizado en esta memoria.

Mantenibilidad

Los dispositivos BLE no necesitan ningún tipo de mantenimiento. Por motivos de seguridad en caso de que un determinado dispositivo necesite alguna actualización, se realiza reinstalando el firmware en fábrica.

Portabilidad

El sistema BLE no es portable, se necesita utilizar el mismo chip de Texas Instrument CC2541 en todos y cada uno de los dispositivos. Cambiar el chip implica volver a desarrollar todo el firmware.

Eficiencia

Los tiempos de respuesta de los dispositivos tienen que ser muy rápidos para que las acciones sean instantáneas y sin renunciar a la seguridad. No tiene sentido crear colas que permitan que no se pierda alguna acción porque el dispositivo está ocupado. Cada dispositivo tiene establecido un timeout mientras está ejecutando una acción que no permite realizar una nueva. En caso de no confirmación de la acción el Hub avisa al servidor para que éste actúe en consecuencia.

En cuanto eficiencia energética todos los dispositivos mientras no estén trabajando estarán en reposo para minimizar el consumo de energía. Existen tres niveles de reposo que dependen del dispositivo y de las acciones que está realizando.

Se ha tenido especial atención en el desarrollo del firmware de los dispositivos, para que sólo se realicen las tareas redundantes que sean estrictamente necesarias, con el fin de minimizar errores y optimizar el trabajo del chip.

2.3.6. Otros requisitos

Para evitar que el Hub se sature en el futuro con otros mensajes BLE de dispositivos ajenos, el Hub sólo escuchará a los dispositivos que estén asignados a su misma localización. Para tal propósito se crea una whitelist[27] que filtra la recepción de los mensajes mediante address[17].

Capítulo 3

Análisis

Este capítulo corresponde a la fase de análisis del proyecto. Se analiza el sistema de comunicación BLE[5], el sistema de posicionamiento interior, el consumo y la funcionalidad de los dispositivos del sistema domótico.

3.1. Análisis del sistema de comunicación BLE

Los dispositivos del sistema domótico se comunican de manera inalámbrica utilizando una comunicación BLE. La transmisión de datos se realiza por radiofrecuencia en la banda ISM de 2,4 GHz, canales en el rango de 2394 a 2507 MHz. [9] La selección del canal se realiza de manera autónoma, aunque se puede especificar. El system on chip [23] que se utiliza es el cc2541 de Texas Instrument.

El system on chip cc2541 dispone de una potencia de salida máxima de 0dBm. El chip cc2590 amplifica la señal hasta 10dBm.[8] Mediante el registro TXPOWER admite un valor entre 0 y 255 se puede cambiar la potencia de salida entre -23dBm y 10dBm respectivamente.

La comunicación se realiza de dos maneras, mediante Advertising y mediante Pairing.

La comunicación mediante Advertising consiste en el envío de un paquete de 30 bytes de un dispositivo a otro. Este mensaje se estructura en dos partes. Los 14 primeros bytes son el origen, el destino, el hop count y el tipo de mensaje. Los 16 bytes restantes están encriptados en AES128 y llevan la información del sensor o de la acción para el actuador. En la tabla siguiente se muestra la trama del mensaje advertisement.

Middle	Number of hops	Origin	Destination	Type Data	Data AES-128
4 bytes	1 Bytes	4 Bytes	4 Bytes	1 Byte	16 Bytes

La comunicación mediante Pairing se realiza entre los dispositivos móviles y los dispositivos del sistema domótico. Consiste en el intercambio de información de las partes implicadas en un determinado canal. Para evitar que al asignar un nuevo dispositivo domótico a un dispositivo móvil haya que introducir obligatoriamente una contraseña, se ha diseñado un sistema de autenticación que no requiere Bonding[6]. El intercambio de mensajes se codifica con AES 128. Este tipo de comunicación se realiza sólo en el caso de que la instalación no disponga de hub o no tenga internet por cualquier causa.

La cerradura electrónica sólo admite comunicación vía Pairing para maximizar la autonomía de la batería. Por lo tanto el Hub también se comunicará con este dispositivo utilizando este método.

El stack BLE de texas instrument permite configurar los dispositivos con 4 roles distintos. Estos perfiles se detallan en la siguiente tabla.

Perfiles BLE	Descripción
Broadcaster	Permite transmitir advertisement
Observer	Permite escanear advertisement
Peripheral	Permite transmitir advertisement y recibir conexiones mediante pairing
Central	Permite escanear advertisement e iniciar conexiones mediante pairing

Cada uno de los tipos de dispositivos domóticos tiene uno o varios roles que se indican en la siguiente tabla. Hay una restricción, un dispositivo no puede ser Central y Peripheral al mismo tiempo, es decir, no puede realizar y recibir conexiones mediante pairing.

Tipo Dispositivo	Broadcaster	Observer	Peripheral	Central
Sensores	-	-	x	-
Actuadores	-	x	x	-
Hub	x	-	x	x
Cerradura electrónica	-	-	x	-
Localizadores	-	-	x	-
Repetidores	-	-	x	x

Como se observa en la tabla anterior el Hub tiene dos roles asignados que son incompatibles entre sí. Para solucionar este problema el firmware del Hub llevará instalada las dos librerías que dan soporte a estos dos roles. En modo de configuración utilizará el rol de peripheral y en modo producción el rol de central y broadcaster. Pasar del modo configuración al modo producción requiere realizar un reset, mientras que a la inversa se realiza directamente. Por defecto, el Hub siempre está en modo producción, sólo al apretar un botón durante un determinado tiempo se cambia al modo configuración.

En la comunicación BLE hay una pérdida de paquetes que va relacionada directamente con la saturación de los canales y la distancia entre los nodos que pretenden comunicarse.

En el gráfico 3.1 se analiza como se comporta el RSSI en relación con la distancia y con distintos dBm. Independientemente de la potencia de emisión a mayor distancia disminuye el RSSI.

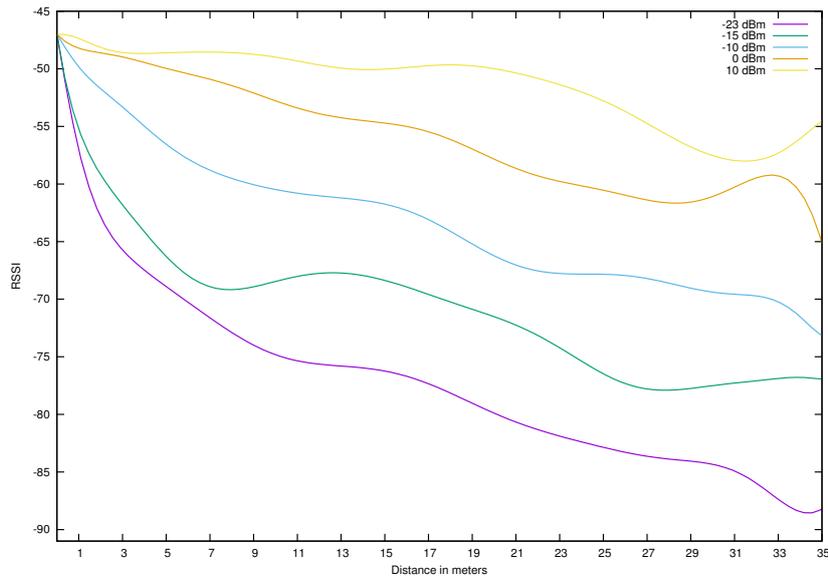


Figura 3.1: RSSI vs Distancia para diferentes potencias de emisión

En el gráfico 3.2 se analiza para una potencia de transmisión de 10 dBm la relación del RSSI con la distancia en un entorno libre de obstáculos interior y exterior. Independientemente del entorno a mayor distancia disminuye el RSSI.

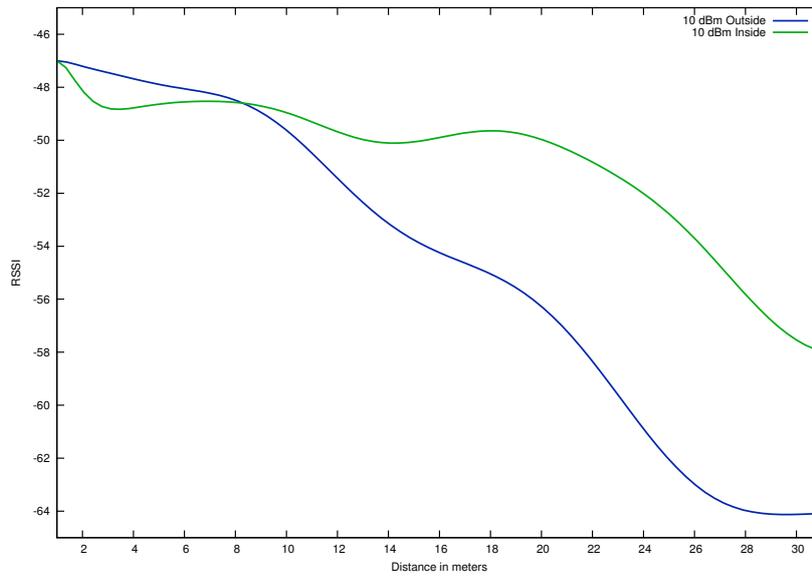


Figura 3.2: RSSI vs Distancia

En el gráfico 3.3 se analiza la pérdida de paquetes en relación con la distancia para una potencia de transmisión de 10 dBm. A mayor distancia disminuye el número de paquetes recibidos.

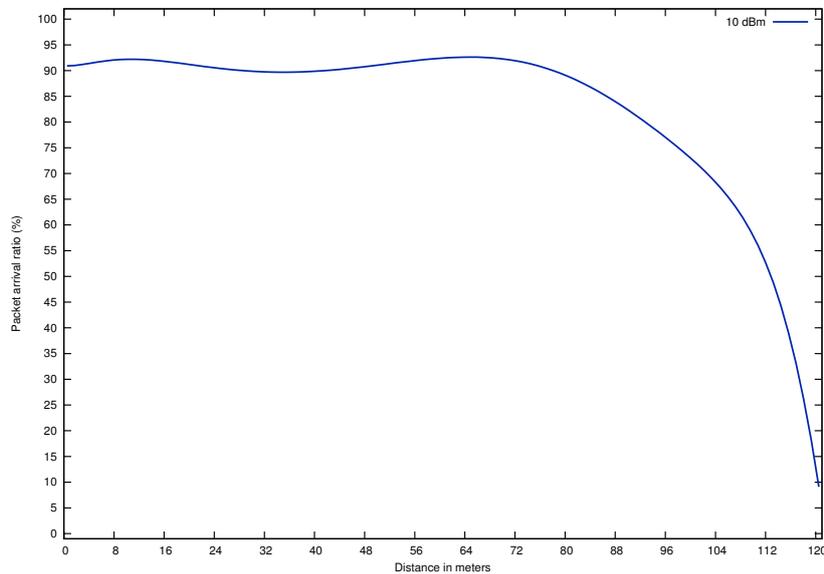


Figura 3.3: Paquetes recibidos vs Distancia

En el gráfico 3.4 se analiza la pérdida de paquetes en relación con el número de dispositivos emitiendo por canal. Para este estudio se ha utilizado una potencia de 10dBm. A medida que aumentamos el número de emisores se van saturando los

canales y aumenta el número de pérdida de paquetes. Una prueba etiquetada en la gráfica como Inside se ha realizado con los emisores posicionados alrededor del receptor. La otra prueba etiquetada en la gráfica como Outside se ha realizado con los emisores agrupados y el receptor a dos metros de esa agrupación. Los emisores emiten un paquete cada 27 ms.

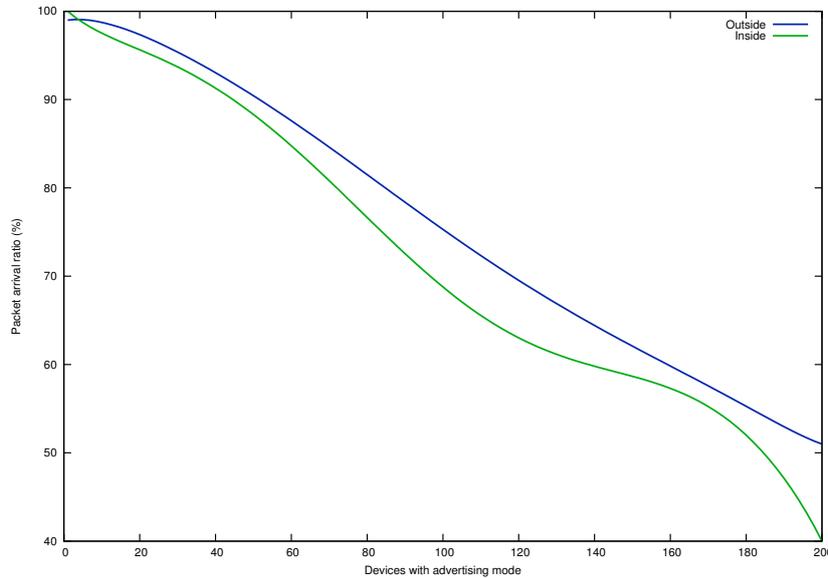


Figura 3.4: Paquetes recibidos vs número de emisores

Para poder realizar una conexión vía pairing, el dispositivo que tiene el rol de peripheral, emite dos paquetes con una frecuencia determinada. El primer paquete es el advertisement formato iBeacon, y el segundo paquete el scan-response. El paquete scan-response contiene la información de los servicios primarios del dispositivo.

En la siguiente tabla se muestra la trama de 13 bytes del paquete scan-response.

Bytes structure 1	Flags AD type	Bytes structure 2	Type structure	Identificator	Bytes structure 3	Type structure	Primary Service
0x02	1 Byte	0x05	0x05	4 bytes	0x03	0x02	0xFFFF0

3.2. Análisis del sistema de posicionamiento interior

El sistema de posicionamiento interior utiliza BLE para posicionar a las personas en una sala en concreto. El grado de precisión necesario para el sistema doméstico

es de posicionar correctamente en una sala determinada de una localización concreta. Cada sala dispondrá de una baliza de localización que estará emitiendo un paquete a una frecuencia determinada.

Para que los paquetes BLE puedan ser reconocidos por los sistemas operativos móviles IOS o Android, deben tener un formato concreto. El formato que utilizamos para maximizar las compatibilidades es el formato iBeacon. Consiste en un paquete de 30 bytes que tiene una cabecera y unos datos que se utilizan como posicionamiento interior.

En la tabla siguiente se muestra la trama del paquete iBeacon.

Head	UUID	Major	Minor	TX power
9 bytes	16 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	1 Byte

El parámetro UUID lo utilizamos como identificador de una localización en concreto. Major y Minor se utilizan para identificar al dispositivo. TX power se utiliza para ajustar el RSSI.

El Head del iBeacon tiene un formato concreto que se detalla en la siguiente tabla. Todos los valores son fijos a excepción del campo Flags AD type que indica el rol del dispositivo.

Bytes structure 1	Type structure	Flags AD type	Bytes structure 2	Manufacturer	Company code	Advertisement indicator
0x02	0x01	1 Byte	0x1A	0xFF	0x4C00	0x0215

Hay cinco parámetros críticos para una correcta localización en interiores: potencia con la que se emite la señal, RSSI, ubicación del dispositivo de localización en la sala, frecuencia de emisión de los iBeacon y número de escaneos que realiza el dispositivo Observer.

El RSSI aumenta en función de la distancia y de la potencia de emisión. Si se aumenta la potencia, aumenta el número de paquetes que se reciben en una posición determinada. Esto provoca una mayor pérdida de paquetes y en consecuencia obliga a aumentar el tiempo de escaneo. Si la distancia entre los dispositivos de localización es pequeña, la diferencia de RSSI es mínima y aumentan las zonas de incertidumbre. Al disminuir la potencia, disminuye el número de paquetes que se reciben en una posición determinada y en consecuencia disminuye la pérdida de paquetes. Luego se puede reducir el tiempo de escaneo. Reducir el tiempo de escaneo significa disminuir el tiempo en la detección cambiar de una zona a otra. Aunque la distancia entre los dispositivos sea pequeña la diferencia de RSSI es notable, disminuyen las zonas de incertidumbre. En el caso de que la distancia sea grande si habrán zonas en las que no se detecta ningún dispositivo de posicionamiento y aumentará el tiempo de detección cambiar de una zona a otra. Al no estar en ninguna zona el sistema no posiciona.

El escenario ideal es que un dispositivo cubra su zona asignada por completo, sin que existan zonas de incertidumbre de una zona a otra.

Si aumentamos la frecuencia de emisión de los ibeacons, se reduce el tiempo de escaneo, pero disminuye la vida útil de las baterías. La probabilidad de acierto de la zona detectada aumenta.

3.3. Análisis del consumo por dispositivo

El system on chip [23] cc2541 tiene tres estados de reposo posibles en adelante Power Mode. El objetivo es que la mayor parte del tiempo se utilice el Power mode 3 que consume $0.5 \mu A$, y que esté el menor tiempo posible en TX mode que consume a 0 dBm 18.2 mA y en RX mode que consume con la ganancia activa 20.2 mA.

En la tabla 3.1 se resumen todos los niveles de consumo del cc2541.

Tabla 3.1: cc2541 Electrical Characteristics

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Measured on Texas Instruments CC2541 EM reference design with $T_A = 25^\circ C$ and $V_{DD} = 3 V$,
1 Mbps, GFSK, 250-kHz deviation, Bluetooth low energy mode, and 0.1% BER

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT	
I_{core} Core current consumption	RX mode, standard mode, no peripherals active, low MCU activity		17.9		mA	
	RX mode, high-gain mode, no peripherals active, low MCU activity		20.2			
	TX mode, -20 dBm output power, no peripherals active, low MCU activity		16.8			
	TX mode, 0 dBm output power, no peripherals active, low MCU activity		18.2			
	I_{core} Core current consumption	Power mode 1. Digital regulator on; 16-MHz RCOSC and 32-MHz crystal oscillator off; 32.768-kHz XOSC, POR, BOD and sleep timer active; RAM and register retention		270		μA
		Power mode 2. Digital regulator off; 16-MHz RCOSC and 32-MHz crystal oscillator off; 32.768-kHz XOSC, POR, and sleep timer active; RAM and register retention		1		
		Power mode 3. Digital regulator off; no clocks; POR active; RAM and register retention		0.5		
		Low MCU activity: 32-MHz XOSC running. No radio or peripherals. Limited flash access, no RAM access.		6.7		mA
I_{peri} Peripheral current consumption (Adds to core current I_{core} for each peripheral unit activated)	Timer 1. Timer running, 32-MHz XOSC used		90		μA	
	Timer 2. Timer running, 32-MHz XOSC used		90			
	Timer 3. Timer running, 32-MHz XOSC used		60			
	Timer 4. Timer running, 32-MHz XOSC used		70			
	Sleep timer, including 32.753-kHz RCOSC		0.6			
	ADC, when converting		1.2		mA	

Al ampliar la señal de emisión con el chip cc2590 el consumo es de $1 \mu A$ en Power Mode 2. El modo TX consume 41.1 mA a 10dBm. El modo RX consume 21.6 mAh.

En la tabla 3.2 se resumen todos los niveles de consumo del circuito compuesto por el cc2541 y el amplificador de señal cc2590.

Tabla 3.2: cc2541 + cc2590 Electrical Characteristics

Parameter	Condition	Typical	Unit
Receive Current	Wait for sync, -90 dBm input level	21.6	mA
	Wait for sync, -50 dBm input level	21.6	
Transmit Current	TXPOWER = 0xF1	41.1	mA
	TXPOWER = 0xE1	36.6	
	TXPOWER = 0xD1	32.8	
	TXPOWER = 0xC1	30.5	
	TXPOWER = 0xB1	28.8	
	TXPOWER = 0xA1	27.5	
Power Down Current	PM2	1	uA

Si analizamos el consumo desde la perspectiva de los roles, el rol Observer permanece el máximo de tiempo despierto en modo RX, el rol Broadcaster mientras está emitiendo paquetes, el rol Central cuando realiza una conexión combina el modo TX con el RX dependiendo si está escaneando o transmitiendo un paquete y el rol Peripheral permanece una ventana de tiempo en modo RX y otra en TX.

En el gráfico 3.5 se observa que el dispositivo está en modo reposo se despierta en modo TX y transmite un paquete en modo RX, lo procesa y luego se vuelve a dormir.

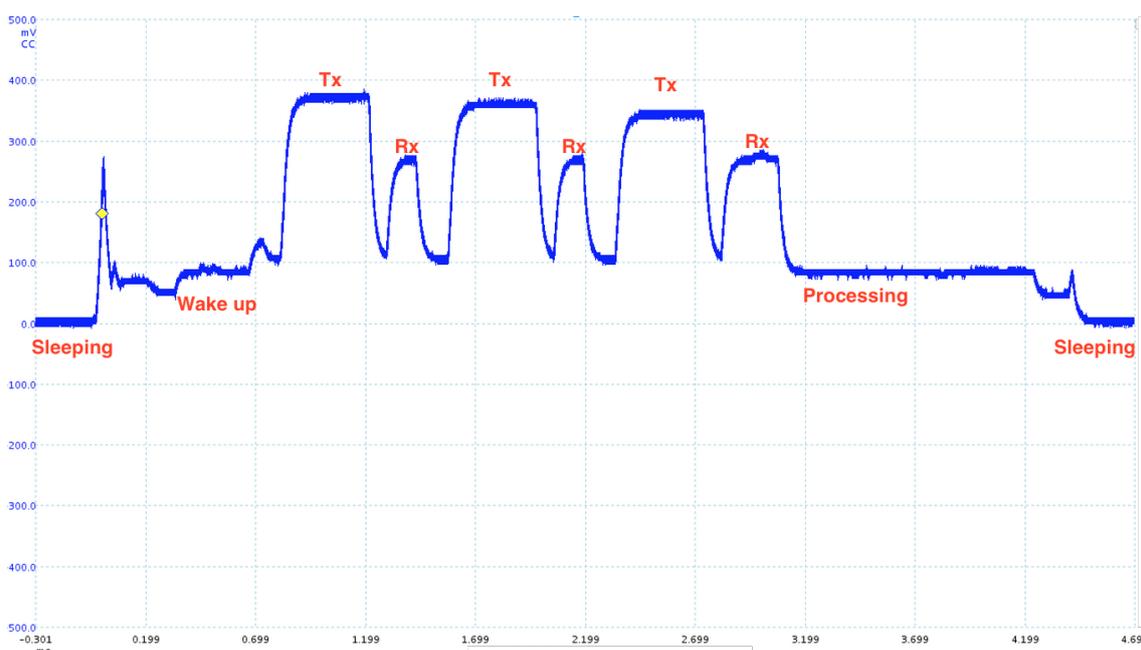


Figura 3.5: CC2541 Peripheral consumption (APPLICATION NOTE AN092)

El sensor de temperatura y humedad HDC1000 tiene un consumo en modo reposo de 110 nA. En modo lectura tiene un consumo de 7.6 mA.

En la tabla 3.3 se resumen todos los niveles de consumo de este chip.

Tabla 3.3: Texas instrument HDC1000 Electrical characteristics

PARAMETER	TEST CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNIT	
POWER CONSUMPTION						
I _{DD}	Supply Current	RH measurement, bit 12 of 0x02 register = 0 ⁽¹⁾		180	220	μA
		Temperature measurement, bit 12 of 0x02 register = 0 ⁽¹⁾		155	185	μA
		Sleep Mode		110	200	nA
		Average @ 1 measurement/second, RH (11 bit), bit 12 of 0x02 register = 0 ⁽¹⁾⁽²⁾		730		nA
		Average @ 1 measurement/second, Temp (11 bit), bit 12 of 0x02 register = 0 ⁽¹⁾⁽²⁾		580		nA
		Average @ 1 measurement/second, RH (11bit) +temperature (11 bit), bit 12 of 0x02 register = 1 ⁽¹⁾⁽²⁾		1.2		μA
		Startup (average on Start-up time)		300		μA
I _{HEAT}	Heater Current ⁽³⁾	Peak current		7.6		mA
		Average @ 1 measurement/second, RH (11bit) +temperature (11 bit), bit 12 of 0x02 register = 1 ⁽¹⁾⁽²⁾		57		μA

Para minimizar el consumo, hay que limitar el número de lecturas. Pero si se dilatan en el tiempo en exceso, un cambio brusco de temperatura o humedad

provocado por un accidente podría ser fatídico, luego hay que buscar un compromiso entre el número de lecturas por minuto y la autonomía del dispositivo.

El sensor acelerómetro en modo reposo consume $10 \mu A$. En modo lectura consume $135 \mu A$

En la tabla 3.4 se resumen todos los niveles de consumo de este chip.

Tabla 3.4: Kionix KXCJ9 Electrical

Parameters		Units	Min	Typical	Max
Supply Voltage (V_{dd})	Operating	V	1.71	2.6	3.6
I/O Pads Supply Voltage (V_{IO})		V	1.7		V_{dd}
Current Consumption	Full Power Mode (RES = 1)	μA		135	
	Low Power Mode ¹ (RES = 0)			10	
	Disabled			0.9	

Este acelerómetro permite despertar por interrupción al chip BLE principal. En el momento que se produce la interrupción el chip principal ordena la lectura de los registros donde se indican las aceleraciones producidas en alguno de los ejes.

El sensor ACS0712 mide el consumo de corriente y tiene en modo trabajo 10 mA de consumo que es muy elevado por lo debe estar conectado el menor tiempo posible. Este sensor se utiliza con los dispositivos domóticos actuadores, estará midiendo la intensidad de la corriente cuando el relé esté encendido.

El motor de la cerradura electrónica consume 340 mA cuando está ejecutando la acción de abrir o cerrar. El resto del tiempo está apagado, no tiene consumo.

El resto de componentes electrónicos permanecerán apagados durante la mayor parte del tiempo. Cuando el BLE reciba una orden de encendido, entonces se pondrán en marcha y cuando recibe una orden de apagado dejarán de consumir energía.

En la figura 3.6 se resume el consumo mínimo y máximo de los distintos tipos de dispositivos y consumos asociados.

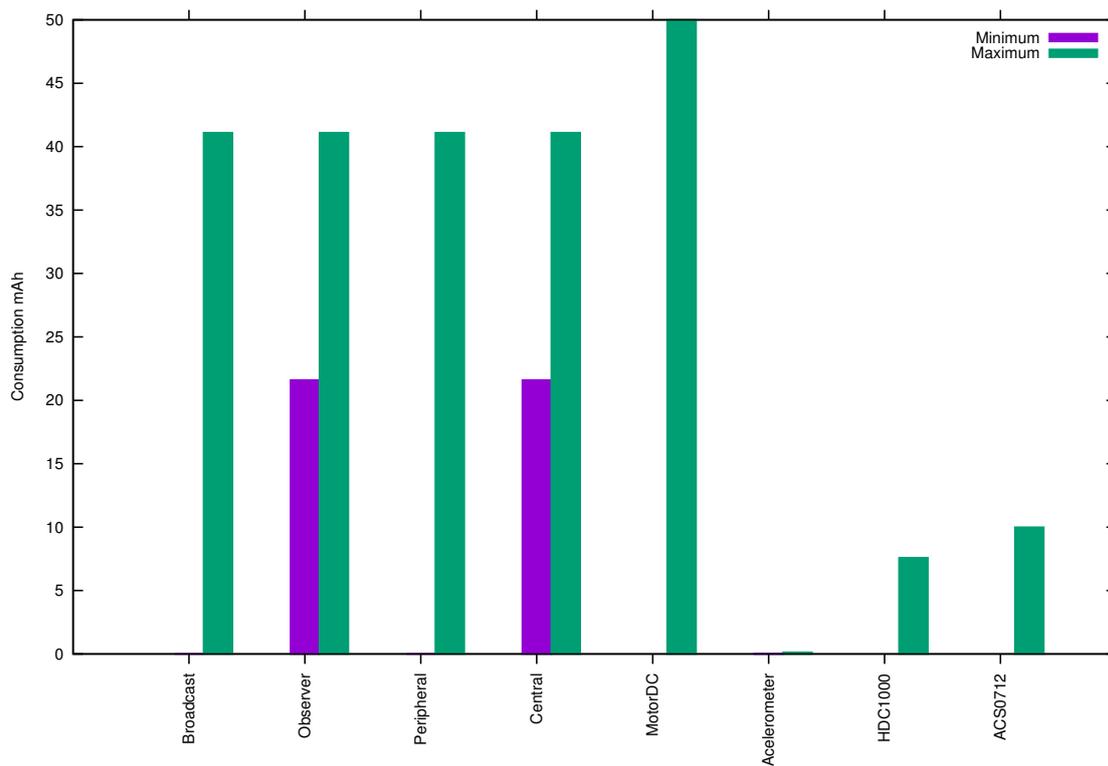


Figura 3.6: Resumen de consumo

Capítulo 4

Diseño

Este capítulo corresponde a la fase de diseño del sistema domótico que se subdivide en: diseño del sistema de comunicación BLE[5], sistema de posicionamiento interior[16] y consumo por dispositivo.

4.1. Diseño del sistema de comunicación BLE

El Hub se comunica con los distintos dispositivos del sistema domótico mediante BLE. En la figura 4.1 se ilustra la comunicación BLE del sistema domótico. El Hub se comunica mediante advertisement con todos los dispositivos excepto con la cerradura electrónica que se comunica mediante pairing.

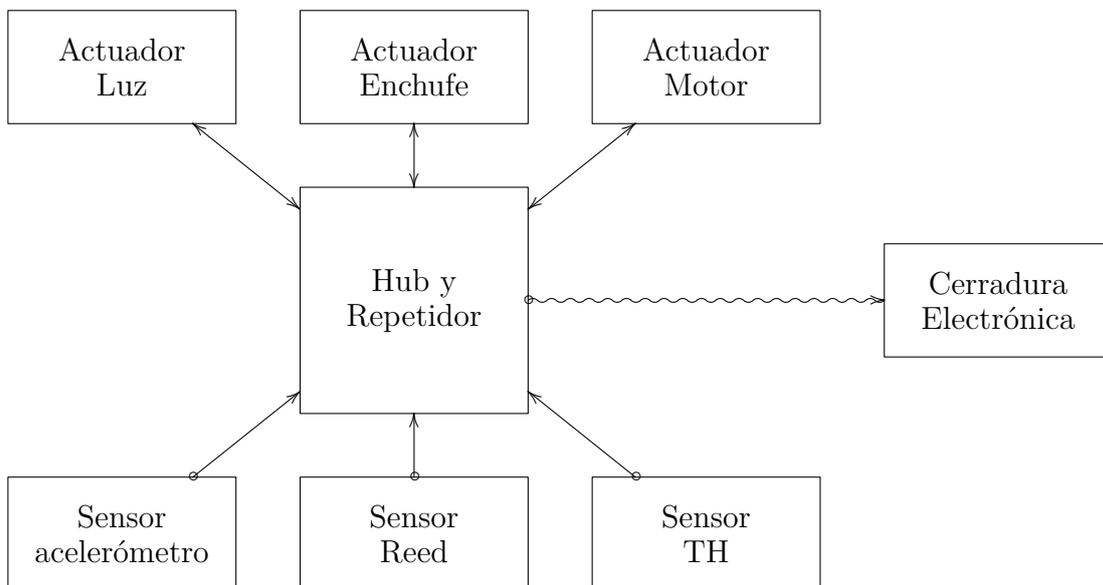


Figura 4.1: Diagrama comunicación Hub y dispositivos BLE

Con el objetivo de maximizar la cobertura de señal del sistema de comunicación BLE, en la medida de lo posible, los dispositivos emitirán a máxima potencia y tendrán activada la ganancia en la recepción de paquetes.

La potencia de emisión se adapta dependiendo del tipo de comunicación que se vaya a realizar. Para la transmisión de paquetes mediante advertisement, todos los dispositivos emiten a máxima potencia 10dBm. Aunque a máxima potencia el consumo es mayor, la emisión mediante advertisement se utiliza en momentos de tiempo concretos, para realizar una acción o como información de un sensor. El peso que tiene la emisión de advertisement respecto al consumo total del dispositivo depende del número de advertisement por unidad de tiempo, por lo general si no hay un mal funcionamiento será despreciable.

La potencia de emisión de los iBeacons[13] que se utilizan para posicionar se ajusta con el objetivo de minimizar las zonas de incertidumbre.

La comunicación mediante pairing se realiza a máxima potencia. El peso que tiene la emisión del scan-response respecto al consumo total del dispositivo depende de la frecuencia de emisión, será una constante de consumo alto.

Los dispositivos móviles se comunican con los distintos dispositivos del sistema domótico mediante Pairing.

En la figura 4.2 se ilustra la comunicación mediante Pairing. El inicio del pairing siempre lo realiza el dispositivo móvil.

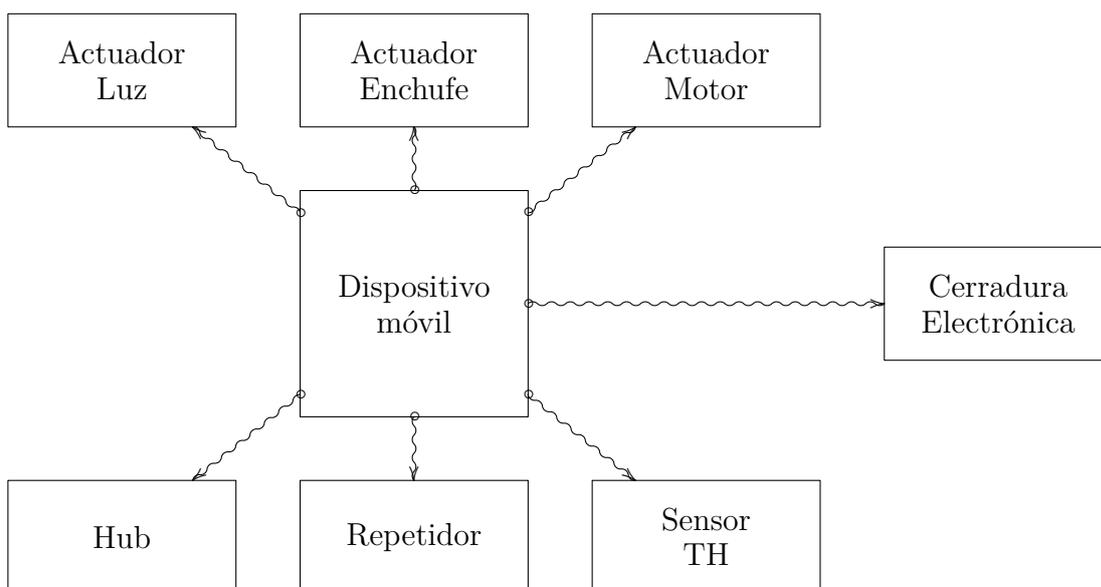


Figura 4.2: Diagrama comunicación dispositivo móvil con dispositivos BLE

Para iniciar el pairing primero hay que escanear en busca del dispositivo con el objetivo de establecer una conexión. Se hace una búsqueda filtrando los paquetes por el campo identificador del dispositivo. Cuando se encuentra un paquete que cumple con los criterios de búsqueda, se procede a descubrir el servicio FFF0. El servicio descubierto tiene la característica FFF1 que es la que se utiliza para intercambiar datos y autenticarse. Si el proceso de autenticación falla o en 300 milisegundos no se ha escrito en esta característica, se rechaza la conexión. Tras un número de intentos fallidos el dispositivo queda bloqueado indefinidamente y se avisa al usuario servidor de sucesivos intentos fallidos de conexión. Si la autenticación es satisfactoria, el dispositivo en concreto realiza la acción o la lectura de parámetros solicitada

La comunicación mediante advertisement se realiza de manera unidireccional o bidireccional. Todos los dispositivos cuando emiten un cambio de estado o información de control de forma unidireccional. El dispositivo emite un advertisement y el Hub[12] que tiene asignado este dispositivo recibe el paquete de información. Los paquetes tienen pueden ser meramente informativos o de alarma. En caso de ser un paquete de alarma, si el Hub en ese momento no tiene internet, se procede a hacer sonar una alarma.

En la siguiente tabla se resumen los distintos mensajes de información.

Aviso	Información	Tipo
Estado Reed	Abierto o cerrado	Alarma
Lectura Acelerómetro	Aceleración en los ejes X, Y, Z	Alarma
Lectura Temperatura y humedad	Temperatura y humedad	Información
Estado Encendido Luz	Encendido o apagado	Información
Estado Encendido Enchufe	Encendido o apagado	Información
Estado Batería	Nivel batería	Información
Consumo	Nivel consumo	Información
Estado cerradura	Abierta, cerrada o error	Información

Se utiliza comunicación bidireccional para realizar una acción determinada a un dispositivo. El flujo de mensajes se inicia siempre desde el dispositivo móvil o el servidor. El servidor se comunica con el hub por internet. El Hub se comunica con su sistema de comunicación BLE mediante UART[26]. En la siguiente tabla se muestra el formato de datos que se utiliza para la comunicación UART dirección Hub hacia BLE

Start	Data Length	Code operation	Data
2 Bytes	1 Byte	1 Byte	1..n Bytes

En la siguiente tabla se muestra el formato de datos que se utiliza para la comunicación UART dirección BLE hacia HUB

Start	Data Length	Code operation	Origin Id	Data	RSSI
2 Bytes	1 Byte	1 Byte	4 Bytes	1..n Bytes	1 Byte

El BLE recibe el paquete a transmitir y lo introduce en una cola. Por orden de llegada a la cola los mensajes se van transmitiendo mediante advertisement. Cada mensaje se envía en ráfagas de 10 repeticiones a 30 ms de frecuencia. El objetivo es que por lo menos uno llegue a su destino. Todos los dispositivos de ese tipo reciben el mensaje, pero sólo el destinatario lo procesa, los demás lo filtran. Si al decodificar el mensaje la validación es correcta, se realiza la acción, y se envía un mensaje de respuesta al emisor con información necesaria para la siguiente comunicación. Si por el contrario la validación es incorrecta se descarta el mensaje, sin avisar al emisor.

En la siguiente tabla se indican las distintas acciones que soporta el sistema.

Acción	Información	Tipo
Leer Temperatura y humedad	Temperatura y humedad	Información
Gestión Luz	Encender o apagar	Acción
Gestión Enchufe	Encender o apagar	Acción
Leer Estado Batería	Nivel batería	Información
Leer Consumo	Nivel consumo	Información
Gestión motor	Dirección 1, dirección 2 o parar	Acción
Gestión cerradura	Abir, cerrar, o parar acción actual	Acción
Cambiar TX power	TX power, ganancia RX	Configurar Parámetros
Cambiar Frecuencia	Frecuencia	Configurar Parámetros

La comunicación por advertisement se realiza siempre por ráfagas de 10. La frecuencia entre cada paquete es de 30 ms que es la frecuencia mínima a la que se puede configurar el SOC cc2541. Cada mensaje se emite durante 340 ms, periodo que permite enviar entre 10 y 11 paquetes dependiendo de las interrupciones que en ese momento tiene que soportar el procesador. La latencia que se obtiene desde que el dispositivo móvil envía una acción hasta su ejecución es de media 80 ms.

La frecuencia del scan-response se configura a 400ms. La latencia que se obtiene desde que el dispositivo móvil inicia el pairing hasta su ejecución es de media 840ms. No es factible bajar más la frecuencia del scan-response al recortarse la vida útil de la batería del dispositivo significativamente.

La frecuencia del ibeacon la determina el scan-response. Los dos paquetes se emiten conjuntamente y necesariamente deben tener la misma frecuencia. Es posible crear una rutina para que el scan-response y el ibeacon tengan distinta frecuencia pero tiene mayor consumo que si se escoge la frecuencia de menor consumo y se emiten ambos paquetes con la misma frecuencia.

Si una localización no dispone de Hub, toda comunicación con los dispositivos se hace mediante pairing. Sólo se pueden realizar acciones, no se reciben avisos. Al no disponer de Hub no es posible actuar desde fuera de la localización usando internet. El resto de funcionalidades del sistema es el mismo pero con una latencia superior a la comunicación mediante pairing. Si el sistema dispone de uno o varios Hub, por defecto prevalece la comunicación mediante advertisement. En cada comunicación se registra el RSSI del paquete recibido en el servidor. Si la localización dispone de varios Hub para enviar un mensaje a un dispositivo en concreto, sea vía pairing o advertisement, se selecciona el Hub que mejor RSSI en la comunicación tenga con el destino. Esta decisión se toma desde el servidor.

Hay zonas en las que la señal no llega y no es posible realizar comunicación desde el Hub, vía pairing o advertisement. Se utilizan repetidores para llegar a los dispositivos. El repetidor es un dispositivo que solo sirve para extender el rango de cobertura de un Hub con los dispositivos con los que no logra comunicarse directamente. Todo hub sabe en todo momento los dispositivos que tiene asignados. El repetidor interviene cuando el Hub inicia una comunicación con un dispositivo concreto y falla. El Hub intenta realizar la comunicación a través del repetidor vía advertisement. Hay un campo especial en el advertisement, el Hop Count que se inicializa con el número de repetidores que tiene asignados el Hub. El repetidor cuando recibe un mensaje comprueba en el campo middle su identificador o el identificador de broadcast, de lo contrario lo rechaza. Si la validación es correcta comprueba si el Hop Count es mayor de 0, caso afirmativo propaga el mensaje y disminuye el contador de saltos. Si el Hop Count es 0 intenta la comunicación como le viene indicada en el mensaje, por pairing o por advertisement.

Para evitar emitir mensajes mediante broadcast cada repetidor sabe en todo momento cuales son los dispositivos más cercanos. Siempre que está escaneando guarda en su tabla de encaminamiento el RSSI de todos los paquetes emitidos por dispositivos de la Red. Sabe distinguir los dispositivos destino de los repetidores. Si cuando recibe un mensaje con Hop Count mayor de 1 en su tabla de encaminamiento aparece el dispositivo final, avisa al Hub para que en próximas comunicaciones el servidor pueda contrastar con la información que recibe de otros dispositivos para seleccionar la ruta más adecuada. Para la propagación del mensaje se escoge de la tabla de encaminamiento el repetidor con mejor RSSI, si no hay ningún repetidor se realiza una difusión mediante broadcast. Consiste en poner en el campo middle del advertisement el identificador de broadcast. Todos los repetidores al escanear validan el mensaje y siguen el algoritmo anterior. Se limita el Hop count a 3 saltos máximo.

4.2. Diseño del sistema de posicionamiento interior

En adelante temperatura, humedad y localización se agrupan en un dispositivo. De este modo no hay que crear un dispositivo específico para la localización. Se ha elegido el sensor de temperatura porque no requiere de una ubicación concreta mientras que todos los demás si lo requieren y esto puede condicionar en algunos casos el correcto funcionamiento del sistema de localización. Cualquier dispositivo puede utilizarse como dispositivo de localización.

Se asigna un dispositivo de localización a cada sala. Se ubica el dispositivo en la sala en una posición determinada. El objetivo es que un dispositivo cubra su zona asignada por completo, minimizando las zonas de incertidumbre. Periódicamente cada dispositivo de localización escanea el RSSI de los iBeacon que se están emitiendo. En función del RSSI de cada vecino y de la potencia a la que está emitiendo, se regula la potencia de emisión del dispositivo de localización.

Si dos dispositivos de localización se colocan a menos de 1 metro de distancia, disminuye el porcentaje de acierto. Un dispositivo si está demasiado cerca de otro envía un advertisement al Hub que avisa al dispositivo móvil con una notificación del servidor, con el objetivo de reubicar los dispositivos y reducir las zonas de incertidumbre.

En la figura 4.3 se ilustra el aviso entre los dispositivos de localización y el dispositivo móvil.

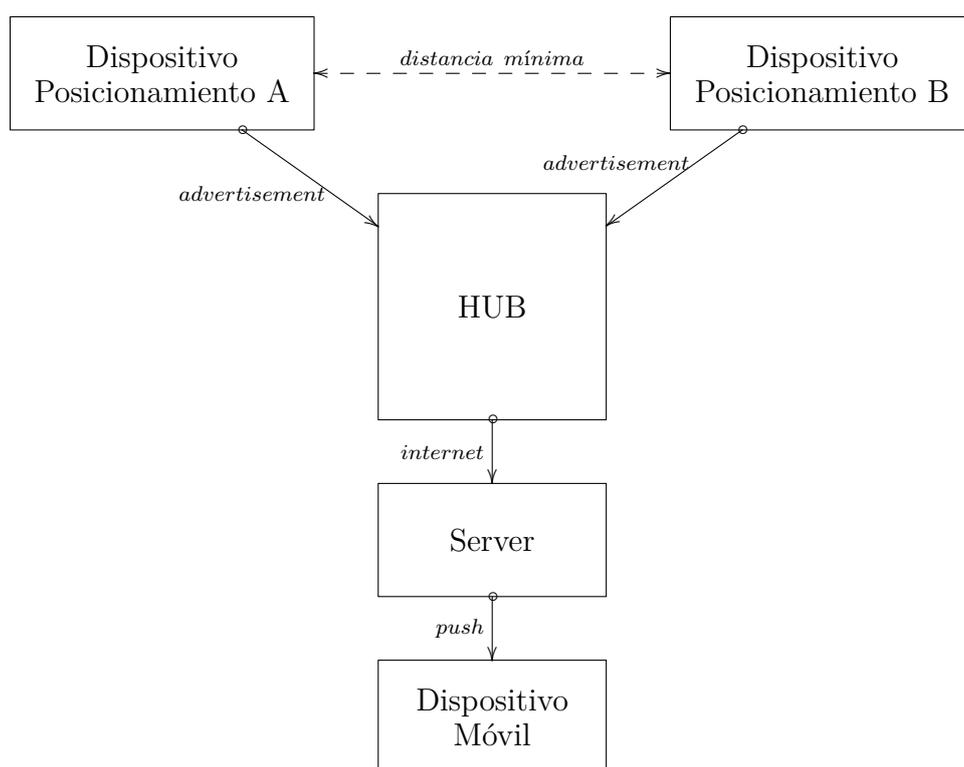


Figura 4.3: Proceso comunicación distancia mínima entre 2 dispositivos de posicionamiento

Puede darse el caso de que el usuario final no esté satisfecho con el grado de precisión del sistema de posicionamiento. Se proponen dos soluciones al usuario, la primera es cambiar la ubicación de los dispositivos de localización, la segunda es fijar el nivel de potencia de cada dispositivo manualmente, desactivando la opción de regulación automática.

Por otra parte el dispositivo móvil tiene activado el modo IPS en background el dispositivo se despierta cuando entra o sale de una zona. Para nuestro sistema una zona es el conjunto de UUID, Major y Minor del iBeacon. La detección de las entradas es inmediata pero hay un retardo de 20 segundos para las salidas. Sólo se tienen en cuenta cuando se abandona la localización. Cada vez que se produce un evento de entrada a nueva zona, se realiza un escaneo de 2 segundos. Cuando más tiempo se está escaneando, aumenta la probabilidad de acierto, se produce un retardo en la detección de cambio de zona. El dispositivo de posicionamiento con mejor RSSI marca el posicionamiento dentro de la localización. Cuando se produce un evento de salida se realiza un escaneo y si no se detecta ningún dispositivo significa que hemos abandonado la localización. Toda comunicación con el sistema domótico se realizará a través del servidor.

La frecuencia de emisión con la que se emiten los iBeacon es de 400 ms. Hasta 1200 ms el sistema de posicionamiento funciona correctamente. Al reducir la frecuencia se consigue disminuir el tiempo de escaneo para una misma tasa de aciertos. Reducir el tiempo de escaneo es reducir el tiempo entre cambios de zona significativamente.

4.3. Optimización del consumo por dispositivo

Para cada dispositivo se diseña una estrategia para minimizar el consumo de energía y poder alargar la vida útil de las baterías o no malgastar energía sin necesidad alguna. En la siguiente tabla se resumen las actuaciones de ahorro energético por dispositivo.

Dispositivo	Descripción Energética
Hub con batería 1400mAh y alimentación DC 5v 1200mAh	El BLE situado en el Hub está la mayor parte del tiempo escaneado con un consumo de 21.6 mAh que representa el 5 % su consumo total. No es recomendable limitar los tiempos de escaneo y aumentar los tiempos de reposo sin aumentar la pérdida de paquetes. Este dispositivo nunca está en modo reposo. No emite iBeacon o scan-response en modo producción sí en modo configuración. No es representativo para el consumo total. El BLE se comunica con el HUB mediante UART[26]. La UART no añade consumo extra al estar el dispositivo siempre despierto escaneando. El consumo en la transmisión de mensajes viene determinado por el número de dispositivos que tenga asignado el Hub. El consumo máximo que puede tener el Hub es de 41.1 mA que representa el 10 % de su consumo total.
Sensor Temperatura y humedad con batería CR2450	El BLE se comunica mediante I2C[14] con el sensor de bajo consumo HDC1000. Cada 5 segundos se solicitará al registro correspondiente del sensor la ejecución de una lectura de temperatura y humedad. Esta lectura se comparará con la lectura anterior, si hay una diferencia mayor de 0.2 grados para la temperatura o una diferencia mayor del 3 % para la humedad se emitirá un advertisement con el aviso correspondiente. El BLE está la mayor parte del tiempo en reposo POWER MODE 2 consumiendo 1.34 μAh . Cada 400 ms emitirá un iBeacon y scan-response que consumirá en función del TX-power asignado.

Sensor Acelerómetro con batería CR2450	El BLE se comunica mediante I2C[14] con el sensor de bajo consumo KXCJ9. El bus I2C sólo consume cuando se transmiten datos. La configuración óptima es programar el sensor acelerómetro para que funcione de manera autónoma. Cuando el sensor detecta un cambio produce una interrupción que despierta al BLE que está en modo reposo POWER MODE 2. Se emite un advertisement durante 340 ms con un consumo de 41.1 mAh. Con esta configuración hay un consumo mínimo de 12 μAh . El consumo producido por el Mode TX no es representativo.
Sensor Reed con batería CR2450	El interruptor magnético reed no tiene consumo en modo reposo. Sólo consume 10 mAh durante 20 ms en el cambio de estado. Se emite un advertisement durante 340 ms con un consumo de 41.1 mAh. La mayor parte del tiempo se encuentra en reposo en POWER MODE 2 consumiendo 1.34 μAh . El consumo producido por el Mode TX no es representativo.
Actuador Luz con alimentación AC 110/220	El relé utilizado es un biestable sólo necesita 10 ms para activarse, consumo no es representativo. El sensor de consumo ACS0712 consume 10 mAh cuando está encendido. Para ahorrar energía cuando el dispositivo recibe la orden de encendido se procede a medir el consumo a una frecuencia de 30 segundos. De este modo se minimiza el impacto que tiene sobre el consumo total del dispositivo. Cada 200 ms el dispositivo está escaneado durante 20 ms deja el consumo en POWER RX en 2.16 mAh. Como las ráfagas de advertisement duran 340 ms la probabilidad de que se pierda un mensaje es baja. Si el RSSI entre el Hub y el dispositivo es menor de -85, los periodos de escaneo se ampliarán hasta el 100 % del tiempo. El 90 % del tiempo se encuentra en reposo en POWER MODE 2 consumiendo 1.34 μAh . El consumo producido por el Mode TX no es representativo.

Actuador Enchufe con alimentación AC 110/220	El relé utilizado es un biestable sólo necesita 10 ms para activarse, consumo no es representativo. El sensor de consumo ACS0712 consume 10 mAh cuando está encendido. Para ahorrar energía cuando el dispositivo recibe la orden de encendido se procede a medir el consumo a una frecuencia de 30 segundos. De este modo se minimiza el impacto que tiene sobre el consumo total del dispositivo. Cada 200 ms el dispositivo está escaneado durante 20 ms deja el consumo en POWER RX en 2.16 mAh. Si el RSSI entre el Hub y el dispositivo es menor de -85, los periodos de escaneo se ampliarán hasta el 100 % del tiempo. El 90 % del tiempo se encuentra en reposo en POWER MODE 2 consumiendo 1.34 μAh . El consumo producido por el Mode TX no es representativo.
Actuador Motor con alimentación AC 110/220	Se utilizan 2 relé biestable sólo necesita 10 ms para activarse, consumo no es representativo. El sensor de consumo ACS0712 consume 10 mAh cuando está encendido. Para ahorrar energía cuando el dispositivo recibe la orden de encendido se procede a medir el consumo a una frecuencia de 30 segundos. De este modo se minimiza el impacto que tiene sobre el consumo total del dispositivo. Cada 200 ms el dispositivo está escaneado durante 20 ms deja el consumo en POWER RX en 2.16 mAh. Si el RSSI entre el Hub y el dispositivo es menor de -85, los periodos de escaneo se ampliarán hasta el 100 % del tiempo. El 90 % del tiempo se encuentra en reposo en POWER MODE 2 consumiendo 1.34 μAh . El consumo producido por el Mode TX no es representativo.

Cerradura electrónica con 6 pilas 1.5v o alimentación DC 12v 2000mAh	<p>A este dispositivo hay que añadirle el consumo del acelerómetro KXCJ9 que lo utiliza para detectar la apertura manual de la cerradura.</p> <p>El BLE se comunica mediante I2C[14] con el sensor de bajo consumo KXCJ9. El BLE está la mayor parte del tiempo en reposo POWER MODE 2 consumiendo $1.34 \mu Ah$. Cada 400 ms emitirá un iBeacon y scan-response que consumirá en función del TX-power asignado. El consumo del motor es de 340 mAh y sumándole el resto de electrónica se sitúa en 600 mAh. La duración de la maniobra de cerrar o abrir es de 1.5 segundos por vuelta. Se estima que cada maniobra tiene 3 vueltas de media y una duración total de 5s.</p>
Repetidor con alimentación AC 110/220	<p>Cada 200 ms el dispositivo está escaneado durante 20 ms deja el consumo en POWER RX en 2.16 mAh. Como las ráfagas de advertisement duran 340 ms la probabilidad de que se pierda un mensaje es baja. Si el RSSI entre el Hub y el dispositivo es menor de -85, los periodos de escaneo se ampliarán hasta el 100 % del tiempo. El 90 % del tiempo se encuentra en reposo en POWER MODE 2 consumiendo $1.34 \mu Ah$. El consumo producido por el Mode TX no es representativo.</p>

En la tabla 4.2 se resumen todos los consumos por dispositivo y modo.

Tabla 4.2: Consumos por dispositivo y modo

Dispositivo	Estimación tiempo en reposo	Consumo Modo Reposo	Estimación tiempo RX	Consumo Modo RX	Estimación tiempo TX	Consumo Modo TX
Hub	50%	$1.34 \mu Ah$	45%	21.6 mAh	5%	41.1 mAh
Sensor Temperatura y humedad	95%	$1.34 \mu Ah$	0%	-	5%	41.1 mAh
Sensor Acelerómetro	99%	$12 \mu Ah$	0%	-	1%	41.1 mAh
Sensor Reed	99%	$1.34 \mu Ah$	0%	-	1%	41.1 mAh
Actuador Luz	89%	$1.34 \mu Ah$	10%	21.6 mAh	1%	41.1 mAh
Actuador Enchufe	89%	$1.34 \mu Ah$	10%	21.6 mAh	1%	41.1 mAh
Actuador Motor	89%	$1.34 \mu Ah$	10%	21.6 mAh	1%	41.1 mAh
Cerradura Electrónica	98%	$12 \mu Ah$	0%	-	2%	41.1 mAh
Repetidor	89%	$1.34 \mu Ah$	10%	21.6 mAh	1%	41.1 mAh

Capítulo 5

Implementación

5.1. Introducción

En la siguiente sección se describen las tecnologías, herramientas y entorno de desarrollo que se han utilizado para realizar el firmware[10] de los dispositivos en la fase de implementación.

5.2. Tecnologías

5.2.1. BLE-STACK 1.4.0

El BLE-STACK es la librería que proporciona Texas Instrument para crear el firmware para el SOC[23] cc2541. La versión que se ha utilizado en la creación de todo el firmware es la 1.4.0. Actualmente hay una actualización disponible que es la versión 1.4.1. Los nuevos SOC cc2640 que soportan BLE 4.1 son programados con la librería BLE-STACK 2.0.

El documento de referencia que se utiliza es el Software Developer's Guide v1.3.2 [11]. La arquitectura que emplea el protocolo BLE Stack se basa en la separación entre el controller y el host. En la tabla 5.1 se muestra la arquitectura controller y host.

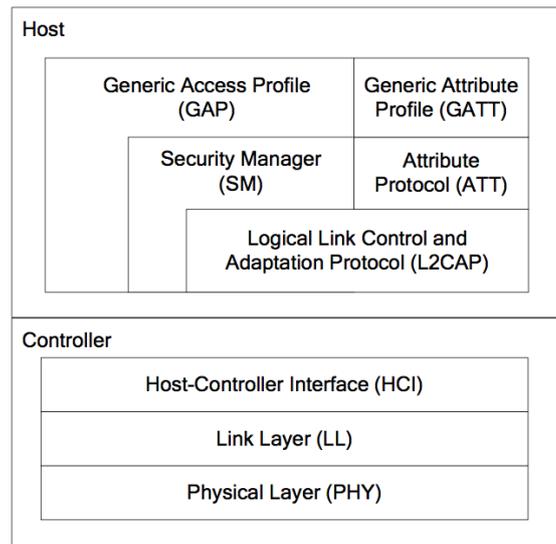


Figura 5.1: BLE Protocol Stack Basics

La parte Host tiene cinco capas, Generic Access Profile (GAP), Generic Attribute Profile (GATT), Security Manager (SM), Attribute Protocol(ATT) y Logical Link Control and Adaptation Protocol(L2CAP). Hay una sexta capa la Host Controller Interface (HCI) parte Host.

Capa	Descripción
GAP	Esta capa interactúa directamente con la aplicación y / o los perfiles, se ocupa del escaneo de dispositivos y de los servicios relacionados con la conexión al dispositivo.
GATT	Provee de una serie de servicios para el uso de GAP. Esta capa especifica la estructura de los perfiles.
SM	Define los métodos para realizar el Pairing y la distribución de claves.
ATT	Provee al cliente del dispositivo permisos de lectura o escritura a unos atributos determinados.
L2CAP	Proporciona servicios de encapsulación a las capas superiores, lo que permite la comunicación lógica de extremo a extremo.
HCI parte host	Proporciona un medio de comunicación entre el Host y el Controller a través de una interfaz estandarizada. Esta capa puede ser implementada a través de un API o por una interfaz de hardware como UART, I2C, SPI o USB.

La parte Controller tiene tres capas Host Controller Interface (HCI) parte Controller, Link Layer (LL) y Physical Layer (PHY).

Capa	Descripción
HCI parte Controller	Proporciona un medio de comunicación entre el Host y el Controller a través de una interfaz estandarizada. Esta capa puede ser implementada a través de un API o por una interfaz de hardware como UART, I2C, SPI o USB.
LL	Controla el estado RF del dispositivo en uno de los 5 estados posibles: Standby, advertising, scanning, initiating, or connected.
PHY	La capa física de más bajo nivel a la que podemos acceder permite escoger frecuencias fuera de la banda de 2.4

5.2.2. Accelerometer KXCJ9

El documento de referencia que se utiliza es el KXCJ9-1008 [13]. El chip se comunica con el SOC cc2541 mediante I2C.

Para la comunicación I2C hay que asignar una dirección al dispositivo. El pin ADDR conectado a GND da la dirección 0001110 y a VCC 0001111. El chip BLE

asume el rol de Master y el chip KXCJ9 el de esclavo. La comunicación mediante I2C siempre la inicia el Master.

El chip dispone de 25 registros accesibles por el usuario. Mediante estos registros se configura el chip y se realizan las lecturas de los datos.

En la tabla 5.1 se muestran los registros.

Tabla 5.1: KXCJ9 Register Map

Register Name	Type Read/Write	I2C Address	
		Hex	Binary
Kionix Reserved	-	0x00 – 0x05	-
XOUT_L	R	0x06	0000 0110
XOUT_H	R	0x07	0000 0111
YOUT_L	R	0x08	0000 1000
YOUT_H	R	0x09	0000 1001
ZOUT_L	R	0x0A	0000 1010
ZOUT_H	R	0x0B	0000 1011
DCST_RESP	R	0x0C	0000 1100
Kionix Reserved	-	0x0D – 0x0E	-
WHO_AM_I	R	0x0F	0000 1111
Kionix Reserved	-	0x10 – 0x15	-
INT_SOURCE1	R	0x16	0001 0110
INT_SOURCE2	R	0x17	0001 0111
STATUS_REG	R	0x18	0001 1000
Kionix Reserved	-	0x19	-
INT_REL	R	0x1A	0001 1010
CTRL_REG1*	R/W	0x1B	0001 1011
Kionix Reserved	-	0x1C	0001 1100
CTRL_REG2*	R/W	0x1D	0001 1101
INT_CTRL_REG1*	R/W	0x1E	0001 1110
INT_CTRL_REG2*	R/W	0x1F	0001 1111
Kionix Reserved	-	0x20	0010 0000
DATA_CTRL_REG*	R/W	0x21	0010 0001
Kionix Reserved	-	0x22 – 0x28	-
WAKEUP_TIMER*	R/W	0x29	0010 1001
Kionix Reserved	-	0x2A – 0x39	-
SELF_TEST	R/W	0x3A	0011 1010
Kionix Reserved	-	0x3B – 0x69	-
WAKUP_THRESHOLD*	R/W	0x6A	0110 1010

En la tabla 5.2 se muestra los dos registros que contienen la última lectura de aceleración en el eje X.

Tabla 5.2: X-axis registers

XOUT_L

X-axis accelerometer output least significant byte

R	R	R	R	R	R	R	R
XOUTD3	XOUTD2	XOUTD1	XOUTD0	X	X	X	X
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
I ² C Address: 0x06h							

XOUT_H

X-axis accelerometer output most significant byte

R	R	R	R	R	R	R	R
XOUTD11	XOUTD10	XOUTD9	XOUTD8	XOUTD7	XOUTD6	XOUTD5	XOUTD4
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
I ² C Address: 0x07h							

5.2.3. Temperature and Humidity sensor HDC1000

El documento de referencia que se utiliza es el SNAS643A [10]. El chip se comunica con el SOC cc2541 mediante I2C.

Para la comunicación I2C hay que asignar una dirección al dispositivo. Este chip tiene 2 pines para la dirección ADR0 y ADR1, 4 posibles direcciones.

El chip dispone de 8 registros accesibles por el usuario. Mediante estos registros se configura el chip y se realizan las lecturas de los datos.

En la tabla 5.3 se muestran los registros.

Tabla 5.3: HDC1000 Register Map

Pointer	Name	Reset value	Description
0x00	Temperature	0x0000	Temperature measurement output
0x01	Humidity	0x0000	Relative Humidity measurement output
0x02	Configuration	0x1000	HDC1000 configuration and status
0xFB	Serial ID	device dependent	First 2 bytes of the serial ID of the part
0xFC	Serial ID	device dependent	Mid 2 bytes of the serial ID of the part
0xFD	Serial ID	device dependent	Last byte bit of the serial ID of the part
0xFE	Manufacturer ID	0x5449	ID of Texas Instruments
0xFF	Device ID	0x1000	ID of HDC1000 device

En la tabla 5.2 se muestra como se realiza la comunicación mediante I2C para realizar una petición de lectura. En este caso la lectura todavía no está preparada y el Slave realiza un NACK.

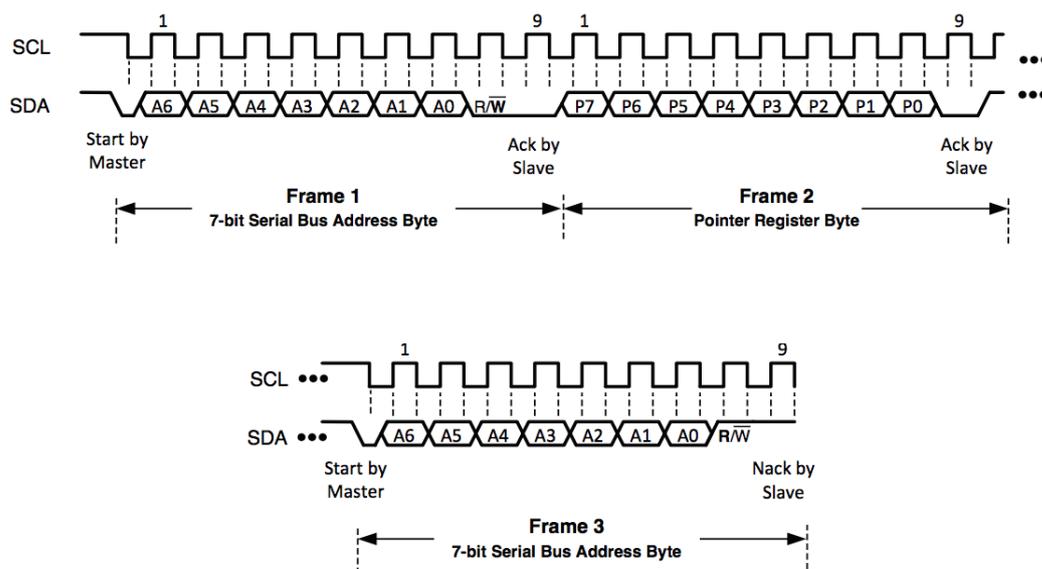


Figura 5.2: Read Humidity/Temperature Measurement

5.2.4. Hall Effect-Based linear Current Sensor ACS712

El documento de referencia que se utiliza es el datasheet ACS712 [4]. Este componente mide el voltaje de corriente que circula entre IP+ y IP- del pinout

tabla 2.6. Mediante el efecto Hall[11] se obtiene un voltaje entre -5 y 5v que sale por el pin ViOut. Este pin se lee mediante un conversor analógico digital del módulo BLE. Se normaliza el valor obtenido y se convierte a mAh.

Para obtener el consumo en corriente alterna se realiza el mismo proceso pero aplicando la raíz media cuadrática a las lecturas obtenidas durante 20 ms para el voltaje de 220 a 50 Hz y 16'67 ms para el voltaje de 110 a 60 Hz.

5.3. Entorno de desarrollo

5.3.1. IAR Embedded Workbench IDE

El SOC cc2541 utiliza el 8051 Microcontroller Core de IAR Systems. El entorno de desarrollo que se utiliza para esta arquitectura es IAR Embedded Workbench IDE. En la imagen 5.3 se muestra el entorno de desarrollo con la función que se utiliza para calcular el consumo de la corriente alterna.

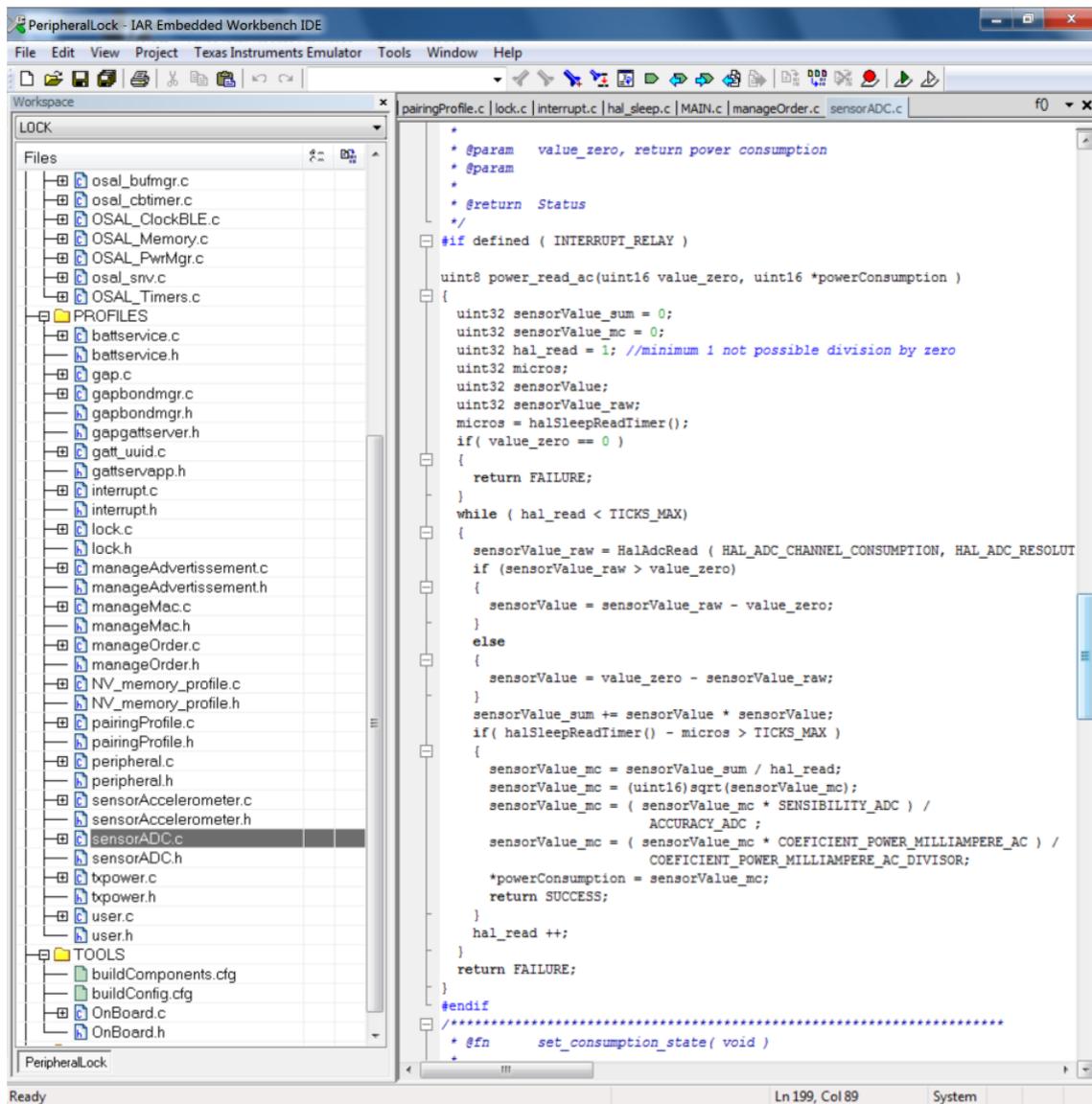


Figura 5.3: IAR Embedded Workbench IDE

Este entorno permite compilar en C y C++ para el 8051 y debugger mediante el CC-debugger de Texas Instrument.

La versión que se ha utilizado para desarrollar el firmware de todos los dispositivos BLE es la 9.10.

5.3.2. Control de versiones

Para trabajar en equipo se usa un sistema de control de versiones. El sistema utilizado es GitLab[7]. Es un sistema que se basa en repositorio git y es open source.

5.4. Herramientas

5.4.1. HCI

El sistema operativo Linux tiene una serie de utilidades HCI para poder utilizar Bluetooth Low Energy y realizar escaneos. El comando Hciconfig permite habilitar el bluetooth. El comando Hcitol es la utilidad que permite escanear.

5.4.2. GATT

El sistema operativo Linux tiene una serie de utilidades GATT que permiten realizar una conexión por pairing a un dispositivo BLE, buscar los servicios y leer o escribir en las características. Con el comando Hatttool se realizan todas estas operaciones.

5.4.3. Osciloscopio

Se utiliza un osciloscopio como elemento de apoyo para comprobar las comunicaciones I2C y UART. Para monitorizar los I/O pins. En la medición de los consumos de cada dispositivo. El modelo utilizado es PicoScope 3203D de ancho de banda 50 Mhz, 2 canales, MSO y memoria de 64 MS. Este osciloscopio permite decodificar I2C, UART, FlexRAY, I2S y USB protocols

5.4.4. Multimeter

Se utiliza un multímetro con precisión de micro amperios. Se utiliza para comprobar los circuitos electrónicos, los I/O pins. En la medición de los consumos de cada dispositivo. El modelo utilizado es FLUKE 287.

5.5. Descripción de la implementación

El sistema domótico está dividido en 4 proyectos realizados con el entorno de desarrollo IAR Embedded Workbench IDE. Los proyectos se han programado en C y con una arquitectura de 8 bits, 256KB de memoria Flash y 8KB de RAM.

Cada proyecto está estructurado conforme a la siguiente tabla.

Tipo	Descripción
APP	Fuentes de la aplicación y cabeceras.
HAL	Capa de abstracción del hardware y cabeceras
INCLUDE	Cabeceras BLE Stack API
LIB	Librerías Stack BLE
NPI	La capa de transporte entre HCI y UART
OSAL	Capa de abstracción del sistema operativo
PROFILES	Código fuente y cabeceras de los roles cliente GAP, perfiles GATT, sensores y actuadores.
TOOLS	Archivos de configuración
OUTPUT	Archivos generados para la compilación y binarios.

Los proyectos del tipo peripheral constan de varias partes que se detallan en la siguiente tabla.

Tipo	Descripción
Initilization	Se inicializa los parámetros y características del rol cliente GAP, parámetros GATT cliente, y OSAL.
Periodic Event	Se definen todos los eventos de control.
Peripheral State Notification Callback	Se controla el estado de las conexiones que le realizan al dispositivo.
I/O Initilization	Inicialización de entradas y salidas de los puertos.
Interrupts	Control de las interrupciones de las entradas y salidas de los puertos.

Los proyectos del tipo central constan de varias partes que se detallan en la siguiente tabla.

Capa	Descripción
Initilization	Se inicializa los parámetros y características del rol servidor GAP, parámetros GATT servidor y OSAL
Event Processing	Enventos de proceso de OSAL y GATT.
Callbacks	Callbacks de GAP
Service Discovery	Control de descubrimiento de dispositivos.

Capítulo 6

Evaluación

En esta sección se valida el sistema de comunicación BLE, el sistema de posicionamiento interior y el consumo por dispositivo.

6.1. Validación del sistema de comunicación BLE

6.1.1. Prueba de distancia máxima

Para determinar la distancia máxima a la que se puede colocar un dispositivo del Hub se analiza la pérdida de paquetes que se produce en la comunicación mediante advertisement. Las pruebas consisten en medir el ratio de paquetes recibidos en relación con la distancia. La comunicación mediante advertisement se realiza a máxima potencia de transmisión y en ráfagas de 10 paquetes. En la gráfica 3.3 se evidencia que a una distancia de 50 metros sin obstáculos llega el 30 % de los paquetes enviados, es decir al menos llegarán tres paquetes de los 10 enviados. Con la llegada de un paquete es suficiente para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de comunicaciones. Con una distancia máxima de 50 metros el sistema de comunicaciones por advertisement es 100 % libre de errores de comunicación.

La distancia máxima a la que se puede colocar un dispositivo móvil de un dispositivo doméstico, viene determinada por el modelo del dispositivo móvil. De las pruebas que se han realizado, los dispositivos con IOS tienen un alcance muy superior a los dispositivos Android. Como cada dispositivo móvil se comporta de una manera distinta no se puede establecer una distancia máxima. La comunicación mediante pairing entre el Hub y la cerradura electrónica, tiene un alcance máximo de 45 metros. En la gráfica 3.3 se evidencia que a una distancia de 45 metros llega el 50 % de los paquetes sean mediante pairing o advertisement. En la comunicación por pairing se envía un paquete cada 40 ms en el peor de los casos y se soporta la pérdida de paquetes. A esta distancia de 45 metros la comunicación está 100 % garantizada.

6.1.2. Prueba de saturación canales

Se ha realizado la prueba de saturación de canales aumentando la carga de 5 en 5 los dispositivos emitiendo. En la gráfica 3.4 se somete a estrés el sistema introduciendo una carga final de 50 dispositivos emitiendo a potencia máxima. Aún en este escenario poco probable se garantiza una tasa del 20 % en los paquetes recibidos. Con estos resultados la comunicación con advertisement es 100 % libre de errores de comunicación. En la comunicación mediante pairing se ralentiza debido a la pérdida de paquetes. La comunicación está 100 % garantizada en este escenario poco probable.

6.1.3. Test de velocidad

La velocidad en la respuesta de los dispositivos está determinada por el tipo de comunicación pairing o advertisement y por el número de mensajes necesarios a transmitir para realizar una acción o aviso concreto.

En la siguiente tabla se resumen los tiempos de respuesta de todas las acciones disponibles. Se han establecido tres periodos de tiempo: tiempo de validación, ejecución y confirmación. El tiempo de validación es el tiempo transcurrido desde que el dispositivo móvil envía la acción hasta que llega al dispositivo destino. El tiempo de ejecución es la duración de la acción a realizar por el dispositivo. El tiempo de confirmación es el tiempo transcurrido desde que el dispositivo doméstico envía la confirmación de la acción hasta que llega al dispositivo móvil.

Acción	Tiempo validación	Tiempo ejecución	Tiempo confirmación
Gestión cerradura	800 ms	2000 ms	50 ms
Gestión alumbrado	80 ms	20 ms	340 ms
Gestión enchufes	80 ms	20 ms	340 ms
Gestión motor	80 ms	20 ms	340 ms
Validación dispositivo	2500 ms	150 ms	50 ms
Crear usuario	2000 ms	150 ms	50 ms
Configurar WI-FI	5000 ms	150 ms	50 ms

En la siguiente tabla se resumen los tiempos de respuesta de todas los avisos disponibles.

Aviso	Tiempo validación
Control Acceso	80 ms
Acelerómetro	80 ms
Temperatura y humedad	80 ms
Nivel batería	80 ms

6.2. Validación del sistema de posicionamiento interior

La validación del sistema de posicionamiento interior se realiza midiendo el ratio de acierto mediante dos pruebas concretas.

La primera prueba consiste en colocar los dispositivos de localización a una misma distancia del dispositivo móvil con distintas potencias de emisión y se comprueba si el sistema de localización acierta. En la figura 6.1 se ilustra la primera prueba.

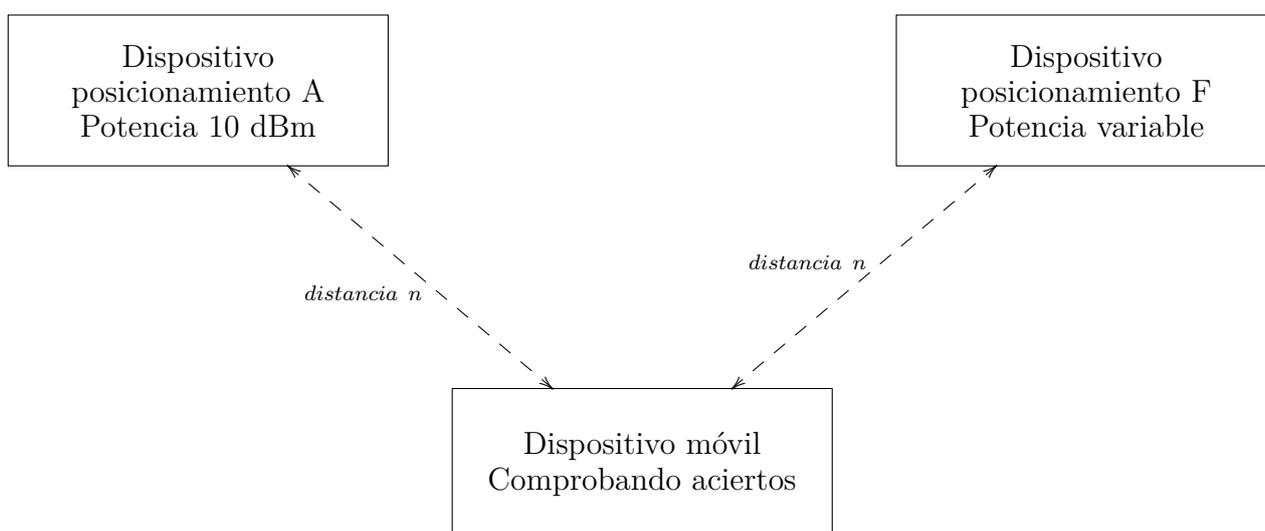


Figura 6.1: Diagrama prueba localización: potencia de emisión

En la gráfica 6.2 se compara el dispositivo etiquetado como A emite a 10 dBm con el F que emite a menor potencia. El dispositivo móvil obtiene una tasa de acierto superior al 95 % para una potencia entre -23 dBm hasta -5 dBm del dispositivo F. Para 0 dBm la tasa de acierto es superior al 85 % y para 5 dBm es superior al 73 %. A mayor diferencia de potencia entre dos dispositivos de localización aumenta la tasa de acierto.

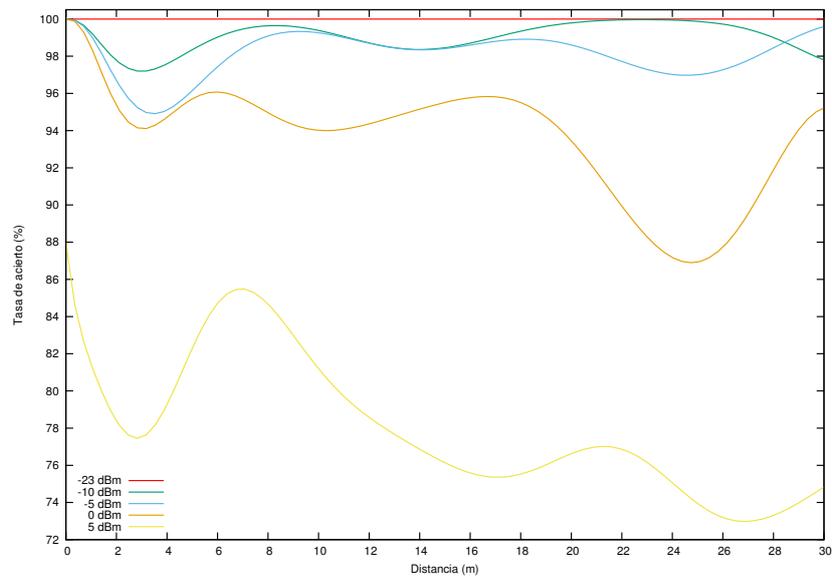


Figura 6.2: Tasa de acierto vs distancia dispositivo móvil: distintas potencias de emisión del dispositivo F

La segunda prueba consiste en colocar los dispositivos de localización a distintas distancias del dispositivo móvil con la misma potencia de emisión y se comprueba si el sistema de localización acierta. En la figura 6.3 se ilustra la segunda prueba.

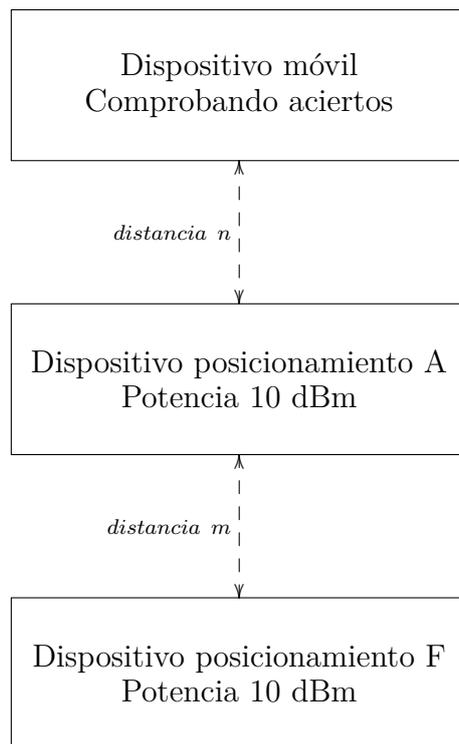


Figura 6.3: Diagrama prueba localización: 2 dispositivos a distintas distancias y misma potencia de emisión

En la gráfica 6.4 se compara el dispositivo etiquetado como A que está a una distancia menor que el dispositivo F. Los dos dispositivos emiten a la misma potencia de emisión 10 dBm. El dispositivo móvil obtiene una tasa de acierto superior al 90 % para una distancia de 2 m entre el dispositivo A y F, y una distancia de 2 m entre el dispositivo móvil y el A. A mayor distancia entre dos dispositivos de localización aumenta la tasa de acierto.

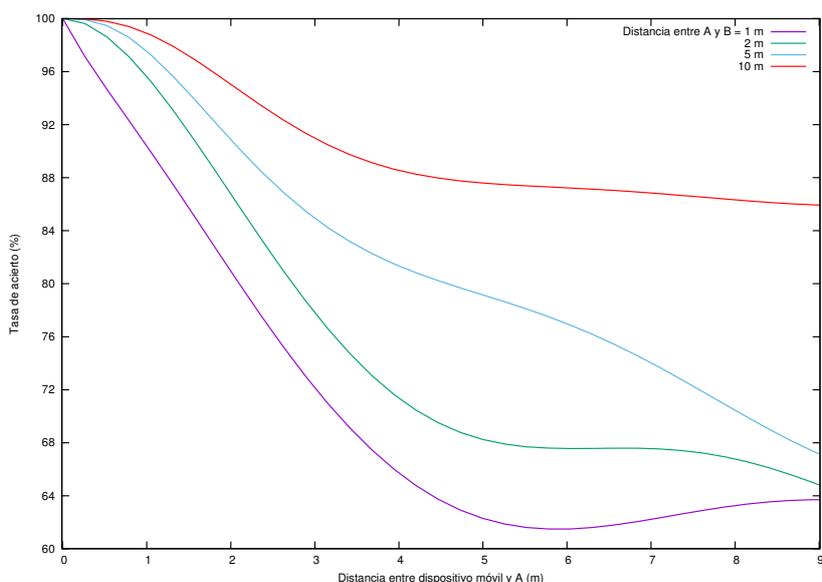


Figura 6.4: Tasa de acierto vs distancia dispositivo móvil: distintas distancias dispositivo A y F

6.3. Validación del consumo por dispositivo

Para validar el consumo de cada dispositivo se utilizan dos instrumentos: el osciloscopio y el amperímetro. Con el osciloscopio se miden las señales eléctricas que tienen variación en el tiempo y con el amperímetro los consumos constantes. Para calcular el consumo con el osciloscopio se ha medido a través de una resistencia de 10 ohmios. Las gráficas están expresadas en mA y ms. El consumo se obtiene al dividir el voltaje por la resistencia y se expresa en mAh.

6.3.1. Consumo real Hub parte BLE

En la gráfica 6.5 se mide el consumo en modo RX. El Hub permanece 30 ms en modo reposo y 30 ms en modo RX.

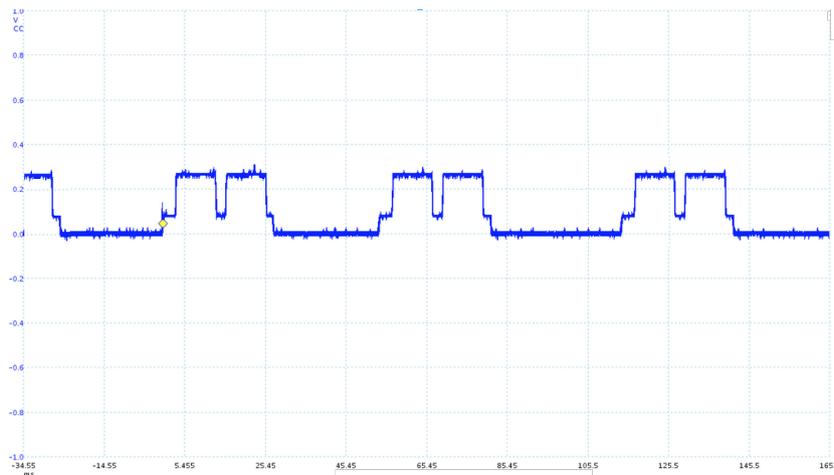


Figura 6.5: Consumo Hub Modo RX

En la siguiente tabla se calcula el consumo.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Peso	Consumo (mAh)
RX	26.4	30	50 %	13.2
Sleep	1.34 μA	30	50 %	0,675 μAh
Total				13.2

En la gráfica 6.6 mide el consumo en modo TX.

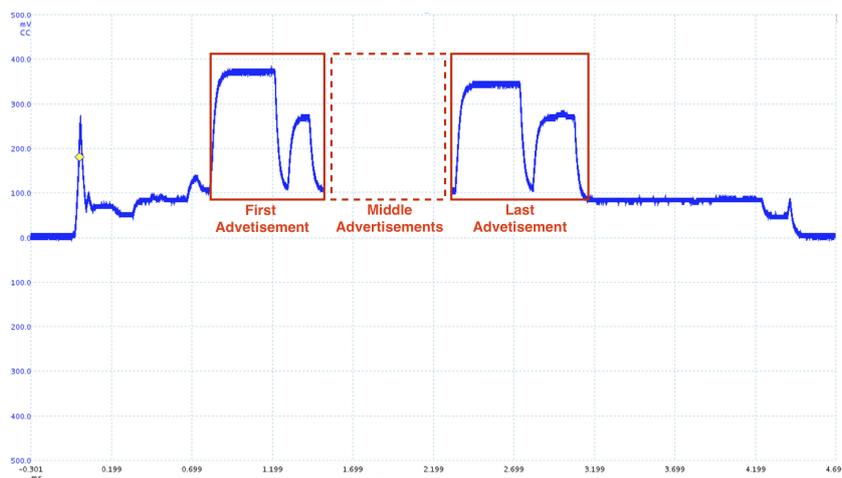


Figura 6.6: Consumo Hub Modo TX

En la siguiente tabla se calcula el consumo en modo RX.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Repeticiones/ Mensaje	Mensajes / Hora	Consumo (mAh)
Wake Up	10	0.750	10	1000	0.0208
TX	37.7	0.55	10	1000	0.0575
RX	26.4	0.37	10	1000	0.0271
Processing	10	1.2	10	1000	0.0333
Total					0.1387

El Hub enviando 1000 mensajes por hora y estando el máximo tiempo en Modo RX tiene un consumo de 13.3 mAh.

6.3.2. Consumo real sensor temperatura y humedad

En la gráfica 6.7 se mide el consumo del BLE cuando está realizando una lectura del sensor de temperatura y humedad mediante I2C.

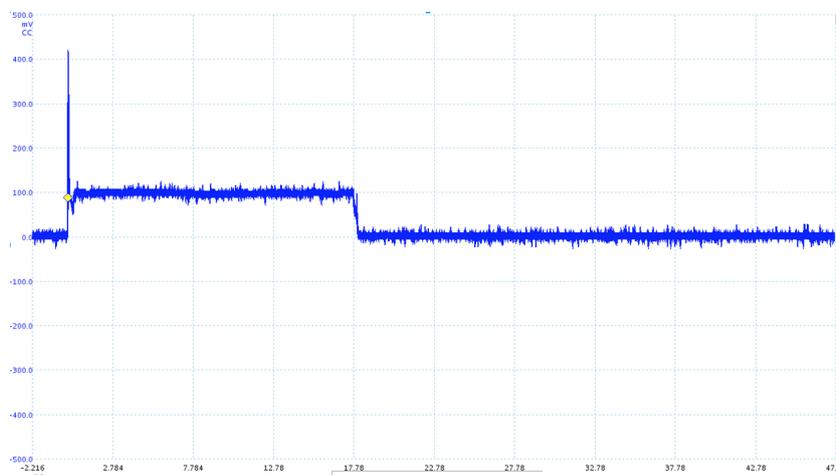


Figura 6.7: Consumo Sensor Temperatura y Humedad Modo Lectura

En la siguiente tabla se calcula el consumo en modo lectura del sensor.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Peso	Consumo (mAh)
Processing Read	10	17.80	0.02 %	0.0356
Sleep	1.34 μA	30	99.98 %	1.34 μAh
Total				0.0356

En la gráfica 6.8 se mide el consumo en modo TX.

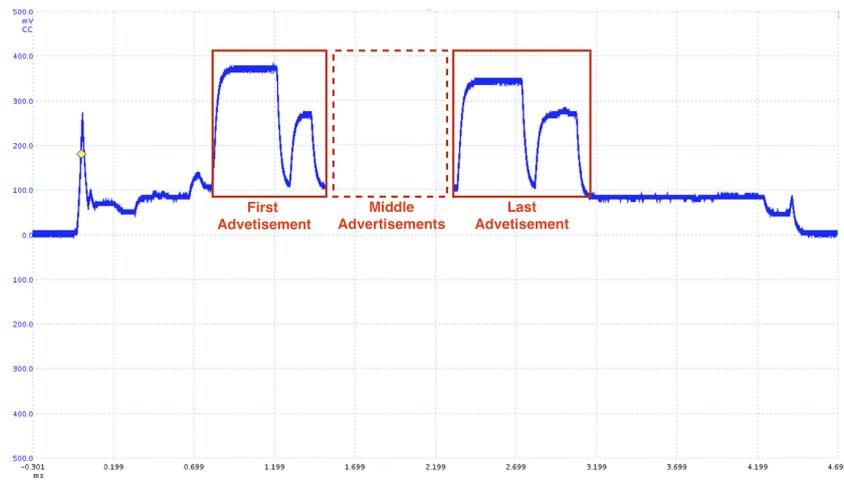


Figura 6.8: Sensor Temperatura y Humedad Modo TX

En la siguiente tabla se calcula el consumo en modo TX.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Repeticiones/ Mensaje	Mensajes / Hora	Consumo (mAh)
Wake Up	10	0.750	10	10	0.000208
TX	37.7	0.55	10	10	0.000575
RX	26.4	0.37	10	10	0.000271
Processing	10	1.2	10	10	0.000333
Total					0.001387

En la gráfica 6.9 se mide el consumo cuando el BLE está modo locating emitiendo el advertisement y el scan-response cada 1000 ms.

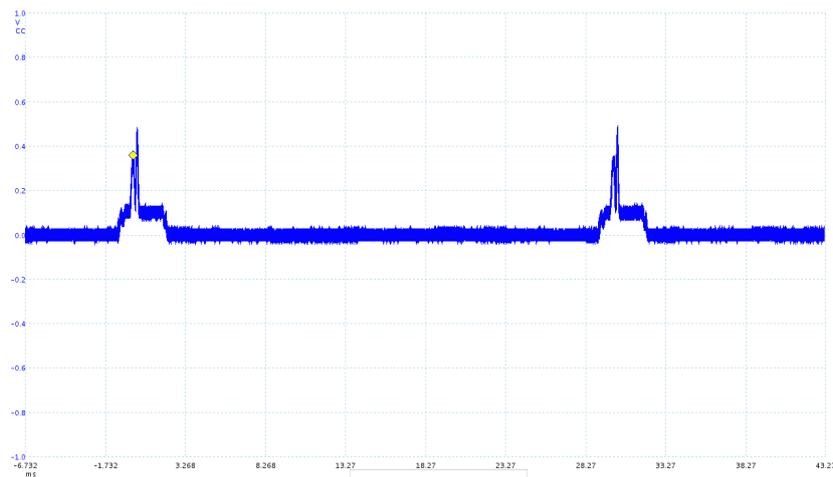


Figura 6.9: Sensor Temperatura y Humedad Modo Locating

En la siguiente tabla se calcula el consumo en modo Locating.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Peso	Consumo (mAh)
Processing Advertisement	10	5	0.10 %	0.05
Processing Scan-Response	10	5	0.10 %	0.05
Processing TX	44.5	0.40	0.2 %	0.0356
Processing RX	26.4	0.55	0.2 %	0.02904
Sleep	1.34 μA	30	99.50 %	1.34 μAh
Total				0.16464

En la gráfica 6.10 se mide el consumo del dispositivo BLE cuando un dispositivo le está realizando una conexión mediante pairing.

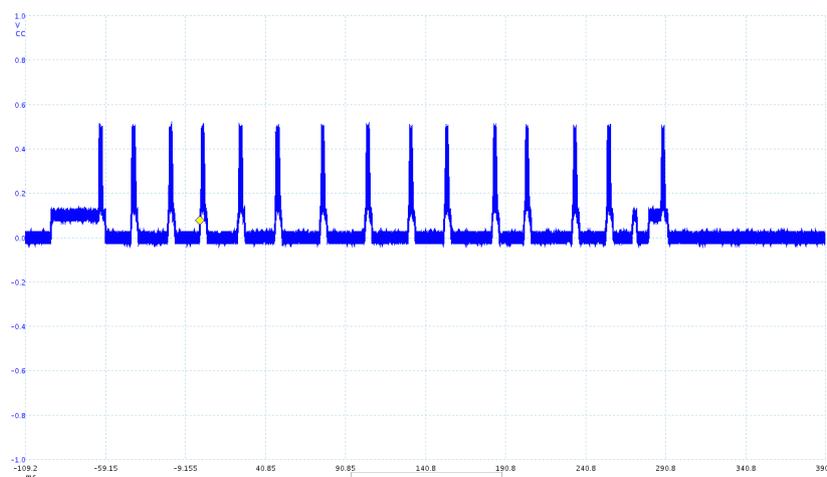


Figura 6.10: Sensor Temperatura y Humedad Modo Pairing

En la siguiente tabla se calcula el consumo en modo pairing.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Repeticiones Mensaje	Mensajes / Hora	Consumo (mAh)
Pairing	44.5	0.4	15	10	0.000742
Total					0.000742

El Sensor Temperatura, humedad y locating estimando que envía 10 mensajes hora, recibe 10 conexiones mediante pairing hora y emite 1 advertisement y 1 scan-response cada 1000 ms, tiene un consumo de 0.2 mAh. Con una batería de 620 mAh al 90 % de rendimiento, el dispositivo BLE tendría 2790 horas de autonomía.

6.3.3. Consumo real sensor acelerómetro

En la gráfica 6.11 se analiza el consumo del sensor acelerómetro.

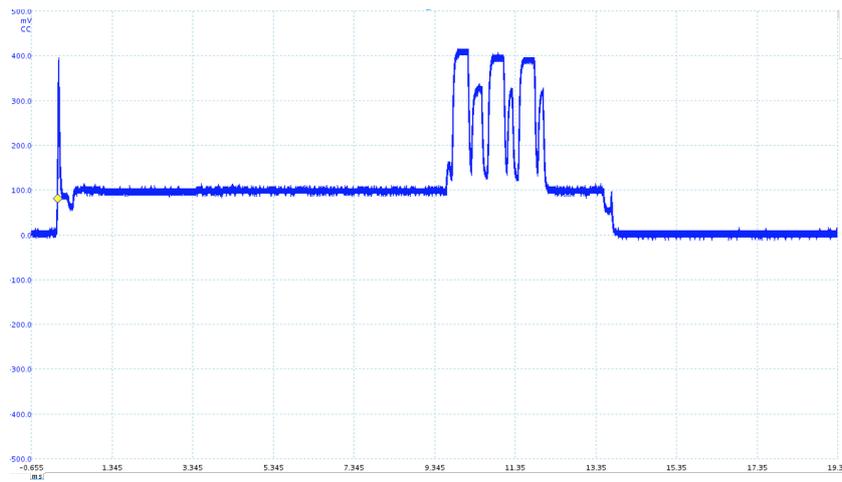


Figura 6.11: Consumo Sensor Acelerómetro

En la siguiente tabla se detalla el consumo en modo TX.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Repeticiones Mensaje	Mensajes / Hora	Consumo (mAh)
Wake Up	10	0.750	10	10	0.000208
TX	37.7	0.55	10	10	0.000575
RX	26.4	0.37	10	10	0.000271
Processing	10	1.2	10	10	0.000333
Total					0.001387

El Sensor Acelerómetro enviando 10 mensajes por hora y estando el máximo tiempo en Modo Reposo tiene un consumo de $13.87 \mu A$. Con una batería de 620 mAh al 90 % de rendimiento, el dispositivo BLE tendría 40230 horas de autonomía.

6.3.4. Consumo real sensor reed

En la gráfica 6.12 se mide el consumo del sensor Reed.

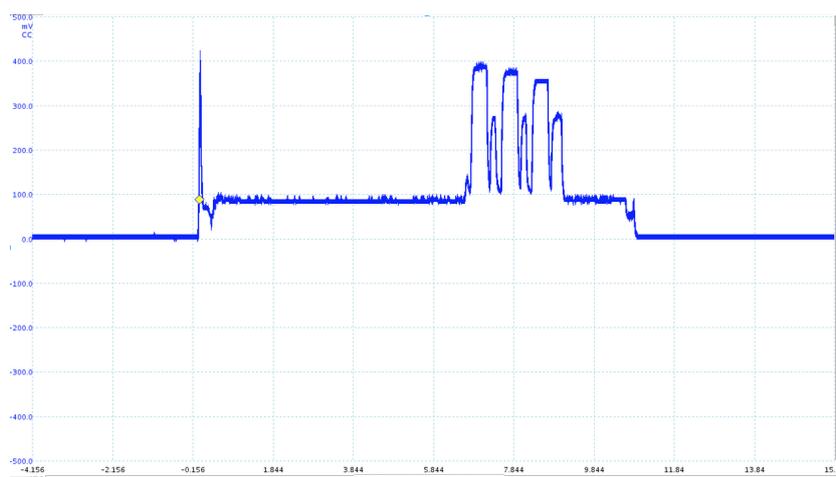


Figura 6.12: Consumo Sensor Reed

En la siguiente tabla se detalla el consumo en modo TX.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Repeticiones Mensaje	Mensajes / Hora	Consumo (mAh)
Wake Up	10	0.750	10	10	0.000208
TX	37.7	0.55	10	10	0.000575
RX	26.4	0.37	10	10	0.000271
Processing	10	1.2	10	10	0.000333
Total					0.001387

El Sensor Reed enviando 10 mensajes por hora y estando el máximo tiempo en Modo TX tiene un consumo de $1.387 \mu A$ y en modo reposo un consumo de $1.24 \mu A$. Con una batería de 620 mAh al 90% de rendimiento, el dispositivo BLE tendría 212409 horas de autonomía.

6.3.5. Consumo real actuadores luz, enchufe y repetidor

En la gráfica 6.13 se mide el consumo del BLE que se utiliza para los actuadores y para el repetidor

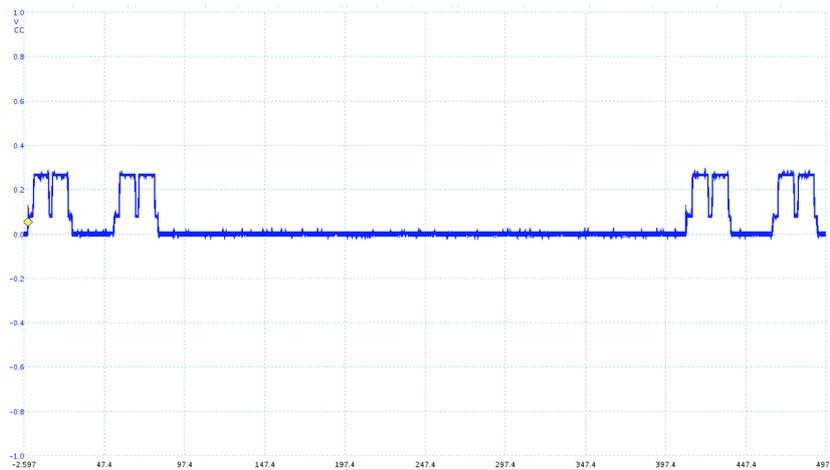


Figura 6.13: Consumo Actuadores y Repetidor

En la siguiente tabla se calcula el consumo en modo RX.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Peso	Consumo (mAh)
RX	26.4	30	10 %	2.64
Sleep	1.34 μA	180	90 %	1.206 μAh
Total				2.64

Los dispositivo tipo repetidor tiene un consumo de 2.64 mAh. El modo TX no es representativo para un tráfico estimado de 20 mensajes cada hora.

6.3.6. Consumo real cerradura electrónica

En la gráfica 6.14 se mide el consumo de la cerradura electrónica.

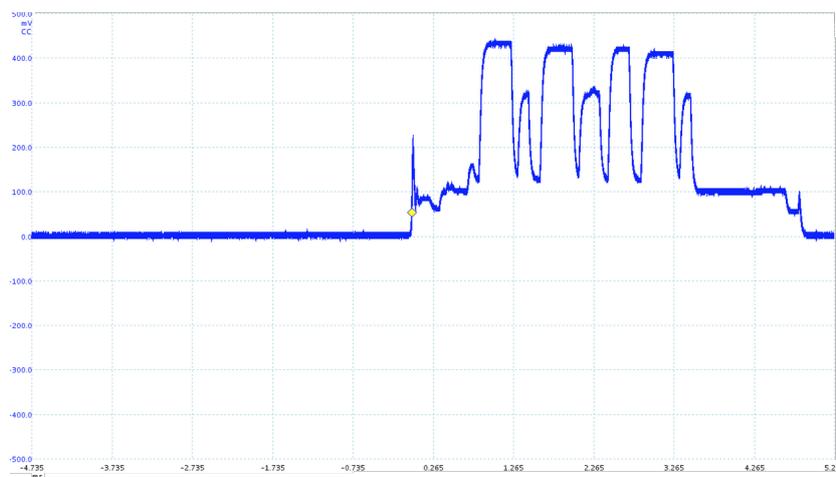


Figura 6.14: Consumo Cerradura Electrónica

En la siguiente tabla se detalla el consumo en modo TX.

Modo	Intensidad (mA)	Periodo (ms)	Repeticiones Mensaje	Mensajes / Hora	Consumo (mAh)
Wake Up	10	0.750	1	10	0.0000208
TX	37.7	0.55	1	10	0.0000575
RX	26.4	0.37	1	10	0.0000271
Processing	10	5	1	10	0.00015
Total					0.00028

El consumo total de la cerradura electrónica es el mismo que el del sensor temperatura y humedad. En el modo TX la cerradura está más tiempo procesando pero esta parte no es representativa.

Capítulo 7

Conclusiones

7.1. Resumen

La elaboración de este proyecto ha necesitado de un conjunto de funcionalidades específico para cada uno de los requisitos que conforman el sistema domótico que se ha desarrollado. Toda la estructura se ha articulado alrededor de un sistema de transmisión de datos BLE mediante dos arquitecturas: comunicación centralizada en el Hub y comunicación directa entre los distintos dispositivos domóticos y dispositivos móviles.

Se eligió BLE al ser la única tecnología de comunicación soportada por los dispositivos móviles que permitía posicionar en interiores de manera fiable, rápida y bajo consumo. El resto de tecnologías no se podían utilizar directamente, tenían consumos elevados que obligaban a utilizar fuentes de alimentación, la latencia no era admisible por el usuario final y la tasa de error era demasiado alta.

Una vez diseñado el sistema domótico se realizaron una serie de pruebas y tests para validarlo y poder determinar sus límites de distancia máxima para las comunicaciones BLE, el número de dispositivos simultáneos, la latencia del sistema y el consumo real de cada dispositivo.

7.2. Valoración

El sistema de comunicación BLE desarrollado ha sido eficiente en cuanto al consumo, rápido y fiable en la transmisión de datos, y con niveles de seguridad adecuados en el cifrado.

El sistema de localización Indoor ha tenido una tasa de acierto alta, que ha garantizado posicionar de manera fluida minimizando los errores de las zonas de incertidumbre.

En cuanto a los consumos por dispositivo se han obtenido unos excelentes resultados, dando lugar a un sistema domótico energéticamente eficiente.

Un proyecto de esta envergadura requiere de un equipo totalmente involucrado que consiga materializar todas y cada una de las ideas iniciales en el producto final. El proyecto empezó en Julio de 2014 realizando los primeros tests de comunicación BLE entre observer y broadcast. Se presentó el sistema domótico en Las Vegas CES 2015 la parte de comunicación mediante advertisement. Se empezó a fabricar el 1 de Julio de 2015 y llevaban de serie en su firmware la parte de comunicación con pairing que se desarrolló posteriormente.

El sistema domótico desarrollado está en condiciones de empezar a introducirse en el mercado y de obtener las certificaciones requeridas para tal propósito.

7.3. Trabajo futuro

El proyecto no ha hecho más que empezar, actualmente se están diseñando un sensor de inundaciones, sensor de humo, sensor de humedad de la tierra y una pulsera para el posicionamiento interior. Se está trabajando con un Hub de tamaño reducido y coste menor que se utilice como repetidor pero con acceso a internet. Para el videoportero se están terminando de desarrollar el teclado con tecnología capacitiva Touch Sense y la integración de una pantalla LCD con comunicación mediante I2C.

A nivel industrial se están desarrollando todos los actuadores para soportar cargas mayores y nuevas funcionalidades.

Apéndice A

Definiciones, siglas y abreviaciones

En esta subsección se definirán todos los términos, siglas y abreviaturas utilizadas en la especificación de requisitos.

1. **Advertising:** Es un paquete de datos utilizado en BLE[5] que contiene información para el dispositivo receptor.
2. **Android:** Es un sistema operativo de móvil creado y desarrollado por Google.
3. **Scan-Response:** Es un paquete de datos utilizado en BLE[5] que contiene información acerca de los servicios del dispositivo.
4. **API:** Application programming interface, interfaz de programación de aplicaciones. Es el conjunto de funciones y procedimientos que ofrece cierta biblioteca para ser utilizado por otro software como una capa de abstracción.
5. **Bluetooth Low Energy(BLE):** Sigue la especificación de Bluetooth 4.0 . Es una especificación industrial para redes inalámbricas de área personal que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de los 2,4 GHz. [5]
6. **Bonding:** Intercambio de claves que realizan dos dispositivos antes de realizar el pairing y luego utilizan para encriptar la comunicación BLE durante el intercambio de paquetes.
7. **Datasheet:** Es un documento que resume el funcionamiento y otras características de un componente con el suficiente detalle para ser utilizado por técnico especializado.
8. **Domótica:** Se llama domótica al conjunto de sistemas capaces de automatizar una vivienda, aportando servicios de gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación, y que pueden estar integrados por medio de redes interiores y exteriores de comunicación, cableadas o inalámbricas, y cuyo control se realiza desde dentro y fuera de la vivienda.
9. **ERS:** Especificación de requisitos.

10. **Firmware:** Es un conjunto de instrucciones de un programa informático que se encuentra registrado en una determinada memoria. Este programa establece la lógica de un circuito electrónico de un dispositivo.
11. **Efecto Hall:** Se conoce como efecto Hall a la aparición, en el interior de un conductor por el que circula una corriente, en presencia de un campo magnético perpendicular al movimiento de las cargas, de un campo eléctrico por separación de cargas, que también es perpendicular al movimiento de las cargas y al campo magnético aplicado y que se denomina campo Hall.
12. **Hub:** Es el dispositivo del sistema domótico que se conecta mediante internet a un servidor y a los demás dispositivos del sistema domótico inalámbricamente. Su propósito es la de comunicar los distintos domóticos con los dispositivos móviles a través de un servidor.
13. **ibeacon:** Es un dispositivo que se comunica mediante BLE y emite un paquete con un formato especial a una frecuencia determinada y se utiliza para posicionar en interiores.
14. **Inter-Integrated Circuit(I2C):** Es un bus de comunicaciones en serie que transmite los datos por la línea SDA y la señal de reloj por la línea SCL.
15. **IOS:** Es un sistema operativo de móvil creado y desarrollado por Apple.
16. **Indoor Positioning System(IPS):** Es una red de dispositivos utilizados para localizar inalámbricamente objetos o personas dentro de un sitio cerrado. Se basa en la utilización de nodos con una posición conocida, actuando como baliza.
17. **Media access control(MAC):** Es un identificador de 6 bloques hexadecimales que corresponden de forma única a un dispositivo de red.
18. **Man in the middle:** Es un ataque en el que se adquiere la capacidad de leer, insertar y modificar a voluntad, los mensajes entre dos partes sin que ninguna de ellas conozca que el enlace entre ellos ha sido violado.
19. **Dispositivos móviles:** Es un tipo de computadora de tamaño pequeño, con capacidades de procesamiento, con conexión a Internet y con memoria.
20. **Pairing:**Proceso Bluetooth mediante el cual se negocia una conexión entre un dispositivo central y un periférico, con el objetivo de intercambiar paquetes de datos.
21. **Root Mean Square(RMS):** En corriente alterna, el valor cuadrático medio de una corriente variable se denomina valor eficaz. Se define como el valor de una corriente continua que al circular por una determinada resistencia óhmica produce la misma potencia disipada que la corriente alterna.
22. **Received signal strength indication(RSSI):** Es el indicador de fuerza de la señal recibida.

- 0 Es la señal ideal.
- 40 señal excelente.
- 60 señal buena.
- 70 señal normal.
- 80 señal mínima.
- 90 señal pobre.

23. **System on a chip(SOC):** Es la tecnología de fabricación que integra todos o gran parte de los módulos componentes de un sistema informático en un único circuito integrado o chip.
24. **Service Set Identifier(SSID):** Es un nombre incluido en todos los paquetes de una red inalámbrica para identificarlos como parte de esa red.
25. **Service Set Identifier(Live Streaming):** Es la distribución digital de multimedia a través de Internet en vivo.
26. **Universal Asynchronous Receiver-Transmitter(UART):** Es un subsistema de comunicaciones serie que transmiten los bits de datos de forma secuencial una línea para recibir y otra para emitir.
27. **Whitelist:** Es una lista que contiene unas MAC determinadas que sirven de filtro en el escaneo de mensajes BLE. Esta lista es actualizable en todo momento.

Referencias bibliográficas

- [1] *Ley Orgánica 15/1999, de Protección de Datos de Carácter Personal. Sección I. Disposiciones generales. Departamento Jefatura del Estado. ref. BOE-A-1999-23750. 13 dic 1999.*
- [2] *Real Decreto 1720/2007, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley Orgánica 15/1999 de protección de datos de carácter personal. Sección I. Disposiciones generales. Departamento Ministerio de Justicia. ref. BOE-A-2008-979. 21 dic 2007.*
- [3] IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications. *IEEE Std. 830-1998*, 1998.
- [4] Allegro. *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. 2013.
- [5] Bluetooth. *Specification of the bluetooth System Coverd Core Package version 4.0*. 2010.
- [6] Marcado CE. *directiva 93/68/EEC*. 1993.
- [7] GitLab. Gitlab.com. <https://about.gitlab.com/>, jul 2013.
- [8] Texas Instrument. Application Note AN120 Using CC2590 Front End with CC2541, 2013.
- [9] Texas Instrument. CC2540/41 System-on-Chip Solution for 2.4-GHz Bluetooth low energy Applications, 2014.
- [10] Texas Instrument. *HDC1000 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor*. 2014.
- [11] Texas Instruments. *Software Developer's Guide v1.3.2 swru271f*. 2013.
- [12] Ecma International. *IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications.IEEE Std. 830-1998*. 1998.
- [13] Kionix. *Datasheet Tri-axis Digital Accelerometer Specifications KXCJ9-1008 Rev 5*. 2012.
- [14] Standar UL. *Underwriters Laboratories*.