UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Telecomunicació
i Aeroespacial de Castelldefels

TREBALL DE FI DE GRAU

TÍTOL DEL TFG: Disseny d'una xarxa sense fils de sensors amb Bluetooth Low Energy per a mesures biològiques i mediambientals

TITULACIÓ: Grau en Enginyeria de Sistemes de Telecomunicació

AUTOR: Sergi Garreta Serra

DIRECTOR: Josep Polo Cantero

DATA: 22 d'octubre de 2020

Títol: Disseny d'una xarxa sense fils de sensors amb Bluetooth Low Energy per a mesures biològiques i mediambientals
Autor: Sergi Garreta Serra

Director: Josep Polo Cantero

Data: 22 d'octubre de 2020

Resum

Avui en dia tothom coneix la tecnologia Bluetooth però molt poca gent sap realment que Bluetooth està format per dues tecnologies diferents. En aquest treball es tractarà el Bluetooth Low Energy que s'utilitza de forma molt eficient per a dispositius mòbils.

D'aquesta manera, s'entendran les diferències més destacables de BLE respecte al Bluetooth Clàssic, l'altre versió de Bluetooth, així com les millores que aporten les versions de BLE més recents. Es veurà com ha evolucionat la tecnologia des de la seva concepció com a idea original fins a ser un dels protocols més famosos i utilitzats actualment. Es contextualitzarà Bluetooth Low Energy dins de l'entorn de tecnologies sense fils de baix consum comparant aquestes entre si.

Convé destacar, que l'objectiu principal d'aquest treball és explicar BLE en profunditat així com detallar la informació necessària per poder desenvolupar una implementació senzilla del protocol. També, s'explicarà com s'organitzen les dades, com es transmet la informació i el benefici d'aquesta tecnologia per a xarxes de sensors.

Posteriorment, es tractaran les eines que s'empren amb el xip CC1352R de Texas Instruments. Describint pas a pas com utilitzar l'entorn SimpleLink per desenvolupar un projecte des de zero amb el xip mencionat. Basant-se en aquestes explicacions, es poden fer implementacions de nous projectes i escenaris similars així com realitzar modificacions.

A més a més, es mesurarà quin és el consum del dispositiu i també s'analitzarà l'abast a que pot arribar aquest utilitzant BLE. De manera paral·lela, es dissenyarà un projecte real per a la comunicació de sensors que prenguin mesures mediambientals i biològiques. Finalment, es desenvoluparà una aplicació que mostrarà en pantalla les dades recollides que prèviament s'han transmès cap al dispositiu mòbil a través de Bluetooth Low Energy.

Title : Design of a Wireless Sensor Network (WSN) using Bluetooth Low Energy (BLE) for environmental and biological measurements for Internet of Things (IoT)
Author: Sergi Garreta Serra

Advisor: Josep Polo Cantero

Date: October 22, 2020

Overview

Nowadays everyone knows what Bluetooth is, but few people understand that Bluetooth is based on two different technologies. This paper will explain Bluetooth Low Energy and how it is used very efficiently in mobile devices.

With the explanation, the most important differences between BLE and Bluetooth Classic (the other version of Bluetooth) will be understood, as well as, the last versions of BLE and the improvements they bring. Bluetooth Low Energy will be contextualized within the wireless low energy technologies environment.

The main goal of this paper is to explain deeply and with detail BLE and give the necessary information to be able to develop a simple but real implementation of the protocol. Furthermore, this paper will cover how data is organised, information is transmitted and the benefits of using this technology for a sensor network.

Next, the tools that are used for the CC1352R chip from Texas Instruments will be explained. There will be a step by step tutorial with the SimpleLink environment to develop a project from zero using the chip. With this basis it will be possible to make implementations of new projects and similar setups with some modifications.

Afterwards, the device consumption will be measured and the BLE range will be tested. In addition, a real case for sensor communication will be designed that will take environmental and biological measurements. Finally, an application will be developed to show the measurements taken and that have been transmited to the phone from the device using Bluetooth Low Energy.

ÍNDEX

ÍNDEX DE FIGURES

ÍNDEX DE TAULES

INTRODUCCIÓ

L'arquitectura d'internet de les coses que s'ha popularitzat en els últims anys a comportat unes noves necessitats en molts aspectes de la tecnologia que són molt diferents dels anteriors. Quan el que es vol és que tot estigui connectat entre si, queda clar que es trenquen moltes premisses amb les que s'havien dissenyat originalment les tecnologies més importants.

La transició cap a l'Internet Of Things, transforma el paradigma de les comunicacions de pocs elements a molta velocitat (xarxes centralitzades) cap a molts elements amb poca velocitat (xarxes distribuïdes). Això afecta les tecnologies sense fils que no havien estat dissenyades pel seu ús tan generalitzat.

Aquests canvis es poden veure en l'evolució de la majoria de tecnologies sense fils com wifi, xarxes cel·lulars i Bluetooth entre d'altres. En totes aquestes tecnologies ha estat necessari fer grans canvis per acomodar a molts més usuaris dels que s'havien predit inicialment.

El Bluetooth clàssic és un exemple d'una tecnologia que tenia limitacions a l'hora d'utilitzar-se en certs escenaris. No permetia comunicació entre més d'un dispositiu alhora, tenia un abast limitat, poques mesures per contrarestar les interferències d'entre d'altres. Al llarg de la seva història es van definir noves versions que anaven millorant les mancances del protocol. Tot i això, el cost que suposa haver d'establir una connexió per transmetre dades, encara que siguin molt poques, segueix sent molt alt.

És per això que Bluetooth va incorporar l'extensió Low Energy de forma opcional. En aquesta extensió està definit el protocol anomenat Bluetooth Low Energy que soluciona el problema de Bluetooth Clàssic, ja que, permet molt fàcilment i utilitzant molt poca energia transmetre dades (que inclou a múltiples dispositius) sense haver d'establir una connexió.

Però Bluetooth Low Energy també va anar millorant amb les noves versions, millorant el rendiment en escenaris concrets. Aquestes millores inclouen augmentar el màxim de dades que es poden transmetre sense connexió o augmentar la taxa de dades de transmissió per poder estalviar energia. En aquest treball es detallarà com funciona el BLE, com ha evolucionat al llarg del temps i finalment es realitzarà una implementació real del protocol.

CAPÍTOL 1. ORÍGENS DEL BLUETOOTH LOW ENERGY

1.1. Ús lliure de radiofreqüència

En tot l'espai radioelèctric hi ha certs trams que estan assignats per a un ús lliure i privat. Per utilitzar-los és necessari respectar la normativa nacional que normalment assimila la normativa comuna segons la ITU[1]. Aquestes bandes es designen ISM, acrònim d'*Industrial*, *Scientific* i *Medical*, que són els usos pels quals s'havia pensat que servirien originalment, avui en dia aquests usos són més diversos.

Com que les bandes ISM estan suficientment establertes arreu del món es crea la possibilitat d'utilitzar la comunicació sense fils amb molta facilitat pel públic general. Aquesta situació proporciona el disseny de productes per al consumidor habitual que ràpidament veu els avantatges de la comunicació sense fils entre dispositius. En aquest entorn sorgeix la necessitat d'establir estàndards entre companyies que veuen el benefici de proporcionar intercompatibilitat. Per definir els estàndards les companyies s'agrupen i formen grups com la WI-FI Alliance o el NFC Forum.

1.2. Bluetoooth

Bluetooth és un estàndard per l'intercanvi de dades de curt abast que utilitza la banda ISM de 2.4 GHz. És un dels protocols més coneguts i utilitzats, sobretot a través dels dispositius mòbils. A continuació, s'explicarà l'origen d'aquesta tecnologia.

1.2.1. Història de Bluetooth Clàssic

El desenvolupament de la tecnologia per a connexions de curt abast que acabarien esdevenint el que avui es coneix com a Bluetooth Clàssic va començar l'any 1989 per part de l'empresa Ericsson. Inicialment l'objectiu d'aquesta tecnologia era poder connectar auriculars i ordinadors sense necessitat d'una connexió per cable. D'altra banda a IBM es volia integrar la connectivitat de la xarxa de telefonia als ordinadors portàtils per poder realitzar i rebre trucades des d'aquests mateixos. El problema era que, això suposava un consum d'energia significatiu en els ordinadors portàtils de l'època.

IBM va veure que la tecnologia que estava desenvolupant Ericsson podria servir per tenir connectivitat de telefonia en els portàtils si es connectava el telèfon mòbil amb l'ordinador. Preveient que la mobilitat en el futur seria important, les dues empreses van acordar utilitzar aquesta tecnologia en els seus productes corresponents. El resultat va ser que els mòbils Ericsson i els ordinadors ThinkPad es podien comunicar entre si, i va permetre realitzar trucades des del portàtil. Com que ni Ericsson ni IBM tenien majoria en la quota de mercat dels respectius productes van decidir que la tecnologia fos oberta. D'a-

[1] La Internation Telecomunications Union depèn de les nacions unides i s'encarrega d'assignar l'espectre radioelèctric per a comunicacions.

questa manera es buscava integrar a més participants en aquesta tecnologia per tal de fer-la compatible amb la majoria de dispositius possibles. El 1998 es van unir al grup Intel, Nokia i Toshiba i totes 5 companyies van fundar el Bluetooth SIG (*Bluetooth Special Interest group*, d'ara endavant SIG). Finalment, al 2001 van sortir a la venda els primers dispositius amb Bluetooth, el terminal Ericsson T39 i el portàtil IBM ThinkPad A30.

1.2.2. Història de Bluetooth Low Energy

Com que el món de les comunicacions estava evolucionant cap als dispositius sense fils i alimentats amb bateria, era important adaptar les tecnologies existents per a les noves necessitats. L'any 2001 a Nokia es va començar a desenvolupar una versió de Bluetooth que fos similar però que reduís significativament el consum d'energia amb el mínim de compromisos possibles. Aquest desenvolupament va culminar l'any 2004 amb la publicació de la *Bluetooth Low End Extension* [3]. Posteriorment, es va dur a terme múltiples millores juntament amb Logitech en el projecte d'investigació per part de la Unió Europea MIMOSA [4]. El resultat del projecte es va anunciar el 2006 amb el nom de Wibree, es pot veure el logo a la figura 1.1.

Figura 1.1: Logo de Wibree

Els membres del SIG després de negociar entre si, van acordar incloure Wibree l'estàndard de Bluetooth en l'especificació 4.0 amb el nom de *Bluetooth ultra low power technology* i publicitat com a Bluetooth Smart. El primer mòbil a incloure'l va ser l'iPhone 4S que va sortir al mercat el 2011. Posteriorment es va canviar el nom per *Bluetooth Low Energy* (BLE d'ara endavant).

1.3. Bluetooth Clàssic vs BLE

El Bluetooth Low Energy no té cap relació amb el Bluetooth Clàssic pel que fa a l'arquitectura de la tecnologia. Tot i que comparteixen l'ús de la banda freqüencial de 2,4 GHz i contenen el nom de Bluetooth, són completament diferents, de fet, no són compatibles entre si. De fet, quan un dispositiu vol implementar les dues tecnologies (anomenat mode dual) ho ha de fer per separat, ja que només comparteixen l'antena; les modulacions i els altres blocs són tots diferents.

1.4. MANETS (*Mobile Ad-Hoc Networks*)

Bluetooth Clàssic no permet tenir més d'una connexió establerta amb altres dispositius. A més a més té el desavantatge que, tot i voler transmetre poques dades, l'arquitectura

fa que es consumeixi bastant energia per establir i mantenir la connexió, encara que sigui breu. Això no suposava problemes inicialment, ja que l'ús principal era per la transferència de fitxers petits com contactes o fotografies. Més endavant també es va fer popular l'us del Bluetooth per a escoltar música a través d'auriculars sense fils. En aquests casos el cost d'establiment de la connexió és insignificant en comparació amb el cost mentre s'estan transferint dades, que acostuma a ser un període llarg de temps. Posteriorment, amb l'ús dels telèfons intel·ligents i l'augment del consum de continguts, sobretot música, es va millorar Bluetooth per ser més resistent a interferències i aconseguir velocitats superiors i així poder transmetre música d'alta fidelitat.

D'altra banda, va començar a sorgir l'Internet of Things, basat a tenir molts dispositius connectats, transmetent a taxes molt variades i de forma discontínua. Això va generar necessitats que no es podien cobrir amb les tecnologies existents. Era necessari tenir xarxes sense fils, amb consum molt baix d'energia i que cobrissin una gran distància (10-100 metres). Amb aquests requeriments, van sorgir les xarxes ad hoc o *Mobile Ad-Hoc Networks* (MANETS d'ara endavant).

1.4.1. Altres MANETS

BLE és una de les MANETs més populars però n'hi ha d'altres que competeixen i que es detallaran a continuació.

1.4.1.1. Zigbee

L'estàndard Zigbee s'utilitza en entorns per l'automatització de la casa, xarxes de sensors, col·lecció de dades mèdiques entre d'altres. Zigbee està dissenyat per sobre de l'IEEE 802.15.4[2] i per tant, només defineix les capes superiors. No està pensat per a situacions amb gran mobilitat entre nodes sinó per a desplegaments més estàtics. Aquesta tecnologia, per exemple, s'utilitza en els dispositius de Philips Hue que serveixen per controlar bombetes intel·ligents.

1.4.1.2. 6LoWPAN

IPv6 *over Low power Wireless Personal Area Networks* és un protocol que permet enviar paquets d'Internet Protocol versió 6 a través de l'IEEE 802.15.4[2]. Aquest protocol està orientat a aportar internet amb connexions sense fils. Una de les característiques destacades és la capacitat de comprimir les capçaleres dels paquets per així reduir el sobrecost que suposa. La utilització del 6LoWPAN és majoritàriament coneguda per l'estandardització del protocol Thread que l'utilitza per a domòtica.

1.4.1.3. Z-Wave

Z-Wave és un protocol utilitzat principalment en domòtica. La comunicació es fa en una xarxa en malla que connecta els electrodomèstics i per tant, permet el seu control. La

[2]L'IEEE 802.15.4 és un estandàrd orientat a xarxes sense fils amb una baixa taxa de dades. Aquest només defineix les capes físiques i d'accés al medi.

principal característica d'aquest protocol és que utilitza únicament les freqüències ISM de la banda 800 o 900 MHz (segons continent) i així evita les interferències que hi ha a 2.4 GHz de WIFI o Bluetooth. La utilització de freqüències més baixes permet més abast amb menys potència, especialment quan es tracta de penetrar parets. Un exemple de dispositius que utilitzen aquesta tecnologia són els productes de la marca Ring principalment coneguts pels seus vídeo-porters intel·ligents.

1.4.1.4. Insteon

Insteon està orientat a domòtica i utilitza conjuntament radiofreqüència i les línies d'alimentació de casa per a la comunicació. Aquest tipus de sistema s'anomena de malla dual. El fet d'estar connectats tots els dispositius a la instal·lació elèctrica facilita una molt bona sincronització entre els dispositius. Això permet, per exemple, que múltiples dispositius puguin retransmetre paquets alhora per tal de millorar la cobertura i reduir les retransmissions. SmartLabs és la companyia que fabrica i ven els productes que utilitzen Insteon.

1.4.1.5. LoRa

El protocol Long Range desenvolupat per Semtech està orientat a cobrir les distàncies més grans d'entre les MANETs. Ho aconsegueix reduint la taxa de transmissió de dades reals, augmentant així, el temps dedicat a cada símbol donant més oportunitats al receptor per detectar correctament el senyal. Aquesta tècnica s'anomena espectre eixamplat i LoRa la implementa amb *Chirps*. Els *Chirps* són els polsos que es transmeten, sempre s'envien més *Chirps* que bits i la relació ve definida pel factor d'eixamplat o *Spreading Factor*. LoRa permet configurar aquest paràmetre que defineix l'equilibri entre la taxa de dades i la distància, pot prendre valors entre 7 i 12. El LoRa també implementa protecció contra errors o FEC (*Forward Error Correction*) per incrementar encara més l'abast.

Pel que fa a la pila de protocols que s'utilitzen en la comunicació, LoRa únicament defineix les capes inferiors. Això suposa que només s'ha especificat com funciona la modulació dels senyals analògics i com es transformen en símbols digitals. Tot i així, la LoRa Alliance va definir el LoRaWAN que és un dels protocols que es poden utilitzar per a les capes superiors.

1.4.2. Comparació

Tot i que els protocols tenen molt en comú, com per exemple el se ús en domòtica, cada un es diferencia de la resta en els detalls. A la taula 1.1 es pot veure una comparació de les capacitats de cada un dels protocols. Cal mencionar que les freqüències de les bandes mencionades poden variar lleugeramanet segons la normativa de cada país. En la comparació es pot veure com BLE és una de les que té millors capacitats. Això es deu al fet que tot i que no és possible aconseguir totes les característiques alhora la seva flexibilitat permet configurar el protocol per a moltes configuracions diferents.

	Abast (m)	Velocitat Física (Kbps)	Taxa de dades (Kbps)	Consum (mA)	Banda
BLE 4	50	1000	800	15	2.4 GHz
BLE 5	200	2000	1430	15	2.4 GHz
6LoWPAN	100	250	162	15	900 MHz i 2.4 GHz
Zigbee	100	250	162	30	900 MHz i 2.4 GHz
Z-Wave	90	100	40	23	900 MHz
Insteon	120	4,5	2,8	–	915 MHz
LoRa	10 Km	27	5	18	400 i 900 MHz

Taula 1.1: Comparació entre MANETs

1.5. Versions de BLE

Tal com s'ha vist anteriorment, BLE és classifica segons les seves capacitats en la seva versió 4 i en la 5. Això és deu als canvis significatius que ha experimentat aquesta tecnologia en les últimes versions [5]. Les novetats que aporta la nova versió principalment tenen l'objectiu d'incrementar les capacitats del protocol en els casos extrems, tant en entorns molt favorables com quan no són favorables. Les millores i noves opcions de BLE fan que s'utilitzi més eficientment l'espectre freqüencial i per tant, depenent de la regió, es pugui augmentar la potència de transmissió de 10 dBm, que era el límit de BLE 4.2, a 20 dBm en BLE 5.

1.5.0.1. LE 2M

Low Energy 2 Mega (LE 2M) és el nom que té la nova capa física, que és opcional, quan opera a 2 MBd[3] en la versió 5 en lloc dels 1 MBd que era l'única opció en la versió 4. L'augment de la velocitat dels símbols permet incrementar la quantitat de dades que es poden transmetre a nivell d'aplicació. Aquest canvi està pensat per facilitar la utilització de BLE en situacions més exigents pel que fa a volum de dades com per exemple, múltiples mesures del cos humà.

1.5.0.2. Abast

Tot i que la tecnologia BLE en la seva versió original (4.0) tenia una distància màxima de transmissió teòrica molt gran (100 metres sense obstacles), no era suficient per a tots els casos. Per exemple, era necessari tenir més abast en els sectors com el de les cases intel·ligents que tenien un abast real relativament baix degut als obstacles entre dispositius. El límit de l'abast, en part, ve definit per la potència màxima de transmissió (sigui per protocol o per normativa) i per la probabilitat d'error de bit BER (*Bit Error Ratio*) que es pot tolerar. Bluetooth defineix la BER màxima en 0.1% per tant quan un de cada mil bits és erroni es considera que la connexió és massa dolenta i que ja s'ha arribat al límit de distància.

Per tractar els errors en transmissió hi ha dues estratègies: detecció d'errors i correcció d'errors. En la versió 4.0 de Bluetooth només s'utilitzava la detecció d'errors, en canvi, en Bluetooth 5 s'implementa la correcció d'errors. D'aquesta manera sense augmentar la potència transmesa es pot incrementar l'abast màxim que pot tenir la comunicació. El

[3] El Baud (Bd) és la unitat de mesura de la velocitat de modulació, que correspon al nombre de canvis de l'estat d'un senyal en un segon.

desavantatge és que més bits dels que es transmeten es dediquen a redundància per tant queda menys espai per a dades de l'aplicació.

L'esquema de correcció d'errors (*Forward Error Correction*) es fa amb un codificador convolucional que pot generar a la sortida més bits dels que entren. El codificador pot funcionar amb dos esquemes diferents s'anomenen $S = 2$ i $S = 8$. Amb els diferents esquemes s'utilitza una taxa de codi diferent que pot augmentar la capacitat de correcció i incrementar l'abast però disminuir la quantitat de dades que es poden transmetre. Es poden veure les capacitats dels diferents esquemes a la taula 1.2.

	LE 1M	LE Coded S=2	LE Coded S=8	LE 2M
Symbol Rate	1 Ms/s	1 Ms/s	1 Ms/s	2 Ms/s
Data Rate	1 Mbit/s	500 Kbit/s	125 Kbit/s	2 Mbit/s
Error Detection	CRC	CRC	CRC	CRC
Error Correction	NONE	FEC	FEC	NONE
Range Multiplier (approx.)	1	2	4	0.8
Bluetooth 5 Requirement	Mandatory	Optional	Optional	Optional

Taula 1.2: Comparació de diferents capes físiques [5]

1.5.0.3. Advertisement Extensions

En Bluetooth 4.0 els paquets d'anunci (*Advertisement Packets*) tenen 6 octets de capçalera i com a molt 31 de dades, és a dir, com a molt es poden transmetre 31 Bytes de cop. Normalment, aquests paquets es transmeten pels 3 canals d'anuncis el 37, 38 i 39.

En Bluetooth 5 per poder difondre (*broadcast*) més dades el que es fa és enviar un paquet d'anunci on només s'indica la capçalera i un punter cap al canal per on s'enviarà el paquet complet. Posteriorment, pel canal per on s'ha indicat s'envia el paquet de dades i en cas de necessitar més dades s'encadenen paquets. D'aquesta manera, les dades només es transmeten una vegada, ja que abans, calia transmetre-les en els tres canals d'anunci. Aquest procediment està detallat més endavant en l'apartat 1.7.1.

En la versió 4.0 quan es vol enviar un paquet és necessari esperar un cert temps aleatori. Aquest procediment evita les col·lisions periòdiques però suposa que els dispositius han d'estar durant més temps escoltant, ja que no saben quan rebran el paquet exactament. En BLE 5 el GAP, que s'explicarà en profunditat a l'apartat 1.6.2.4., defineix un mode síncron que permet utilitzar un procediment d'establiment d'anunciaments sincronitzats.

També existeix una nova capçalera *SyncInfo* on s'indica amb exactitud l'interval i variació dels paquets. Així doncs, s'aconsegueix evitar les col·lisions i reduir el temps que el dispositiu ha de tenir la ràdio encesa.

1.5.0.4. Slot Availability Masks

La tecnologia LTE (telefonia) està utilitzant cada vegada més espai freqüencial i en preparació de que s'utilitzi en freqüencials pròximes a la banda de 2.4 GHz ISM s'ha desenvolupat un sistema per indicar disponibilitat en el temps. Per evitar les possibles interferències que causin altres tecnologies, es defineix la SAM (*Slot Availability Mask*) que permet identificar aquelles ranures de temps on hi ha disponibilitat així bloquejant aquells moments on hi hagi interferències per evitar-les.

1.5.0.5. Improved Frequency Hopping

Els salts en freqüència que utilitza la versió 4.0 estan definits per 12 seqüències predeterminades. En canvi, BLE 5 utilitza una seqüència pseudo-aleatòria per determinar quins canals s'utilitzen. L'algorisme, en aquest cas, és el *channel selection algorithm #2* i és més efectiu a evitar interferències i esvaniments per propagació multicamí.

1.6. Pila BLE

Un cop vistes les característiques generals del protocol cal entendre com funciona per dins. A continuació, es descriurà la pila de BLE i es veurà cada una de les capes que en formen part i les seves funcions.

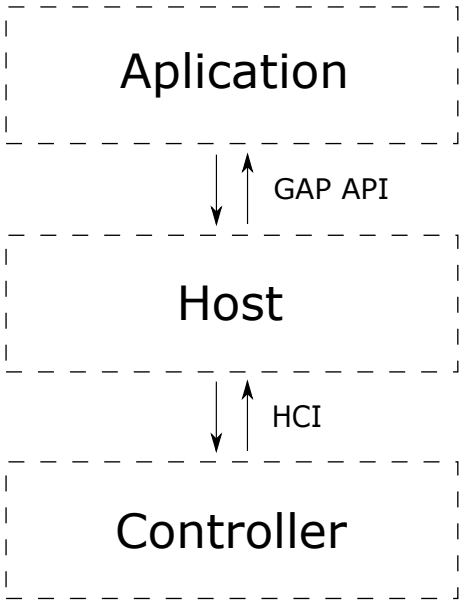


Figura 1.2: Pila de BLE

La pila pròpia de Bluetooth Low Energy està dividida en dues parts, tal com es pot observar a la figura 1.2, el controlador i el *host*. Aquestes dues parts són independents i

utilitzen el protocol *Host Controller Interface* (HCI d'ara endavant) per comunicar-se entre elles. Aquest protocol pot estar implementat amb qualsevol protocol de transport físic com USB o UART. La idea darrera de separar la pila en dos serveix per fer compatibles xips fets per diferents fabricants. Les dues parts de la pila poden ser implementades en el mateix xip anomenat configuració única o en xips separats anomenat configuració dual.

1.6.1. Controller

El controlador compren la capa física i la capa d'enllaç en l'ordre que mostra la figura 1.3.

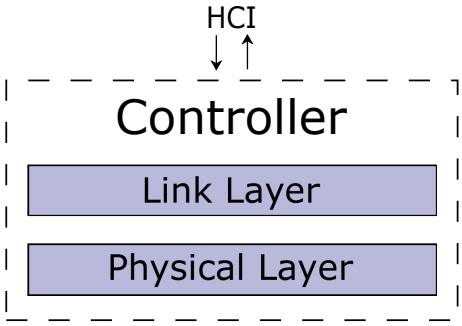


Figura 1.3: Controller Stack

1.6.1.1. Capa Física

La capa física és la que s'encarrega de la comunicació anal·lògica modulant i desmodulant els senyals. Tal i com ja s'ha comentat abans, treballa a la banda de 2.4 GHz en 40 canals diferents tal i com es mostra a la figura 1.4.

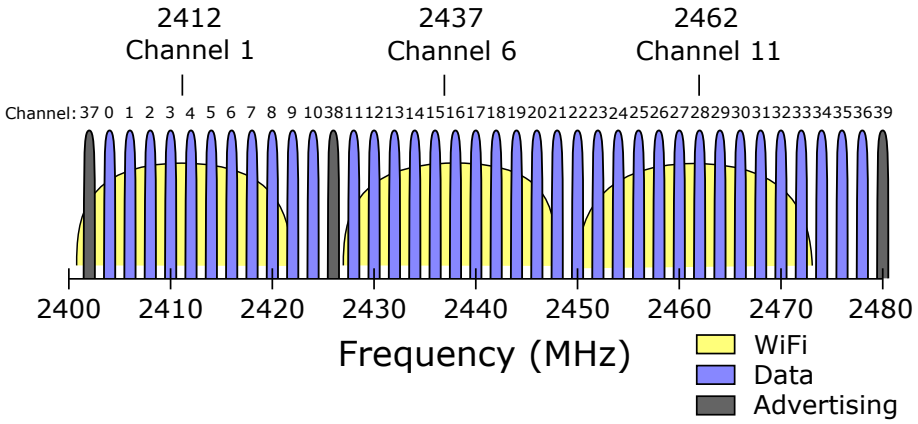


Figura 1.4: Canals BLE [6]

Els canals es classifiquen en 37 de dades o també anomenats secundaris i 3 d'anunci (*Advertisment*) o primaris. En els canals d'anunci es vol tenir més qualitat, ja que la informació que s'hi transmet és més important. Per exemple, són els canals que s'utilitzen per descobrir altres dispositius. És per això, que els canals d'anunci es troben en el buits que deixen els canals WiFi més comuns (1, 6 i 11), tal com es veu a la figura 1.4.

El protocol BLE té l'objectiu de consumir el mínim d'energia possible, això es pot millorar reduint el temps que s'està transmetent o escoltant a través de la ràdio. Si no s'ha de rebre o transmetre res, es pot apagar la ràdio i s'estalvia energia. El BLE és un dels protocols que tenen la taxa de transmissió física [4] més alta, i de fins a 1 Mbps originalment i de 2 Mbps en BLE 5.

La potència màxima de transmissió és de 20 dBm (100 mW) segons l'especificació[5]. Aquesta potència de la ràdio es pot controlar, disminuint-la per consumir menys energia. Tot i que això, només serà possible si l'entorn ho permet i el receptor pot rebre el senyal correctament. Els paquets de BLE indiquen la potència amb que s'han transmès i junt amb el RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), la potència rebuda, es pot estimar la distància fins al transmissor. Conèixer aquest valor és útil per a certes aplicacions, per exemple, la localització en espais interiors.

La modulació utilitzada per BLE és la GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), aquesta modulació és una de les més robustes, simples d'implementar i és el que permet a BLE, en part, tenir un abast molt més gran que Bluetooth Clàssic. El filtre gaussià redueix el consum pic d'energia [9] i també redueix les interferències en freqüències veïnes. En BLE 4.0 s'utilitza una desviació freqüencial de 185 kHz, en BLE 5 com que augmenta la velocitat de símbols també creix la interferència intersimbòlica. Per mitigar aquest efecte negatiu, la desviació de freqüència passa a ser de 370 kHz.

1.6.1.2. Link Layer

La capa d'enllaç és l'encarregada d'escanejar, anunciar i gestionar les connexions amb altres dispositius.

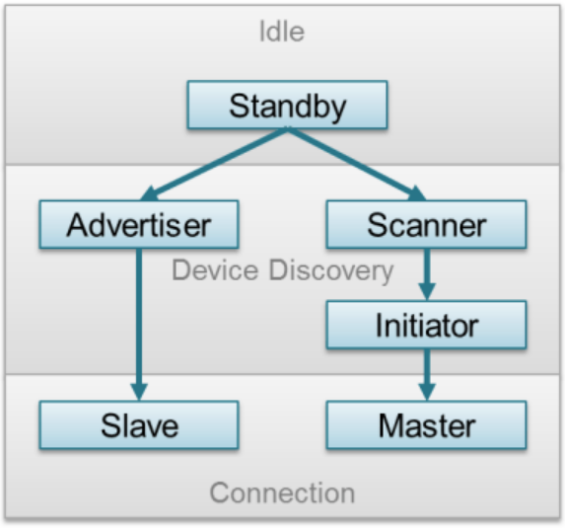


Figura 1.5: Estats de la capa d'enllaç [10]

Depenent del moment en la connexió, els dispositius es troben en diferents estats. Els estats son: Espera (*Standby*), Anunciador (*Advertiser*) o Escàner (*Scanner*) i Iniciador

[4] La taxa de transmissió física és aquella a la que transmeten la ràdio, no confondre amb la taxa de dades d'aplicació *Throughput*

[5] La PCB utilitzada pot transmetre fins a 5 dBm de potència

(*Initiator*), Esclau (*Slave*) o Mestre (*Master*). A la figura 1.5 s'hi pot veure el flux d'estats per arribar a una connexió.

Aquesta capa és l'encarregada d'implementar el salt en freqüència (*frequency hopping*) que permet mitigar l'impacte de les interferències estretes. Si s'utilitzés només un dels canals BLE i en aquell canal hi haguessin interferències no es podria establir comunicació. Al alternar múltiples canals, encara que hi hagi interferències en algun d'ells es considera que no n'hi haurà en tots i per tant hi podrà haver una bona comunicació. Els salts que es fan són des de 5 fins 16 canals per salt d'entre els dedicats a dades.

1.6.2. Host

El protocol BLE es va dissenyar amb la flexibilitat en ment, és per això que l'estructura de la pila del host permet no utilitzar certes capes que es consideren opcionals tal com es pot veure a la figura 1.6. El permetre tenir capes opcionals pot generar incompatibilitats entre dispositius però no és comú. En canvi, facilita molt i abarateix el disseny d'un dispositiu BLE en cas que no es necessitin totes les capacitats que ofereix.

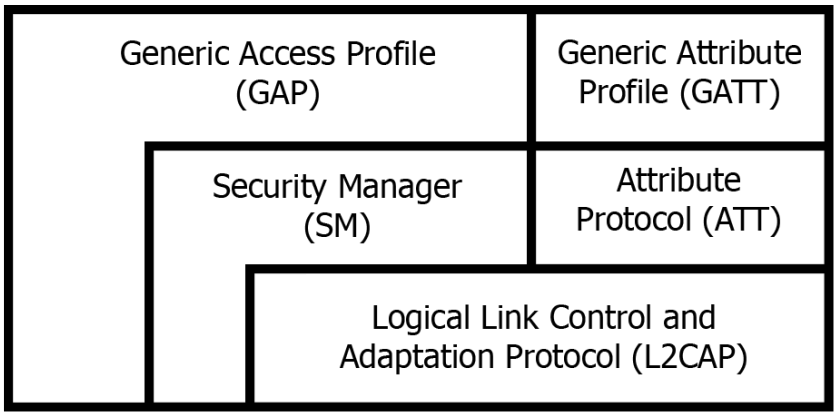


Figura 1.6: Pila del Host [11]

1.6.2.1. L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol)

La *Logical Link Control and Adaptation Protocol* és la capa encarregada de l'establiment de la connexió lògica; segmentació i reassemblatge de paquets; multiplexament de protocols; i control de flux individual per canal.

La multiplexació de protocols és necessària per aconseguir que BLE sigui flexible. Permet que des de capes superiors s'utilitzin els protocols que necessiti el fabricant, i no només aquells determinats per l'estàndard de BLE.

Degut a la limitació física de l'arquitectura, existeix una MTU[6] (*Maximum Transmission Unit*) i per tant és necessari segmentar els paquets de les capes superiors que es converteixen en paquets més petits per a les capes inferiors. Aquesta MTU es pot definir

[6]La MTU és la mida màxima que pot tenir un paquet

(dins dels límits establerts) independentment per cada connexió així flexibilitzant l'ús que es dóna al protocol en cada cas. La L2CAP també és la capa que fa el seguiment de la qualitat de la connexió i dels recursos utilitzats per assegurar-se que les necessitats dels serveis es compleixen.

1.6.2.2. Security Manager

La capa *Security Manager* o SM proveeix de diferents serveis relacionats amb la seguretat de la connexió. Aquests serveis són: autenticació i autorització de dispositius; i també integritat, confidencialitat i privacitat de les dades. El protocol té flexibilitat en el tipus d'emparellament i la generació de claus per aconseguir reduir els requeriments de memòria i energia segons les necessitats específiques. Els diferents mètodes de seguretat es comentaran en més profunditat a l'apartat 1.10.

1.6.2.3. ATT & GATT

L'*Attribute Protocol* (ATT d'ara endavant) és el protocol d'aplicació més comú per a BLE i el *Generic Attribute Profile* (GATT d'ara endavant) defineix com utilitzar el protocol per oferir serveis a capes superiors. L'ATT és un protocol dissenyat per a dispositius *Low Energy* amb l'objectiu de minimitzar la quantitat de dades transmeses. L'atribut està format per 4 elements, *handle*, UUID, permisos i *value*.

El *handle* fa la distinció única entre els diferents atributs, ocupa 16 bits i habitualment els valors són seqüencials. És molt útil, ja que s'utilitza per referenciar l'atribut amb el mínim de bits possibles. L'UUID (*Universal Unique IDentifier*) identifica el tipus d'atribut, aquest número pot ser de 16 bits si s'utilitza algun que ja està estandarditzat pel SIG o bé en tindrà 128 bits si està definit pel fabricant. En els permisos s'indicarà quin tipus d'accés té el client a la informació (només lectura, lectura i escriptura ...). També pot estar definit si requereix un nivell mínim d'encriptació o si és necessari l'autenticació. Finalment, el valor de l'atribut serà on hi ha la informació, la seva interpretació i longitud (512 bytes com a molt) dependrà de l'UUID.

Des de la perspectiva del GATT els dispositius són clients i servidors. Habitualment és el client qui pren la iniciativa demanant dades, tot i així, el servidor també té la capacitat d'iniciar una comunicació per exemple notificant quan un valor ha canviat.

La definició de l'ATT és massa genèrica per si sola tal que seria comú que, per fer el mateix, es desenvolupessin múltiples definicions que fossin incompatibles entre si. Per tal de tenir millor definits els serveis s'utilitza el GATT. El GATT permet definir perfils que agrupen múltiples atributs en un sol servei [12], la seva jerarquia es mostra en la figura 1.7.

En un llistat d'atributs el GATT identifica els serveis tenint en compte que cada servei comença amb un atribut amb l'UUID 0x2800. Aquest atribut amb UUID 0x2800 s'anomena Declaració de Servei i tots els atributs consecutius fins a una altra declaració de servei formen part d'aquest. En la declaració de servei el camp "valor" indica l'UUID que identifica de quin servei es tracta. Cada servei conté característiques [13] definides en els atributs amb UUID 0x2803. Aquests tipus d'atributs s'anomenen Declaració de Característica. El valor de la declaració de característica està format per un nou UUID que identifica la característica i per un *handle*. Aquest *handle* correspon a l'atribut on hi ha les dades de la

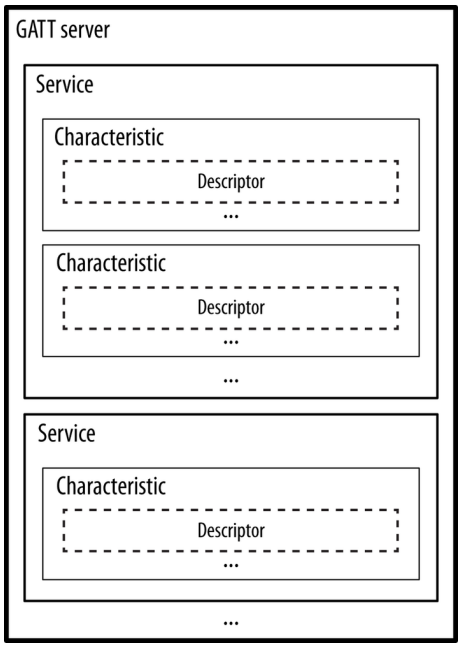


Figura 1.7: Jerarquia de GATT [14]

característica.

Handle	UUID	Descripció	Valor
0x0100	0x2800	Battery Service	UUID 0x180F
0x0101	0x2803	Characteristic: Battery Level	UUID 0x2A19 Value handle: 0x0102
0x0102	0x2A2B	Battery Value	20
0x0103	0x2800	Custom Temperature Service	UUID 706676c8-3e49...
0x0104	0x2803	Characteristic: Temperature	UUID 0x2A6E Value handle: 0x0105
0x0105	0x2A6E	Temperature Value	25.45
0x0106	0x2803	Characteristic: date/time	UUID 0x2A08 Value handle: 0x0107
0x0107	0x2A08	Date/Time	1/1/1980 12:00

Taula 1.3: Exemple de possibles atributs

En aquest exemple de la taula 1.3 es pot observar que hi ha 2 serveis diferents, marcats en vermell, ja que hi ha 2 UUID 0x2800. També es mostren 3 característiques en total, marcades en groc, (una pel primer servei i dues pel segon) que corresponen als 3 atributs amb UUID 0x2803. Com que els valors corresponents al nivell de bateria i la temperatura estan estandarditzats (veure [15][16], respectivament), no cal especificar que es refereixen a percentatge de bateria restant i a graus Celsius.

En la declaració de servei de temperatura (*Handle* 0x0103) es pot veure que no forma part de l'estàndard, ja que el seu valor té 128 bits. S'ha escollit per a aquest projecte un UUID completament aleatori, en concret el 706676c8-3e49-4ecc-9379-fa9851444e53. Aquest UUID identifica el servei que s'ha desenvolupat per l'exemple i en teoria hauria de ser únic. No es pot saber amb seguretat que algun altre desenvolupador no hagi escollit el mateix UUID i no hi ha una coordinació establerta. Tot i això es considera del tot improbable que

es produeixin col·lisions gràcies a la longitud de 128 bits.

La condició que ha de complir l'UUID és que no acabi en 0000-1000-8000-00805F9B34FB, ja que aquest sufix correspon als que estan reservats segons l'estàndard. És possible demanar al SIG tenir un UUID global reservat per a ús propi amb un cost de $2.500. Es poden veure tots els que ja s'han reservat oficialment a [17].

En aquest exemple no n'hi ha cap però les característiques poden tenir descriptors [18] que permeten aportar informació addicional sobre la característica que els precedeix. Aquests, per exemple, serveixen per poder subscriure's a rebre notificacions cada cop que una característica canvia de valor. Els atributs també tenen propietats d'accés que defineixen quines accions es poden prendre. Les propietats es comentaran en un exemple real més endavant 2.3.2.

1.6.2.4. GAP

La *Generic Access Profile* és la capa que interactua amb l'aplicació i per tant ofereix la Interfície de Programació d'Aplicacions (API en anglès) amb la funcionalitat que aporta BLE.

El dispositiu sempre està en un[7] dels quatre rols: Emissor, Observador, Perifèric o Central. Si el rol és emissor, s'enviaran anuncis per poder ser descobert. Si és Observador s'escoltaran els canals per obtenir informació dels anuncis. Un cop s'estigui en una connexió el perifèric serà el node amb menys capacitats de processament o de bateria i és requerirà menys d'ell per mantenir la connexió, per exemple a un rellotge intel·ligent En canvi el node Central serà el que tingui més recursos com pot ser un telèfon intel·ligent o un ordinador. Amb aquests rols i l'especificació del GAP existeix l'estàndard que permet els dispositius descobrir-se, connectar-se i emparellar-se entre d'altres.

1.7. Anunciaments

Quan els dispositius volen transmetre informació o volen connectar-se entre si el primer que cal fer és anunciar-se. BLE és molt flexible a l'hora de configurar els paràmetres d'anunci i permet al desenvolupador adaptar el protocol per a les necessitats que tingui. A continuació, es concretarà quins són aquests paràmetres i com afecten les prestacions finals del sistema.

Els paquets d'anunci com ja s'ha explicat anteriorment són aquells que serveixen a un dispositiu per donar-se a conèixer i alhora opcionalment transmetre informació [19].

1.7.1. Tipus

Existeixen 4 paquets d'aquest tipus i BLE 5 n'afegeix 4 més. Els 4 originals es classifiquen segons si permet connexió i si permeten escaneig, tal com mostra la taula 1.4.

L'ADV_IND és el genèric, és el més comú i permet que qualsevol dispositiu pugui connectar-se. L'ADV_DIRECT_IND serveix per anunciar-se a un dispositiu específic, per exemple, si

[7] En BLE 5.1 es permet certes combinacions de rols

Connexió	Escaneig	Nom
Si	Si	ADV_IND
Si	No	ADV_DIRECT_IND
No	No	ADV_NONCONN_IND
No	Si	ADV_SCAN_IND

Taula 1.4: Tipus d'anunciaments

un rellotge intel·ligent es vol connectar al telèfon al qual està associat. L'ADV_NONCONN_IND només indica que existeix i no rebrà informació. Això és útil, per exemple, per permetre localització de balises. L'ADV_SCAN_IND també està orientat a balises però estarà escoltant per si rep missatges d'escaneig amb els que pot respondre amb poca informació. Això permet una comunicació bidireccional limitada sense necessitat d'establir connexió. Tots els paquets excepte l'ADV_DIRECT_IND permeten transmetre 31 bytes de dades pròpies que han de seguir el format establert que s'explicarà a l'apartat 1.11.

En BLE 5 s'afegeixen 4 paquets més que permeten augmentar la quantitat de dades que es poden transmetre abans d'haver establert una connexió. L'ADV_EXT_IND és el paquet que s'envia pels canals d'anunci i indica en quin canal secundari s'enviarà l'anunci. Aquest paquet no permet transmetre dades. Els paquets que s'envien per canals secundaris tenen el prefix "AUX" i permeten enviar fins a 254 bytes de dades pròpies. L'AUX_ADV_IND és el paquet que s'envia per un canal secundari després que s'hagi indicat pel tipus de paquet anterior. En aquest paquet es pot configurar si es permet o no connexió i escaneig però no les dues. L'AUX_SYNC_IND s'utilitza per indicar que s'enviaran anuncis periòdics pels canals secundaris. D'aquesta manera no cal utilitzar els canals d'anunci tan sovint.

Per poder enviar moltes dades sense necessitat d'establir una connexió es pot fer utilitzant el paquet AUX_CHAIN_IND. Amb aquest tipus de paquet un cop s'ha enviat l'anunci pel canal primari es poden enviar múltiples paquets d'anunci per canals secundaris tal com es veu a la figura 1.8. En cada capçalera s'indica en quin moment i per quin canal es transmetrà el següent paquet.

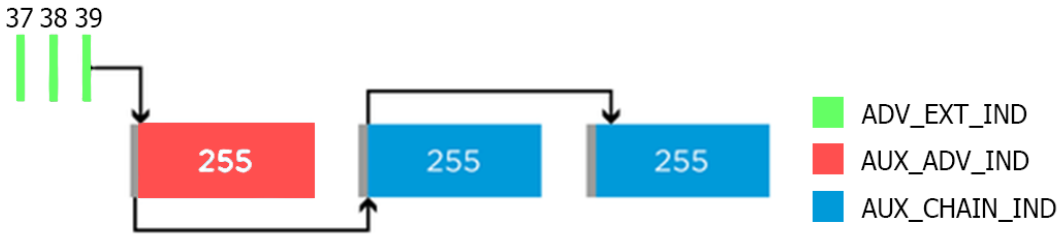


Figura 1.8: Exemple d'anunci estès [20]

Un cop explicats els paquets per separat, s'explicarà un exemple de com s'utilitzen aquests paquets per transmetre tanta informació com es vulgui sense necessitat d'establir una connexió. En primer lloc, l'anunciador envia pels canals d'anunci (habitualment s'envia múltiples vegades per cada canal primari) l'ADV_EXT_IND. Posteriorment, es transmet pel canal secundari l'AUX_ADV_IND que indica quan i on es transmetrà el següent paquet. Finalment, es transmeten tants AUX_CHAIN_IND com siguin necessaris fins que s'hagi

enviat totes les dades d'anunci que es vulgui.

1.7.2. Paràmetres

BLE permet seleccionar qualsevol combinació de canals per on transmetre els anuncis. Per consumir menys energia es pot transmetre en un únic canal però això es recomana no fer-ho, ja que si el canal és sorollós, els dispositius no el podran detectar.

Un paràmetre molt important que es pot configurar és l'interval d'anunci. Aquest valor defineix el temps que passa entre que es transmeten anuncis pel mateix canal tal com es pot veure en la figura 1.9. L'especificació de BLE defineix que pot estar entre 20 ms i 10.24 s amb salts de 0.625 ms. Aquest paràmetre és crític depenent del servei que es vol oferir. Si el valor és molt alt, ajudarà a reduir el consum d'energia considerablement però això augmentarà la latència de descobriment de dispositius.

Un cop s'estableix la connexió ja es poden enviar dades ràpidament però per l'escaneig són necessaris múltiples intervals d'anunci i cal considerar que és possible que el receptor no detecti tots els anuncis. És per això que, quan es desenvolupen serveis que interaccionen amb persones no és acceptable haver d'esperar desenes de segons, per tant, habitualment s'utilitzen valors d'entre 100 i 500 ms. En canvi, per a dispositiu que requereixen la mínima latència possible en les dades s'utilitzen valors entre 20 i 50 ms. Finalment, aquells dispositius que proporcionen dades que no varien sovint i que no requereixen interacció utilitzen valors des d'1 fins a 5 segons.

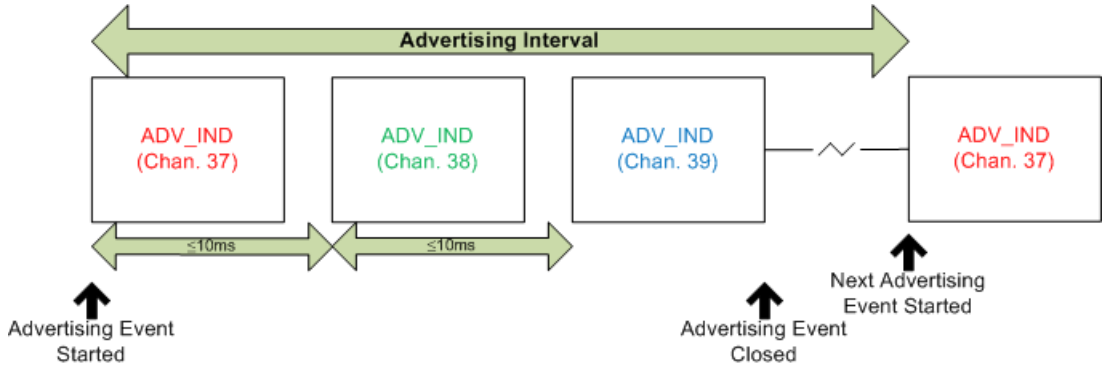


Figura 1.9: Paràmetres d'anunci [21]

Tot i que, es pot definir el valor de l'interval d'anunci cal tenir en compte que segons l'especificació de BLE s'aplica un retard pseudoaleatori que pot ser de fins a 10 ms i afecta els serveis que requereixen molt poca latència. Aquest retard aleatori s'implementa per evitar col·lisions entre dispositius que s'han sincronitzat involuntàriament i tenen el mateix interval o un múltiple entre si.

Fins ara s'ha parlat de definir un únic valor d'interval d'anunci, però habitualment, s'estableix un règim on es va canviant aquest valor depenent de la situació. Quan el dispositiu s'encén o quan s'espera una connexió es disminueix l'interval d'anunci per tal que la connexió s'estableixi més ràpidament. En canvi, quan fa temps que no hi ha cap connexió s'augmenta l'interval d'anunci per reduir el consum d'energia.

1.8. Escaneig

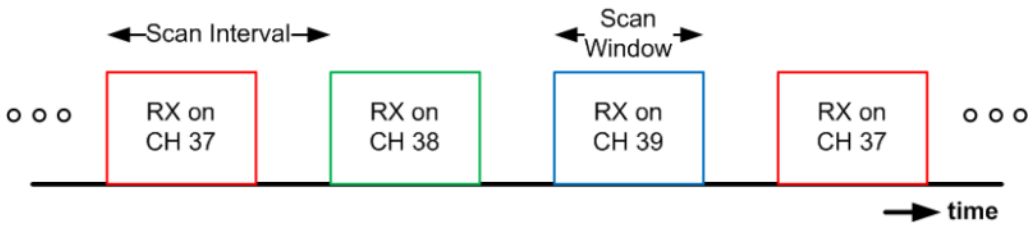
Quan un dispositiu es vol anunciar, a part de transmetre anuncis, també ho pot fer fent escaneigs a dispositius que s'han anunciat prèviament. El procés d'escanejar en l'especificació de BLE 5 s'anomena *Device Discovery* i es basa en dos tipus, l'escaneig actiu i el passiu. En cas de fer escaneig passiu només es pot obtenir informació a través dels anuncis d'altres dispositius. Si l'escaneig és actiu, es poden enviar requeriments d'escaneig per demanar informació addicional a la qual hi ha als anuncis.

1.8.1. Tipus

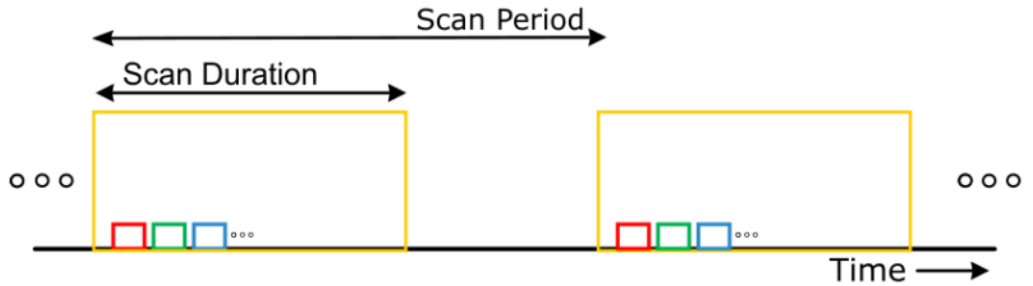
Per a l'escaneig actiu hi ha dos paquets en la versió 4.0 i BLE 5 n'afegeix dos més. l'SCAN_REQ serveix per requerir més informació a un dispositiu que s'està anunciant i que accepta aquest tipus de petició. En el paquet no hi van dades pròpies, només s'hi indica l'origen i destí. L'SCAN_RSP és la resposta al paquet anterior, conté l'adreça pròpia de l'anunciador i fins a 31 bytes de dades. L'extensió que aporta BLE 5 defineix 2 nous tipus de paquets, l'AUX_SCAN_REQ i l'AUX_SCAN_RSP que tenen la mateixa funcionalitat que els anteriors respectivament. La diferència és que serveixen per a les comunicacions a través de canals secundaris. Conseqüentment la quantitat de dades passa a ser de fins a 254 bytes en la resposta.

1.8.2. Paràmetres

Els paràmetres d'escaneig es poden identificar en la figura 1.10.



(a) Escaneig de canals



(b) Periodes d'escaneig

Figura 1.10: Paràmetres d'escaneig [21]

L'interval d'escaneig és el temps des que es comença a escanejar en dos canals consecutius, es pot definir entre 10 ms i 10,24 s. La finestra d'escaneig és el temps en què s'està

escoltant a un canal. Duració d'escaneig, és el temps que el dispositiu estarà escanejant. Es pot configurar des de 10 ms fins a 65 segons o escaneig indefinit. El període d'escaneig indica el temps entre que comencen les duracions d'escaneig i que serveix per poder fer pauses en què el dispositiu no escaneja.

1.9. Connexions

S'ha vist com no cal establir una connexió per a transmetre poca informació. Això permet desenvolupar implementacions molt simples per a situacions on es transmet amb molt poca freqüència. Tot i això, BLE també permet transmetre moltes més dades quan s'estableix una connexió.

Un cop s'hagi establert la connexió es podrà transmetre la informació molt eficientment, però establir una connexió suposa un cost energètic considerable. Per tant, a l'hora de definir els paràmetres de la connexió és important evitar, a ser possible, establir connexió cada vegada que es vol transmetre informació.

Com que les connexions estan basades en múltiples esdeveniments en instants determinats es considerà una connexió síncrona. No hi ha límit de connexions segons l'especificació de BLE i per tant, dependrà de les capacitats del dispositiu amb el qual es treballa.

Cal recordar que, per crear una connexió és necessari que un dispositiu tingui el rol GAP de central i un altre amb el rol de perifèric (els anunciadors i observadors no poden iniciar connexions).

El dispositiu central serà el que iniciarà la connexió i el perifèric el que l'acceptarà o no. El central serà sempre el mestre i el perifèric serà l'esclau de la connexió. Per iniciar una connexió el mestre envia un missatge de tipus CONNECT_IND[8] amb els paràmetres de la connexió. En aquests paràmetres, tal com es veurà més endavant en l'apartat 1.9.1., hi ha la informació necessària per determinar el primer esdeveniment de la connexió. En cada esdeveniment, els dos dispositius tenen un temps assignat per transmetre i per rebre dades.

A la figura 1.11 es pot observar el procediment en que dos dispositius estableixen una connexió. Tenim el dispositiu A que, inicialment, està com a observador i el dispositiu B que s'està anunciant. Cal recordar que, els anuncis no es detecten tots, ja que els dispositius no sempre estan transmetent i escoltant en el mateix canal primari.

El dispositiu A decideix establir una connexió amb el dispositiu B i envia un requeriment de connexió en l'últim canal en que s'ha escoltat l'anunci. El dispositiu B després de transmetre un anunci per un canal, escolta durant un temps determinat en el mateix canal a l'espera de requeriments de connexió. Quan el dispositiu B rep el requeriment, decideix acceptar la connexió i respon a aquest.

En aquest moment, el dispositiu A passa a ser el mestre amb els rols Central i Client i el dispositiu B passa a ser l'esclau amb rols de perifèric i servidor. La connexió està establerta i ja és possible transmetre dades entre ambdós dispositius durant els esdeveniments de connexió.

[8] Aquest paquet en la versió 4 de BLE s'anomena CONNECT_REQ

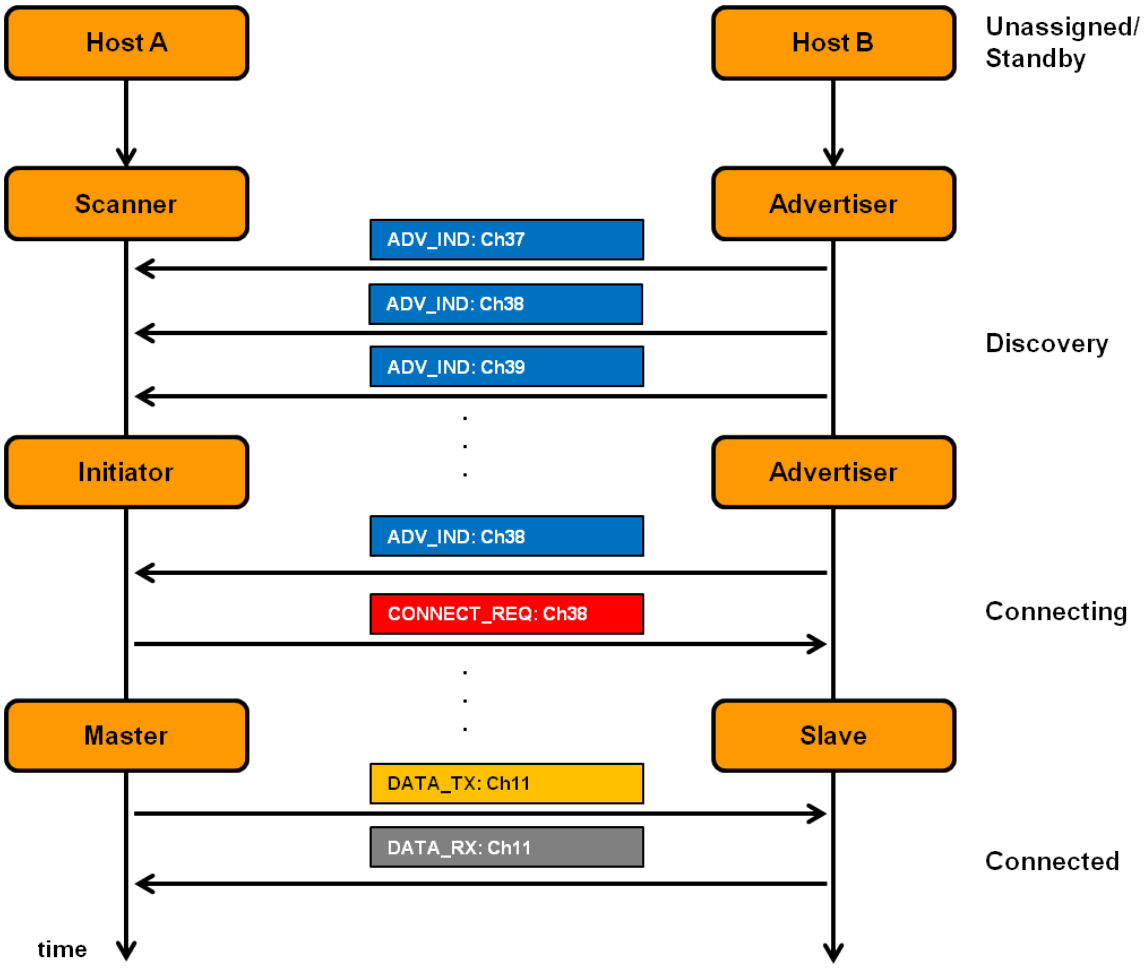


Figura 1.11: Establiment de connexió [22]

1.9.1. Paràmetres

L'interval de connexió és un dels paràmetres més importants en la connexió BLE, estableix com de sovint es comuniquen els dispositius. És el temps que hi ha entre esdeveniments de la connexió i va entre 7,5 ms i 4 s. Com que el que es configuren són preferències, es determina l'interval mínim i el màxim que es vol. En cas que es vulgui fixar, simplement, s'ha d'indicar el mateix valor per al mínim i al màxim.

BLE permet a l'esclau saltar-se esdeveniments per tal d'estalviar bateria, per exemple, si no té dades a transmetre. La latència de l'esclau, que és un dels paràmetres de connexió, defineix la quantitat màxima d'esdeveniments que l'esclau pot saltar i que la connexió segueixi establerta.

En la figura 1.12 es pot observar la comparació entre quan s'utilitza la latència d'esclau i quan no. Tot i això, el mestre que és el node que té més bateria, participa en tots els esdeveniments escoltant el canal per si l'esclau transmet. Utilitzar aquest paràmetre permet tenir una connexió amb una latència baixa però amb un consum igualment reduït mentre no s'hagin de transmetre dades molt sovint.

L'últim paràmetre és el temps de supervisió, és el temps màxim acceptable que pot passar sense activitat en la connexió. Si es supera aquest temps, es considera que la connexió

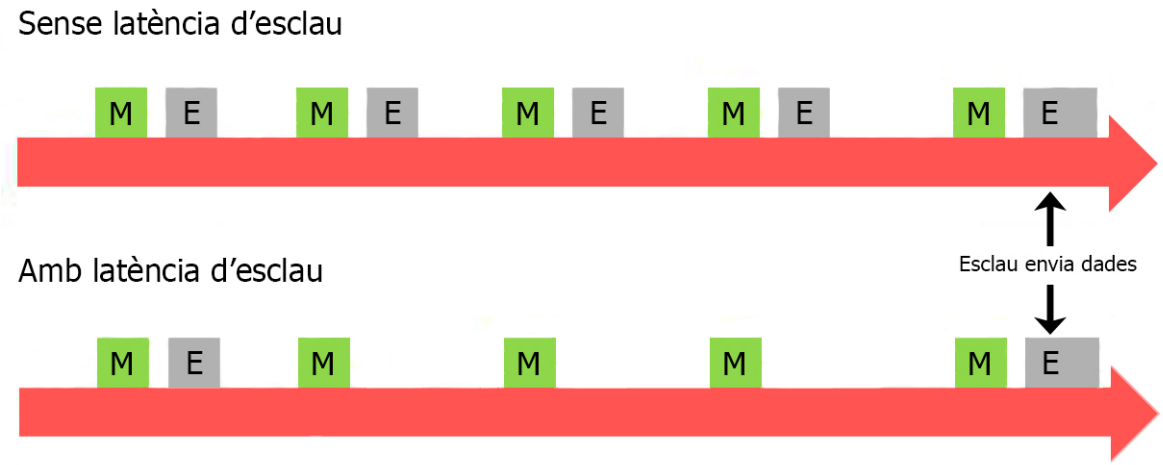


Figura 1.12: Comparació d'esdeveniments amb latència d'esclau [23]

s'ha acabat i per tant, per comunicar-se s'ha de tornar a iniciar. Això pot passar, per exemple, en entorns molt sorollosos o més sovint quan els dispositius surten del seu abast i el senyal no és detectable.

1.10. Seguretat

Com que l'ús de BLE és molt flexible, per poder-lo utilitzar en certes aplicacions es requereix que l'intercanvi de dades sigui segur. Això significa que la connexió tingui resistència a atacs d'*eavesdrop*[9] passiu i d'intermediari[10] (*Man In The Middle* en anglès). BLE utilitza l'encriptació simètrica AES-CCM, però la seguretat rau en com els nodes s'intercanvien la clau.

Hi ha diferents maneres que el desenvolupador pot escollir utilitzar i que varien en seguretat i facilitat d'ús. Existeix el mètode sense seguretat anomenat *Just Works*. Aquest mètode és útil en casos on no es requereix seguretat o que no és possible tenir-ne per les limitacions del dispositiu amb el qual es vol establir connexió.

Un altre mètode és l'*Out of Band*, aquest permet utilitzar una altra tecnologia per l'intercanvi de claus, com per exemple, NFC (comú en auriculars d'alta gamma). La seguretat d'aquest mètode depèn completament en el nou sistema per l'intercanvi de claus.

El més habitual és el *Passkey* en què l'intercanvi de claus es bassa en una contrasenya de 4 a 6 dígits. Cal tenir en compte que, a causa del baix nombre de combinacions depenent de la implementació aquest mètode serà sensible a atacs d'*eavesdropping* passiu.

Finalment, un mètode similar l'anterior és el de Comparació Numèrica, en lloc de ser l'usuari qui introdueix el codi es genera automàticament i es mostra en els dos dispositius. Cal comprovar que sigui el mateix número en els dos casos i això permet prevenir atacs de *Man in the Middle* però, de nou, no protegeix contra l'*eavesdropping*.

[9] Aquest tipus d'atac permet a l'atacant conèixer el contingut dels missatges que es transmeten.

[10] Aquest tipus d'atac permet modificar la informació que es transmet sense que sigui evident pel transmissor o el receptor.

1.11. Format

En aquest apartat s'explicarà com estan formats els paquets que s'envien en BLE i de quins camps estan formant. Cal distingir però entre la versió 4.2 i la 5 de BLE, ja que degut a les noves funcionalitats, el format canvia considerablement.

1.11.1. BLE 4.2

En la versió de BLE 4.2[11] els paquets que es transmeten segueixen el format de la figura 1.13.

Preamble (1 octet)	Access Address (4 octets)	PDU (2 to 257 octets)	CRC (3 octets)

Figura 1.13: Format del paquet en BLE 4.2 [24]

El preàmbul és una seqüència predefinida i que serveix per sincronisme. L'adreça d'accés identifica a quina connexió pertany aquest paquet, en cas de ser d'anunci i no pertànyer a cap connexió el valor és 0x8E89BED6. Aquest camp serveix al receptor per filtrar els paquets i només tractar aquells que interessa. El CRC (Cyclic Redundancy Check) s'utilitza per detectar errors en el paquet.

En la PDU (Protocol Data Unit) és on es troba la informació pròpia del paquet i depenent de si és un paquet en un canal d'anunci o en un de dades té un format lleugerament diferent. En la figura 1.14 es poden veure les diferències. Cal destacar que, en el cas de ser un anunci tot l'espai es dedica a informació, en canvi, en la PDU d'anunci es reserven 4 bytes per al comprovant d'integritat del missatge (*Message Integrity Check* en anglès).

Header	Payload
2 Bytes	0-37 Bytes

(a) Format PDU d'anunci [24]

Header	Payload	MIC*
2 Bytes	up to 255 Bytes (incl. MIC)	4 Bytes

(b) Format PDU de dades [24]

Figura 1.14: Format PDU

Pel que fa a la Càrrega Útil (*Payload*) serà diferent segons el tipus de paquet. En el cas de l'ADV_IND està format per l'adreça de l'anunciant seguit d'un llistat d'estructures de dades d'anunci (*Advertisement Data Structure*). Aquestes, estan formades per la longitud de l'estructura, el tipus i les dades en si. Existeixen molts tipus d'estructura que estan definits en l'estàndard [25].

[11] En les versions anteriors a la 4.2 la PDU tenia una mida màxima de 39 bytes.

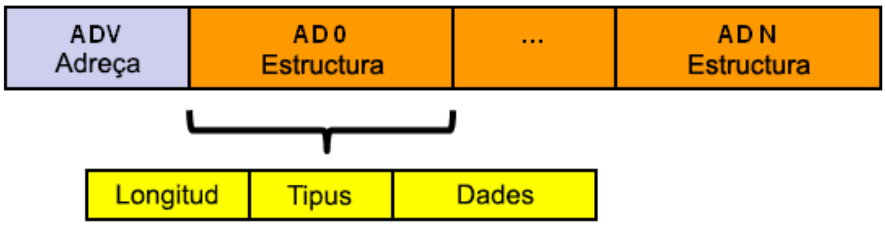


Figura 1.15: Payload de ADV_IND [24]

En canvi, en el cas de l'ADV_DIRECT_IND simplement s'indica l'adreça de l'anunciador i la del dispositiu al qual va dirigit el paquet.

1.11.2. BLE 5

Els canvis per a BLE 5 corresponen a les noves possibilitats que s'han comentat a l'apartat 1.5.. Primer, la funcionalitat per poder transmetre anuncis als canals secundaris que s'ha comentat a 1.5.0.3. i enumerat els tipus de paquets a 1.7.1.

Payload			
Extended Header Length (6 bits)	AdvMode (2 bits)	Extended Header (0 - 63 octets)	AdvData (0 - 254 octets)

Figura 1.16: Format de la Extended Advertising Payload [26]

Tots els paquets nous de BLE 5 d'anunci es basen en aquest format flexible. L'*Extended Header Length* defineix la longitud de l'*Extended Header*. L'*AdvMode* defineix una sèrie de valors que identifiquen si l'anunciador accepta connexions o es pot escanejar. L'*Extended Header* indica informació similar a la versió 4.2 com l'adreça de l'anunciador. Però també indica tot el necessari per BLE 5, com en quin canal secundari es transmetrà part de la informació del paquet o amb quin tipus de capa física es transmetrà aquesta informació (LE 1M, LE 2M o LE Coded) entre d'altres.

CAPÍTOL 2. DESENVOLUPAMENT

Un cop vist com funciona el protocol del Bluetooth Low Energy, en aquest capítol s'analitzarà el dispositiu que l'implementa. S'explicarà tant els components i parts que formen part del circuit imprès (*Printed Circuit Board* o PCB d'ara endavant) com el programari que s'utilitza per desenvolupar projectes utilitzant-la.

2.1. LaunchXL CC1352R1

Per analitzar el protocol BLE i veure les seves característiques s'ha utilitzat el kit LaunchXL pel desenvolupament ràpid del microcontrolador CC1352R1.

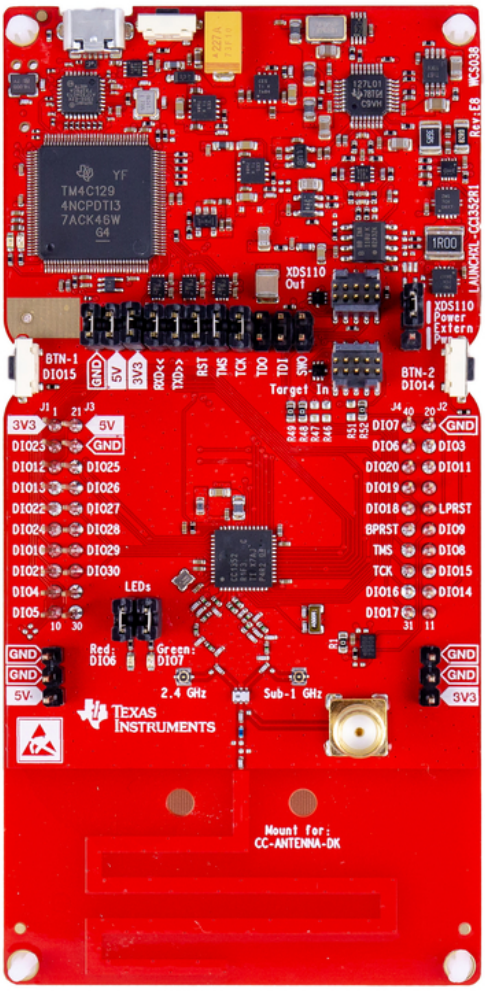


Figura 2.1: PCB amb la que es realitza el treball [27]

Aquesta PCB, que es pot veure a la figura 2.1, permet el desenvolupament d'aplicacions en BLE utilitzant el microcontrolador CC1352 de Texas Instruments. A continuació es descriuen les seves característiques principals [28].

El dispositiu CC1352R és multiprotocol i multibanda orientat a 2.4 GHz o sub-1GHz que serveix per a Thread, Zigbee, Bluetooth 5 Low Energy, IEEE 802.15.4g i 6LoWPAN. Pel que fa a memòria, té 352 KB flash programable, 256 KB de ROM per a protocols i llibreries, 8 KB de Cache SRAM i 80 KB de RAM protegida amb paritat. D'els perifèrics el més important és l'ADC de 12 bits i 8 canals amb freqüència de mostreig de 200 Kmostres/s (multiplexat). També té Rellotge de Temps Real (RTC en anglès), acceleradors d'operacions criptogràfiques i generador de números aleatoris. La radio multibanda que té un receptor amb sensibilitat de -121 dBm per a sub-1GHz i de -110 dBm a 50 Kbps o -105 dBm a 125 Kbps. El transmissor pot transmetre fins a 14 dBm sub-1GHz i 5dBm a 2.4 GHz.

2.2. Software

Pel desenvolupament de projectes per a la PCB s'ha utilitzat l'entorn de desenvolupament Code Composer Studio 9. El CCS el distribueix Texas Instruments i està basat en Eclipse [29], que és de codi obert. Aquest entorn de desenvolupament està orientat al desenvolupament per a processadors incrustats (*embedded* en anglès) de les famílies fabricades per Texas Instruments. El gran benefici d'aquest programa és que permet la depuració de programes basats en JTAG que és el cas d'aquesta PCB.

Texas Instruments té la plataforma SimpleLink que conté tant les llibreries necessàries per desenvolupar projectes com els recursos necessaris per a l'aprenentatge de les tecnologies que es volen implementar. Per poder dur a terme projectes amb la PCB d'aquest treball és necessari utilitzar el SimpleLink CC13X2 versió 2.30.00.45[1].

2.3. Project 0

El Project 0 és el projecte instal·lat amb què les PCB vénen de fàbrica. Aquest projecte exposa certs serveis a través de BLE i permet fer una comunicació simple entre la PCB i un dispositiu mòbil. Aquesta comunicació és bidireccional, és a dir, des del mòbil es poden controlar els LEDs que té la PCB. I en el mòbil es pot veure si qualsevol dels dos botons està pitjat.

Aquest projecte serveix per tenir un bon exemple de com està dissenyada l'arquitectura dels serveis amb les seves característiques amb una relativa simple funcionalitat. A continuació s'analitzaran diferents parts dels atributs.

2.3.1. Serveis de Botons i LEDs

En la taula 2.1 es poden veure els valors que hi ha tal com estan en la taula d'atributs del servidor GATT del Project 0. Per facilitar la visualització de les dades s'han tret els zeros finals dels UUID propis però cal recordar que en total tenen 16 parells de caràcters (128 bits en representació hexadecimal) i no només els 9 parells que surten a la taula. Els

[1] La versió utilitzada no és la més nova perquè sigui compatible amb la revisió C del xip que s'està utilitzant.

Handle	UUID	Valor	Propietats
0x0022	0x2800	::B0:00:40:51:04:10:11:00:F0	
0x0023	0x2803	0E:24:00::B0:00:40:51:04:11:11:00:F0	0x0E
0x0024	0xF000111104514000B0	0	0x0E
0x0025	0x2803	0E:26:00::B0:00:40:51:04:12:11:00:F0	0x0E
0x0026	0xF000111204514000B0	0	0x0E
0x0027	0x2800	::B0:00:40:51:04:20:11:00:F0	
0x0028	0x2803	12:29:00::B0:00:40:51:04:21:11:00:F0	0x12
0x0029	0xF000112104514000B0	0	0x12
0x002A	0x2902	00:00	
0x002B	0x2803	12:2C:00::B0:00:40:51:04:22:11:00:F0	0x12
0x002C	0xF000112204514000B0	0	0x12
0x002D	0x2902	00:00	

Taula 2.1: Atributs del Project 0

atributs en si no es poden identificar per tant és necessari tenir en compte la documentació del Project 0. En la documentació hi ha inclosa una taula on es relaciona cada UUID amb el corresponent significat que es pot observar a la figura 2.2.

UUID	Which ATT Field	Description	Usage
F000 1110 -0451-4000-B000-000000000000	Value	LED Service	*Service declaration*
F000 1111 -0451-4000-B000-000000000000	Type/Value	LED0 State	Read state or write 01 or 00.
F000 1112 -0451-4000-B000-000000000000	Type/Value	LED1 State	Read state or write 01 or 00.
F000 1120 -0451-4000-B000-000000000000	Value	Button Service	*Service declaration*
F000 1121 -0451-4000-B000-000000000000	Type/Value	BUTTON0 State	Read state or subscribe to notifications
F000 1122 -0451-4000-B000-000000000000	Type/Value	BUTTON1 State	Read state or subscribe to notifications
F000 1130 -0451-4000-B000-000000000000	Value	Data Service	*Service declaration*
F000 1131 -0451-4000-B000-000000000000	Type/Value	String char	Read/Write a long string
F000 1132 -0451-4000-B000-000000000000	Type/Value	Stream char	Send or receive WriteNoRsp/Notification

Figura 2.2: Definició dels UUID [30]

El primer que cal tenir clar és que a la taula 2.1 els valors estan representats amb l'ordre en què es reben i en general els serveis estandarditzats (i també aquest servei propi) utilitzen *little-endian* per enviar la informació. Això resulta en el fet que els caràcters hexadecimals queden (per parelles, ja que, dos caràcters representen un byte) ordenats al revés.

En analitzar els atributs es pot veure com aquells que tenen l'UUID 0x2800 (que corresponen a declaracions de serveis) en el seu valor únicament contenen l'UUID corresponent a les definicions de serveis de LEDs i de botons de la figura 2.2. Seguidament, als atributs amb UUID 0x2803 hi ha les definicions de les característiques, en el seu valor hi ha múltiples parts. El primer parell hexadecimal (0x0E o 0x12, en aquest cas) correspon a les propietats. Que defineixen l'accés a l'atribut que el succeeix. Just després hi ha dos

parells hexadecimals que identifiquen el *Handle* de l'atribut on hi ha la característica. Per últim, la resta de caràcters corresponen al UUID que identifica quina característica és.

2.3.2. Propietats

Les propietats d'accés són un valor que identifica quines operacions i procediments es poden fer sobre la característica. Es poden veure les propietats principals amb els corresponents valors en la taula 2.2. El camp té 8 bits per defecte i cada un d'ells identifica una operació o procediment. Es pot utilitzar qualsevol combinació d'aquests bits per habilitar les opcions d'accés que es desitgin.

Binary	Hex	Property
0000 0001	0x01	Broadcast
0000 0010	0x02	Read
0000 0100	0x04	Write w/o Response
0000 1000	0x08	Write
0001 0000	0x10	Notification w/o ACK
0010 0000	0x20	Indication with ACK
0100 0000	0x40	Signed Writes
1000 0000	0x80	Aditional Properties

Taula 2.2: Valors de les propietats

Primer de tot, cal destacar la implementació de comunicacions amb reconeixement o sense. D'aquesta manera si es prefereix reduir la quantitat de missatges per estalviar energia en lloc d'assegurar-se que s'ha rebut la informació es dóna l'opció de no tenir reconeixements.

En el Project 0 les propietats de les característiques dels LEDs tenen el valor 0x0E que suposa 0000 1110 en binari, per tant, es permet: llegir, escriure i escriure sense resposta. En canvi les característiques del servei de botons tenen el valor 0x12 que suposa 0001 0010, per tant, es permet la lectura i la notificació sense reconeixement.

La notificació i la indicació són funcions que ajuden a reduir el consum de recursos. Quan es vol saber en quin estat estan els botons de la PCB contínuament es podria anar llegint l'estat de la característica constantment però això suposarien molts missatges i reduiria el temps que els dispositius es poden estalviar energia apagant la ràdio. Per evitar aquest cas, es pot configurar la característica tal que sigui la mateixa PCB qui enviï el missatge automàticament quan l'estat de la característica canviï. D'aquesta manera el receptor només cal que escolti els missatges de la PCB per tal de saber en quin estat està el botó.

En cas que es vulgui indicació amb reconeixements és possible configurar-ho d'aquesta manera a través de l'atribut Configuració de Característica del Client identificat amb l'UUID 0x2902 i estandarditzat en l'especificació de Bluetooth. Si el valor és 0, no hi ha transmissions; si el valor és 1, s'envien notificacions (sense reconeixement) i si el valor és 2, s'envien indicacions (notificacions amb reconeixement).

El bit d'extensió de propietats, en cas que sigui 1 indica que existeix l'atribut: Descriptor Propietats Esteses de Característica. Aquest atribut té l'UUID 0x2900 i permet afegir més propietats de les que poden existir amb l'espai limitat de 8 bits que hi ha per defecte.

Aquest sistema permet afegir fins a 16 bits més per indicar propietats, actualment els dos primers es defineixen segons l'estàndard i la resta estan reservats per a ús futur [31].

Aquests 2 primers que estan definits són escriptura fiable i escriptura auxiliar. L'escriptura fiable permet escriure valors amb un procediment diferent de l'habitual que permet assegurar-se que el valor que es vol modificar s'ha escrit sense errors. Pel que fa a l'escriptura auxiliar, indica que es pot modificar un *Characteristic User Description Descriptor* o CUDD. En el CUDD hi ha descripcions definides per l'usuari com, per exemple, "Bombeta de la cuina".

2.4. Client BLE

Per poder interactuar amb un servidor BLE és necessari tenir una implementació de client. Com que els mòbils intel·ligents tots incorporen BLE hi ha moltes aplicacions que permeten visualitzar els serveis amb les seves corresponents característiques. També permeten interactuar, escrivint o llegint aquells valors en què estigui permès. Tot i això, no totes les aplicacions ofereixen la possibilitat de rebre notificacions o utilitzar seguretat. I les aplicacions no permeten interactuar directament amb el controlador (a través de HCI), per exemple, no poden canviar la potència de transmissió.

Per poder tenir un control total del sistema l'equip de desenvolupament de programari que proporciona Texas Instruments conté l'aplicació BTool. S'utilitza conjuntament amb el projecte Host Test del mateix equip per convertir la PCB en un client BLE. El projecte Host Test permet controlar les diferents capes de la pila BLE del xip a través de la interfície sèrie.

2.4.1. Btool

L'aplicació BTool utilitza l'API del projecte Host Test per executar les crides a les diferents capes BLE. Primer de tot, BTool necessita saber per quina interfície ha d'interactuar amb la PCB. En l'administrador de dispositius de Windows es poden trobar els ports utilitzats per la PCB i els paràmetres de la connexió els indica Texas Instruments[32]. Un cop s'inicia la comunicació entre BTool i la PCB es pot escanejar, iniciar connexió i descobrir la taula d'atributs del servidor. En tot moment es poden veure tots els paquets que s'envien per la interfície amb la seva corresponent interpretació en la consola. Com que en aquesta consola apareixen tots els esdeveniments de BLE 5, permet veure quan es reben notificacions. Un cop s'ha establert la connexió es pot interactuar amb la taula d'atributs directament.

2.5. Crear un Perfil propietari

Per poder implementar una xarxa de sensors amb BLE serà necessari dissenyar un esquema propi en el servidor GATT. Tal com s'ha comentat anteriorment el servidor GATT està format per perfils que alhora agrupen serveis. Aquests serveis són els que contenen les característiques amb què s'interactuarà per intercanviar informació. A continuació s'explicarà com es poden implementar perfils en l'entorn de Texas Instruments BLE Stack.

2.5.1. Generar fitxers

Texas Instruments proporciona un Generador de Fitxers [33] que evita haver de començar de zero. En aquesta eina s'han de definir el nom del servei, els noms de les característiques amb la seva longitud i les propietats; i els corresponents UUID. Aquesta eina està pensada per a ser utilitzada junt amb el Project 0, per tant, aquest serà el projecte base per aquest treball. Un cop s'han generat els fitxers cal copiar-los dins d'Application/-services en el projecte.

A parts dels fitxers generats (font i capçalera[2]) també cal que l'aplicació cridi a la funció que incialitza el servei registrant-los al GATT. Aquesta és la funció [Perfil]_AddService(..) que cal afegir dins la funció ProjectZero_init() en la secció Inicialització de Serveis.

Tot i que, aquest generador de fitxers és molt útil a l'hora de tenir una estructura bàsica del projecte cal analitzar les parts importants per entendre com funciona per dins i quina relació té cada part amb BLE.

2.5.2. Definir el perfil propi

En l'explicació de com es pot definir un perfil propi s'utilitzaran parts del codi desenvolupat per al projecte final.

Per poder desenvolupar un perfil propi cal seguir els següents passos. Cada característica necessita: un identificador per poder-la classificar, l'UUID que té assignat i la longitud de dades que tindrà. Aquests valors es defineixen en el fitxer capçalera del perfil.

```
#define TEMPERATURE_UUID 0x2345
#define temperatureID 0
#define temperatureLen 2

#define humidityID 1
#define humidityLen 2
#define HUMIDITY_UUID 0x3456

#define heartRate 2
#define heartRateLen 2
#define HEARTRATE_UUID 0x4567

#define bloodOxygen 3
#define bloodOxygenLen 2
#define BLOODOXYGEN_UUID 0x5678
```

En aquest cas tots els UUID tenen 4 caràcters que suposen 16 bits. Però només es poden tenir UUID de 16 bits si estan reservats i aquest no és el cas. Els 4 caràcters acabaran només sent part de l'UUID final que tindrà 128 bits un cop s'hi hagi afegit farciment. Això es fa utilitzant la funció TI_BASE_UUID_128 que converteix els 16 bits a 128 amb el format F000XXXX-0451-4000-B000-000000000000 que és el que ve per defecte.

```
CONST uint8_t environmentalServiceUUID[ATT_UUID_SIZE] =
{TI_BASE_UUID_128(ENVIRONMENTALSERVICE_SERV_UUID)};
```

[2] Els fitxers de capçalera en C s'identifiquen per l'extensió .h i contenen les declaracions de funcions que es poden compartir entre múltiples fitxers font

```
CONST uint8_t temperatureUUID[ATT_UUID_SIZE]=
{TI_BASE_UUID_128(TEMPERATURE_UUID)};

CONST uint8_t humidityUUID[ATT_UUID_SIZE]=
{TI_BASE_UUID_128(HUMIDITY_UUID)};

CONST uint8_t heartrateUUID[ATT_UUID_SIZE]=
{TI_BASE_UUID_128(HEARTRATE_UUID)};

CONST uint8_t bloodoxygenUUID[ATT_UUID_SIZE]=
{TI_BASE_UUID_128(BLOODOXYGEN_UUID)};
```

Posteriorment cal assignar l'espai necessari per poder emmagatzemar les dades de les característiques.

```
static uint8_t temperatureVal[temperatureLen] = {0x00};
static uint8_t tempProps = GATT_PROP_READ;

static uint8_t humidityVal[humidityLen] = {0x00};
static uint8_t humidityProps = GATT_PROP_READ;

static uint8_t heartRateVal[heartRateLen] = {0x00};
static uint8_t heartRateProps = GATT_PROP_READ;

static uint8_t bloodOxygenVal[bloodOxygenLen] = {0x00};
static uint8_t bloodOxygenProps = GATT_PROP_READ;
```

Tal com es pot observar s'assigna tant espai com s'ha definit prèviament. Els valors se'ls inicialitza a 0 i es defineix quines propietats tindran.

Una de les parts més importants de BLE i conseqüentment del servei és la taula d'atributs. A continuació es pot veure com queda la taula definida en el codi[3].

```
static gattAttribute_t environmentalServiceAttrTbl[] =
{
  { { ATT_BT_UUID_SIZE, primaryServiceUUID },
    GATT_PERMIT_READ,
    0,
    (uint8_t *)&environmentalServiceDecl  },
  { { ATT_BT_UUID_SIZE,  characterUUID},
    GATT_PERMIT_READ,
    0,
    &tempProps    },
  { { ATT_UUID_SIZE, temperatureUUID},
    GATT_PERMIT_READ,
    0,
    temperatureVal  },
  { { ATT_BT_UUID_SIZE,  characterUUID},
    GATT_PERMIT_READ,
    0,
    &humidityProps  },
  { { ATT_UUID_SIZE, humidityUUID},
    GATT_PERMIT_READ,
    0,
    humidityVal
  },
};
```

[3]En aquest extracte de codi només s'inclouen la declaració del servei i les dues primeres característiques.

La taula en codi està formada per un llistat d'atributs, l'estructura d'aquests ve definida en el fitxer gatt.h i s'anomena gattAttribute_t. Cada objecte està format per quatre parts que són les següents:

- L'UUID, al que cal afegir com a prefix la longitud que té.

- Les propietats que té l'atribut, que determinen quin tipus de permisos.

- El *Handle* que cal deixar a 0, ja que s'assigna internament pel servidor.

- El valor en si de l'atribut que té una longitud màxima de 512 bytes

En cas de voler assignar més d'una propietat a la característica es pot fer utilitzant l'operador OR (en C correspon al símbol |). Un exemple seria el següent:

```
GATT_PERMIT_READ | GATT_PERMIT_WRITE
```

El fitxer gatt.h, que s'inclou dins del fitxer font, conté les definicions de tots els possibles permisos amb els seus valors en bits corresponents.

Per llegir o modificar els valors de les característiques és important fer-ho de forma segura i així evitar problemes com el desbordament de memòria intermèdia (*Buffer Overflow* en anglès) que poden ocórrer si s'escriuen valors no vàlids. És per això que, en cada servei hi ha funcions de *callback*. Les funcions *get* i *set* s'utilitzen per llegir o modificar els valors que s'exposen a través de BLE. Quan en algun punt del codi és necessari interactuar amb aquests valors es farà amb aquestes funcions. Un exemple de la funció *get* és el següent:

```
bStatus_t EnvironmentalService_GetParameter(
  uint8_t param, uint8 len, void *value )
{
  bStatus_t ret = SUCCESS;
  switch ( param )
  {
    case temperatureID:
      memcpy(value, temperatureVal, len);
    case humidityID:
      memcpy(value, humidityVal, len);
    default:
      ret = INVALIDPARAMETER;
  }
  return ret;
}
```

En aquest exemple, es passa en els arguments: l'identificador de la característica (*param*), la longitud d'aquesta (*len*) i un punter on s'hi copiarà el valor (**value*). La funció retorna un valor on indica si s'ha trobat o no la característica.

Per poder implementar notificacions cal que la característica tingui un *Client Characteristic Configuration Descriptor* o CCCD. El CCCD és un atribut més en la taula que cal posar just després de l'atribut on hi ha el valor de la característica i en codi quedaria de la següent manera[4].

[4]En aquest cas, l'exemple és del CCCD corresponent al botó 0 de la PCB que es troba al servei de botons del Project 0

```
{
  { ATT_BT_UUID_SIZE, clientCharCfgUUID },
  GATT_PERMIT_READ | GATT_PERMIT_WRITE,
  0,
  (uint8_t *)&bs_BUTTON0Config
},
```

Com que l'UUID correspon al d'un CCCD cal que sigui 0x2902 que està a la variable *clientCharCfgUUID*. La longitud de l'UUID és de dos bytes i s'indica amb la variable *ATT_BT_UUID_SIZE*. La configuració per defecte és que s'enviaran notificacions a aquells dispositius que escriguin un 1 o Indicacions als que escriguin un 2. Però perquè el servidor sàpiga que ha de fer aquestes operacions cal executar la funció *GATTServApp_ProcessCharCfg* que ha d'estar en la funció *set* del servei.

CAPÍTOL 3. PROJECTE DE SENSORS

En aquest capítol es realitzarà un escenari real on s'implementarà la tecnologia BLE per transmetre dades. Primerament es realitzaran proves per mesurar les capacitats del protocol i de la PCB utilitzats.

3.1. Experimentació

A fi d'entendre millor com afecten els diferents paràmetres configurables corresponents a BLE i també les prestacions dels perifèrics de la PCB, s'han realitzat els següents escenaris.

3.1.1. Abast

Com ja s'ha mencionat anteriorment l'abast teòric que té BLE és considerable comparat amb tecnologies similars. Però, cal entendre que, a l'estar utilitzant la banda de 2.4 GHz, l'abast de BLE dependrà de l'entorn, on pot haver-hi molta variabilitat d'interferències. A causa d'això, en un escenari realista l'abast que es pot assolir pot ser molt diferent del teòric. Les LAUNCHXL-CC1352R1 utilitzades en aquest projecte, per si soles, no són l'eina perfecta per fer proves d'abast. Això es deu, en part, a què no és possible transmetre a la màxima potència permesa per l'estàndard que és de fins a 20 dBm. El límit és de 5 dBm i per defecte només s'utilitzen 0 dBm de potència en transmissió.

Per realitzar un experiment que fos més precís seria avantatjós utilitzar una antena externa més directiva. En lloc d'analitzar l'abast de la tecnologia en aquest apartat es farà un balanç comparatiu per comprovar les diferències reals d'utilitzar les diferents capes físiques de BLE.

Per a aquest apartat s'ha realitzat un experiment pràctic en un lloc relativament aïllat i on es pogués tenir una suficient distància amb visibilitat directa. S'ha escollit un pàrquing i utilitzat la potència per defecte de 0 dBm per poder treballar amb distàncies més curtes.

El procediment per realitzar l'experiment va ser col·locar una de les plaques sobre un cotxe i amb l'altre connectada a un altre ordinador anar retrocedint fins que es perdés la connexió. Per forçar que es perdés la connexió quan ja no es podia establir una comunicació des de la PCB que s'anava movent s'anaven enviant peticions de lectura d'atributs.

Els resultats obtinguts, que es poden veure en la figura 3.1, indiquen que la distància màxima d'abast del dispositiu en una capa 2M és de 75 metres, mentre que en una capa S=8 aquesta distància s'estén fins als 135. S'han tingut en compte únicament aquestes capes físiques, ja que com que no hi ha interferències significatives i sempre s'ha mantingut la visibilitat directa, els resultats de la capa 1M són similars als de 2M i els de Coded S=2 són similar als de S=8.

Un cop realitzat l'experiment s'han validat, tal com s'havia comentat anteriorment, els avantatges que aporta la nova capa física Coded que no existia abans de la versió 5.0 de BLE. En aquest rang amb visibilitat directa es pot considerar que BLE podrà assolir cobertura suficient dins les cases a través de parets.

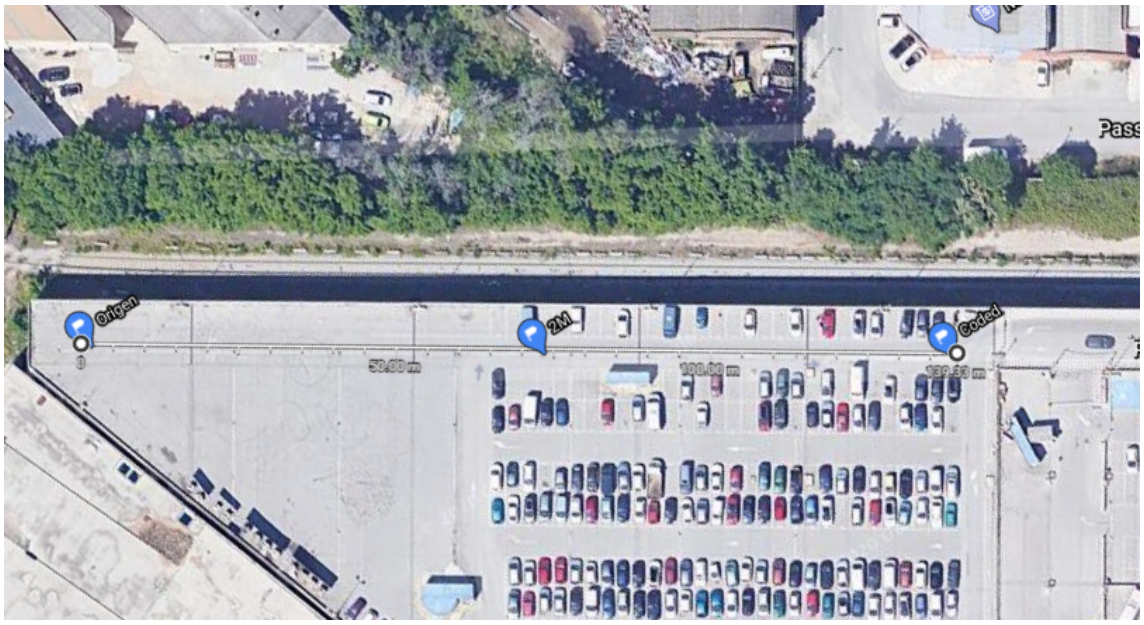


Figura 3.1: Abast real de BLE

Així doncs, en aquest apartat s'ha vist una de les millores de la capa física Coded, l'abast. Però també cal recordar que on és extremadament útil és en el de resistència a les interferències.

3.1.2. Consum d'energia

El consum dels dispositius que utilitzen BLE és la característica més significativa, ja que, aquesta tecnologia està dissenyada per a consumir la menor quantitat d'energia possible. Les plaques utilitzades tenen ponts extraïbles, tal com es pot veure en la figura 3.2, que permeten desconnectar els components que no són essencials per al funcionament del xip CC1352R.

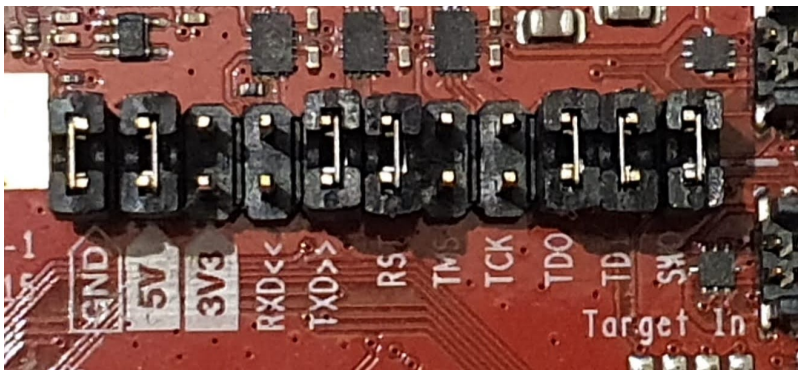


Figura 3.2: Ponts extraïbles de la PCB

D'aquesta manera, es pot utilitzar un analitzador de potència per mesurar l'energia consumida. Aquesta configuració produeix una mesura molt precisa i permet calcular el cicle de vida del dispositiu que s'està desenvolupant. Per contra, no es poden utilitzar les eines

de desenvolupament com la depuració del codi. Aquesta configuració no ha estat possible realitzar-la a causa de la situació sanitària actual.

Per poder desenvolupar fàcilment un projecte i analitzar els canvis que el codi produeix en l'ús d'energia, existeix una eina anomenada Energy Trace. D'aquesta manera, es pot analitzar comparativament en quin moment s'està consumint l'energia i es poden adaptar els paràmetres de la connexió per observar quin serà l'estalvi que s'aconseguirà. És per això que, es poden prendre les decisions de quins sacrificis són assumibles, per exemple, augmentar la latència a canvi de reduir el consum. Aquesta eina però, no substitueix la solució explicada anteriorment amb l'analitzador de potència, ja que l'Energy Trace resulta molt menys precisa.

Per provar el funcionament de l'Energy Trace s'ha utilitzat durant l'execució en el xip del Project Zero. A la figura 3.3 es pot observar una captura del consum aproximat de corrent.

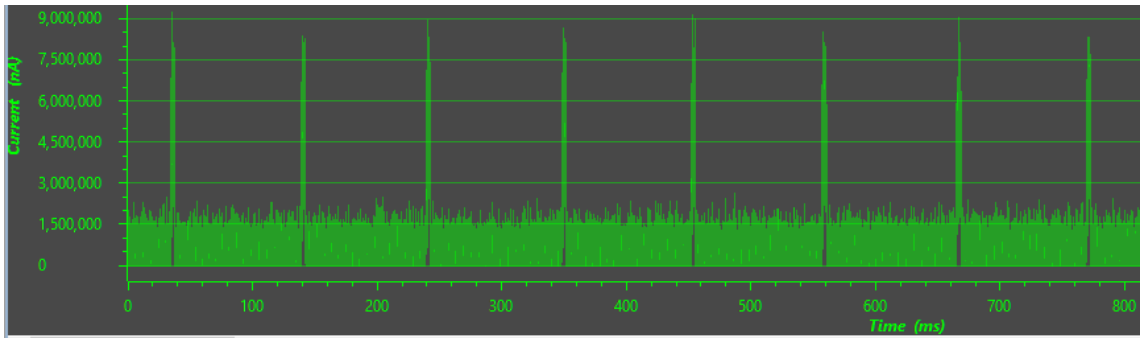


Figura 3.3: Mesura de corrent sense connexió

És possible visualitzar com hi ha pics de consum cada 100 ms, aquests corresponen als instants en què el dispositiu està enviant els anuncis. Aquests 100 ms corresponen a l'interval d'anunci que s'ha configurat per a aquest projecte.

També és possible mesurar el consum d'energia acumulada de la PCB al llarg del temps, en aquest cas s'ha realitzat durant un segon i es pot veure a la figura 3.4.

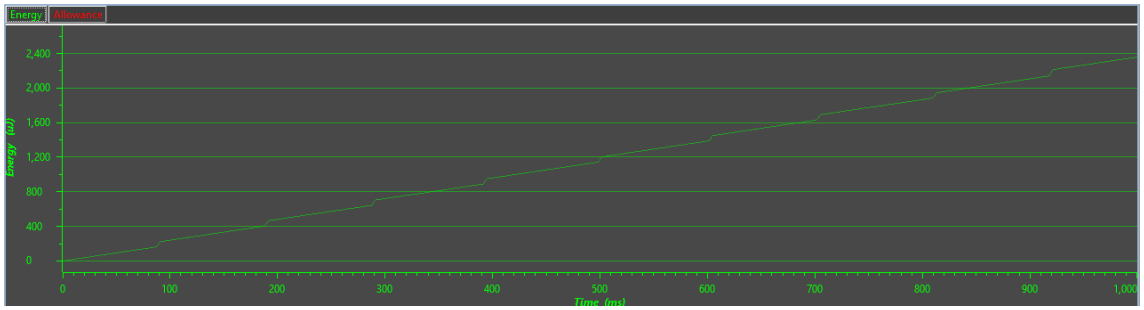


Figura 3.4: Mesura d'energia sense connexió

Un cop s'estableix una connexió amb el dispositiu es realitza una altra captura del corrent que es pot observar a la figura 3.5.

A la gràfica és possible veure com segueixen estant els pics cada 100 ms però també n'hi ha cada 40 ms. Aquests, darrers, es deuen als esdeveniments de connexió que en aquest cas estan configurats perquè es produeixen cada 40 ms.

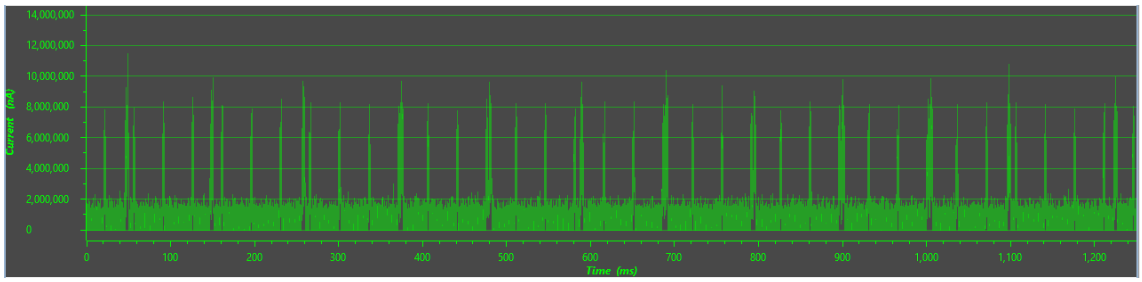


Figura 3.5: Captura d'Energy Trace 2

En aquestes captures de consum de corrent, tot i que hi ha molta variació, es pot comprovar que mentre no es transmeten paquets, el consum és d'entre 0 i 2 mA.

També, es realitza una captura del consum d'energia acumulat durant un segon:

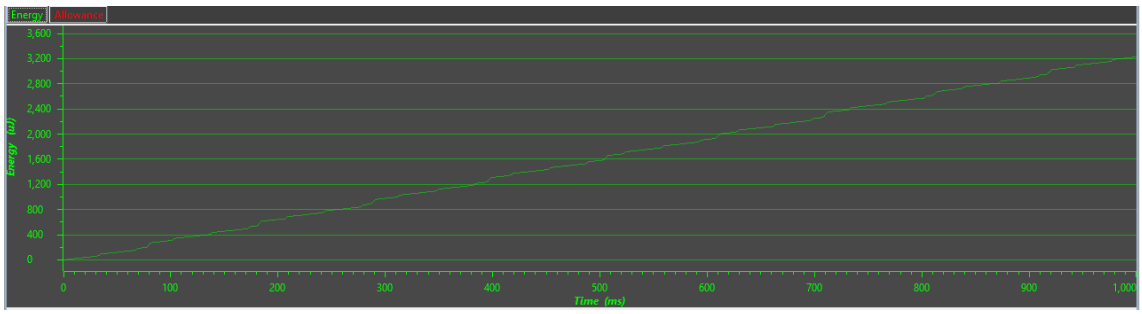


Figura 3.6: Captura d'Energy Trace 2

Els màxims que es produeixen per anuncis i per esdeveniments de connexió poden semblar similars en les captures de consum de corrent. Tanmateix, no és així, en les captures de consum d'energia es pot observar com hi ha increments més pronunciats corresponents als anuncis i en canvi els esdeveniments de connexió els increments són més lleugers.

Si es veuen amb més detall l'anunci i l'esdeveniment es pot observar com són d'una duració diferent. D'una banda, l'anunci dura uns 4 mil·lisegons i mig, en canvi l'esdeveniment de connexió només dura 2 mil·lisegons.

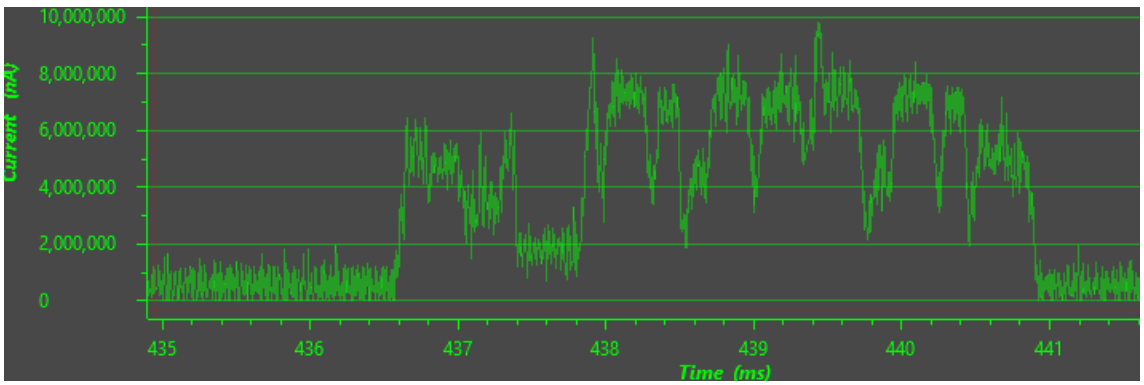


Figura 3.7: Captura d'anunci

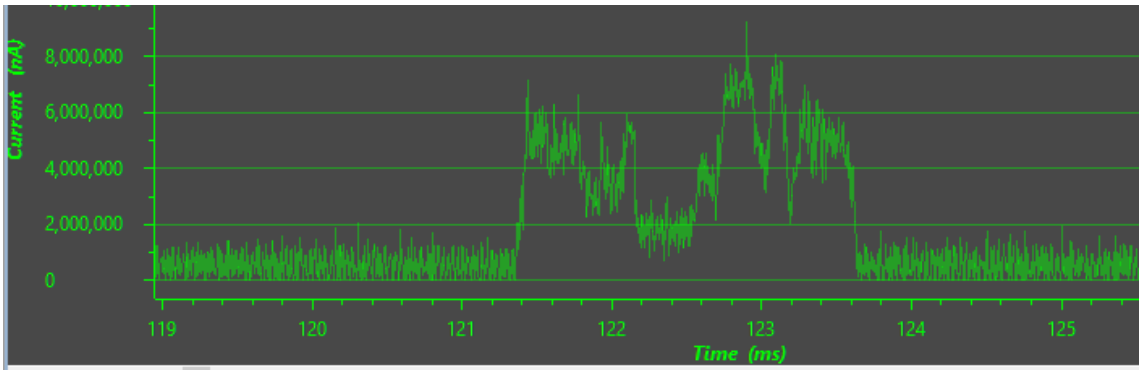


Figura 3.8: Captura d'esdeveniment

Aquesta eina, per tant, està orientada a facilitar una idea comparativa d'en quins instants es consumeix més energia. D'aquesta manera, és més fàcil pel desenvolupador comprovar com els canvis en el codi afecten el consum d'energia.

A part dels gràfics, l'Energy Trace també proporciona directament les dades més rellevants de les captures. A la taula 3.1 es troben els valors importants.

	Temps de Mesura (s)	Energia (mJ)	Potència (mW)		Corrent (mA)		Temps de Vida
			mitjana	màxim	mitjana	màxim	
Sense Connexió	10	23,87	2,387	34,566	0,723	10,475	11 dies i 12 hores
Amb Connexió	10	32,57	3,257	41,672	0,987	12,63	8 dies i 10 hores

Taula 3.1: Taula amb els valors

Per aquests valors s'han pres mesures de 10 segons de duració per obtenir unes mitjanes més representatives d'un ús continu. Es pot observar com la potència i corrent màxim consumits, tant amb connexió com sense, no són molt diferents entre si. Això es deu al fet que independentment de si el dispositiu té conexions establertes, s'enviaran els anuncis que suposen el pic més important de les gràfiques amb el consum de corrent.

Els paràmetres amb els quals s'ha pres la mesura no estan optimitzats específicament per a un consum molt baix, tot i això, es pot observar com la mitjana de consum és molt reduïda, per sota d'1 mA. Per contextualitzar com és de baix aquest consum, és habitual calcular un temps de vida estimat d'una pila de botó, en aquest cas s'utilitza la CR2032. En aquest cas, el temps de vida, tenint en compte la connexió seria de 8 dies. Altrament, sense connexió aquest temps de vida s'allargaria fins als onze dies i mig. Per tant, el temps de vida s'assimilarà més a 8 o 11 dies depenent del temps en què el dispositiu es passi amb alguna connexió.

Per contextualitzar-ho més, si utilitzéssim una bateria habitual en els telèfons mòbils que tingués 3800 mAh suposaria un temps de vida de 160 amb connexió i 219 dies sense, uns 7,3 i 5,3 mesos corresponentment.

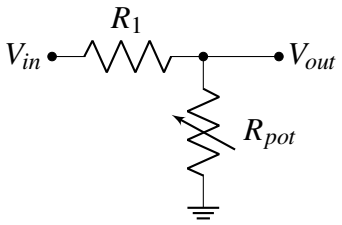
3.2. Lectura de l'ADC

El *Analogic to Digital Converter* és un perifèric de la PCB que permet convertir un senyal analògic a un digital. Per poder realitzar la lectura amb l'ADC, és necessari dissenyar un circuit per simular el senyal que produiria un sensor i també desenvolupar el codi necessari perquè la PCB prengui la mesura. A continuació s'explicaran aquests processos.

3.2.1. Disseny del simulador de sensors

La PCB té un convertidor analògic-digital que ens permetrà enviar senyals analògics un cop s'han mostrejat. En aquest treball no es tractaran directament els sensors sinó que es simularan els senyals que produirien. Com que la PCB i el seu ADC treballen a 3,3V es crearà un circuit que permeti controlar un voltatge d'entre 0 i 3,3V.

Aquest circuit es basarà en un divisor de voltatge simple format per una resistència i un potenciòmetre. El potenciòmetre permet canviar la resistència de l'element a través d'un cargol i junt amb el circuit que l'envolta permetrà canviar el voltatge a la sortida.



Aquest circuit segueix l'estructura d'un divisor de voltatge per tant es pot calcular el voltatge a la sortida segons la següent fórmula.

$$V_{in} \cdot \frac{R_{pot}}{R_1 + R_{pot}} = V_{out} \tag{3.1}$$

Per escollir els components cal tenir en compte utilitzar resistències de valor alt per reduir el consum d'energia. S'utilitzarà un potenciòmetre de 10$k\Omega$ per tant serà una resistència que es podrà modificar des de 0Ω fins 10$k\Omega$. Per trobar l'R_1 que compleixi els requisits queda la següent fórmula.

$$R_1 = 5V \cdot \frac{10k\Omega}{3.3V} - 10k\Omega \approx 5151\Omega \tag{3.2}$$

Per a l'R_1 s'utilitzaran resistències de la sèrie E12, els valors que més s'acosten a $5{,}121\Omega$ són $5.6k\Omega$ i $4.6k\Omega$. Per assegurar-se que no es superen els 3.3V a l'entrada de l'ADC que podria malmetre el dispositiu s'escull la resistència superior, per tant el circuit final s'ha dissenyat de la següent manera.

Com que s'utilitzaran 4 canals de l'ADC per mesurar, es necessiten 4 circuits com el que s'ha dissenyat. S'ha implementat el circuit en una placa de proves i soldat els components de tal manera que cal connectar el voltatge d'entrada (a 5V) en vermell, terra en negre i finalment quatre cables blaus on hi haurà el voltatge controlat pels quatre potenciòmetres. A la figura 3.9 es pot observar aquesta implementació real del circuit.

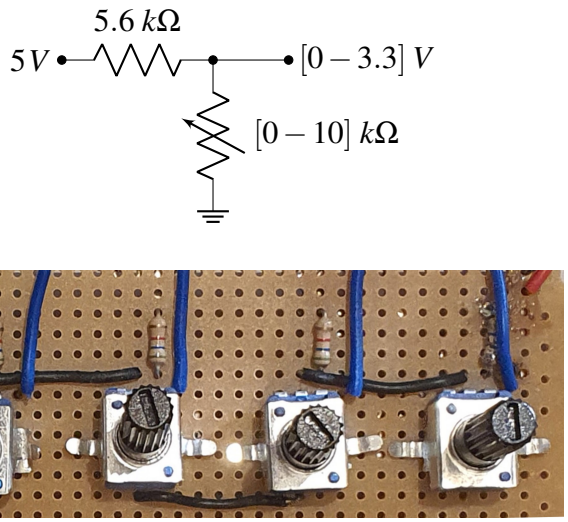


Figura 3.9: Protoboard amb el circuit

3.2.2. Desenvolupament i implementació del codi

Tal com s'ha comentat anteriorment la PCB que s'està utilitzant conté un ADC de dotze canals que s'utilitza per llegir valors de voltatge.

En aquest exemple, l'objectiu és aconseguir la lectura dels valors del voltatge d'un pin de la PCB. El següent codi permet fer una mesura del canal que s'indiqui a través de l'argument. Inicialitza l'ADC de la PCB, pren le mesura i posteriorment retorna el resultat en mil·livolts.

```
static uint16_t takeMeasurement(uint_least8_t adcIndex){
  ADC_Handle adc;
  ADC_Params params;
  ADC_init();
  ADC_Params_init(&params);
  adc = ADC_open(adcIndex, &params);
  if (adc == NULL){
    Log_info0("ADC start Failed");
    while(1);
  }
  int_fast16_t res;
  uint16_t adcValue;
  res = ADC_convert(adc, &adcValue);

  if (res == ADC_STATUS_SUCCESS) {
    Log_info1("ADC result %d mV", adcValue);
  }
  else {
    Log_info0("ADC status failure");
  }
  ADC_close(adc);
  return adcValue;
}
```

Finalment, cal canviar el codi de BLE perquè quan es llegeixin els atributs es retorni el valor mesurat a l'ADC. Per tant cal canviar la funció environmentalService_ReadAttrCB tal com es veu a continuació.

```
  if(!memcmp(pAttr->type.uuid, temperatureUUID, pAttr->type.len))
{
  uint16_t adcValue = takeMeasurement(Board_ADC0);
  *pLen = (uint16_t)temperatureLen;
  memcpy(pValue, &adcValue, *pLen);
}
else if(!memcmp(pAttr->type.uuid, humidityUUID, pAttr->type.len))
{
  uint16_t adcValue = takeMeasurement(Board_ADC1);
  *pLen = (uint16_t)humidityLen;
  memcpy(pValue, &adcValue, *pLen);
}
```

3.3. Aplicació mòbil

Per veure un exemple simplificat d'un client que consumís els serveis oferits per la PCB, s'ha realitzat un desenvolupament propi d'una aplicació per a Android. Aquesta aplicació llegeix contínuament els valors dels quatre atributs que té la PCB que corresponen amb els sensors.

Per poder interactuar amb la PCB el primer que cal és tenir en compte l'adreça del dispositiu i els identificadors, tant del servei, com dels atributs. Aquests es poden veure a la taula 3.3..

Identificador	Valor
deviceAddress	00:81:F9:4A:4D:B3
serviceUUID	f0001234-0451-4000-b000-00000000
temperatureUUID	f0002345-0451-4000-b000-000000000000
humidityUUID	f0003456-0451-4000-b000-000000000000
heartRateUUID	f0004567-0451-4000-b000-000000000000
bloodOxygenUUID	f0005678-0451-4000-b000-000000000000

Taula 3.2: Tipus d'anunciaments

Per realitzar l'aplicació d'Android cal declarar que requereix els permisos de Bluetooth i específicament de Bluetooth Low Energy.

```
  <uses-permission android:name="android.permission.BLUETOOTH"/>
  <uses-feature android:name="android.hardware.bluetooth_le"
    android:required="true"/>
```

Per implementar el BLE en Android s'ha utilitzat la llibreria nativa que es pot trobar a [34] i s'ha seguit la guia que es troba a [35].

Primerament, per poder utilitzar BLE, s'inicialitza l'adaptador corresponent.

```
final BluetoothManager bluetoothManager =
  (BluetoothManager) getSystemService(Context.BLUETOOTH_SERVICE);
BluetoothAdapter bluetoothAdapter = bluetoothManager.getAdapter();
```

A continuació es comença a escanejar per buscar dispositius. Per fer-ho es defineix una funció de *callback* que filtrarà els dispositius per comprovar que es troba el que es vol.

```
bluetoothLeScanner.startScan(leScanCallback);
```

La funció leScanCallback quan trobi el dispositiu al qual vol connectar-se, deixarà d'escanejar i procedirà a intentar connectar-s'hi.

```
if(result.getDevice().getAddress().equals(deviceAddress)){
  bluetoothLeScanner.stopScan(leScanCallback);
  device = result.getDevice();
  bluetoothGatt = device.connectGatt(getApplicationContext(), false,
   gattCallback);
}
```

A l'establir la connexió es descobreixen els serveis del dispositiu. S'obté el servei específic que volem i es llegeixen les característiques corresponents.

```
BluetoothGattService service = gatt.getService(
  UUID.fromString(serviceUUID));
characteristicList = service.getCharacteristics();
readCharacteristic(gatt);
```

Per cada característica que es llegeix, per obtenir el seu valor tal com es vol i no com l'envia BLE (en little-endian), cal especificar el format que té. En aquest cas, com que s'han definit en 2 bytes les longituds de les característiques en la PCB, cal especificar que són nombres enters *unsigned* (sense signe) codificats en 16 bits.

```
int characteristicValue = characteristic.getIntValue(
BluetoothGattCharacteristic.FORMAT_UINT16, 0);
```

Les dades que s'estan transmetent per cada atribut corresponen al valor del voltatge. Tot i això, per caracteritzar aquestes dades a l'aplicació s'interpreten com si fossin valors plausibles de les mesures que s'estan prenent. Igualment, es mostra tant una barra de progrés com el valor real de mil·livolts per cada mesura de la PCB. Però per poder mostrar aquests valors no es pot fer directament. El codi de BLE és asíncron i es troba en un fil d'execució (*thread* en anglès) diferent al que controla la interfície d'usuari. Per poder compartir valors entre threads cal utilitzar un *handler*.

Per passar múltiples valors cal fer-ho de la següent manera.

```
Bundle bundle = new Bundle();
bundle.putString("value", Integer.toString(characteristicValue));
bundle.putString("characteristic",characteristic.getUuid().toString());
Message message = new Message();
message.obj = bundle;
updateHandler.sendMessage(message);
```

Aquests valors es reben a una funció que ja sí que pot modificar la interfície d'usuari i s'obtenen tal i es mostra en el codi a continuació.

```
 Handler updateHandler = new Handler(){
  @Override
  public void handleMessage(@NonNull Message msg) {
    super.handleMessage(msg);
    Bundle data = (Bundle) msg.obj;
    String characteristic = data.getString("characteristic");
    String value = data.getString("value");
    ...
  }
}
```

Abans de modificar la interfície cal adaptar els valors que es reben per mostrar-los representant els sensors que s'han simulat. Es suposa que els valors rebuts estaran entre 0 i 3000 que són els milivolts que ha llegit l'ADC de la PCB. Cada mesura es caracteritza diferent, a continuació es pot observar el cas de la temperatura.

```
switch (characteristic) {
 case temperatureUUID: {
   int val = Integer.parseInt(value);
   int progress = val * 30 / 3000;
   TextView tmpConverted =findViewById(R.id.temperatureConverted_lbl);
   TextView temperatureRaw = findViewById(R.id.temperatureRaw_lbl);
   ProgressBar pb = findViewById(R.id.temperature_pb);
   tmpConverted.setText(progress + "C");
   temperatureRaw.setText(value + "mV");
   pb.setProgress(progress);
   break;
 }
```

En aquest cas, la temperatura s'assumeix que tindrà valors des de 0 fins a 30 graus. Finalment, es calcula el seu valor en graus i es canvia la interfície perquè representi el valor. El codi complet de l'aplicació que s'ha realitzat es pot trobar a [36].

3.4. Escenari

Finalment, un cop desenvolupat el circuit per simular sensors, el codi necessari per mostrejar i transmetre els valors i una aplicació per rebre aquests valors, l'escenari és el següent.

El circuit que simula els 4 sensors es connecta als pins de la PCB (veure apèndix A) que tenen ADC segons el manual de la PCB que es pot trobar a [37] seguint la taula 3.3.

ADC	DIO	PIN
0	23	2
1	24	6
2	25	23
3	26	24

Taula 3.3: Taula dels pins amb ADC

Les connexions des del circuit fins a la PCB es fan a través dels ports que proporciona la PCB a la seva part de darrere que es veuen a la figura 3.10.

Un cop fetes les connexions, cal executar el codi de la PCB i clicar el botó d'escanejar de l'aplicació. Cal tenir en compte que durant el procés d'escaneig, degut a la configuració de BLE, sempre és possible (tot i que poc probable) que el mòbil no descobreixi la PCB un cop transcorregut el temps establert. En aquest cas, cal tornar a clicar el botó d'escaneig. Un cop l'aplicació està escanejant es poden canviar les posicions dels potenciòmetres i s'observa com els valors corresponents en el mòbil canvien amb poca latència. Es pot veure una captura del disseny de l'aplicació a la figura 3.11.

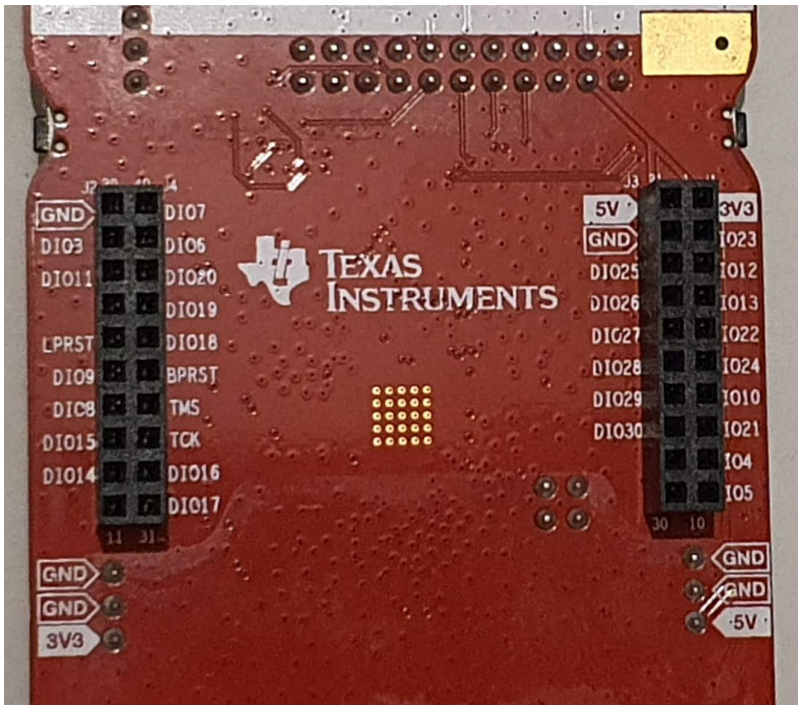


Figura 3.10: Ports de la PCB

3.5. Continuitat del projecte

Un cop executat el projecte i entès tant la tecnologia Bluetooth Low Energy com l'entorn de desenvolupament, hi ha aspectes en els quals és possible profunditzar més. Aquestes es podrien tractar en un altre futur treball.

Tal com s'ha esmentat quan s'ha realitzat l'estudi del consum d'energia utilitzant Energy Trace, els valors obtinguts no es poden considerar absoluts. És per això que, per poder determinar el temps de vida amb diferents configuracions del BLE s'hauria de mesurar el consum amb un oscil·loscopi mentre la PCB està configurada amb la font d'alimentació externa.

La implementació pràctica de BLE que s'ha realitzat no utilitza cap servei propietari. Seria interessant implementar un servei estandarditzat i tenir algun dispositiu comercial que pogués connectar-se a la PCB.

Finalment, tot i haver-se desenvolupats projectes que permeten mesurar els voltatges dels ADC i emetre notificacions, per part de BLE, no s'ha aconseguit que sigui alhora.

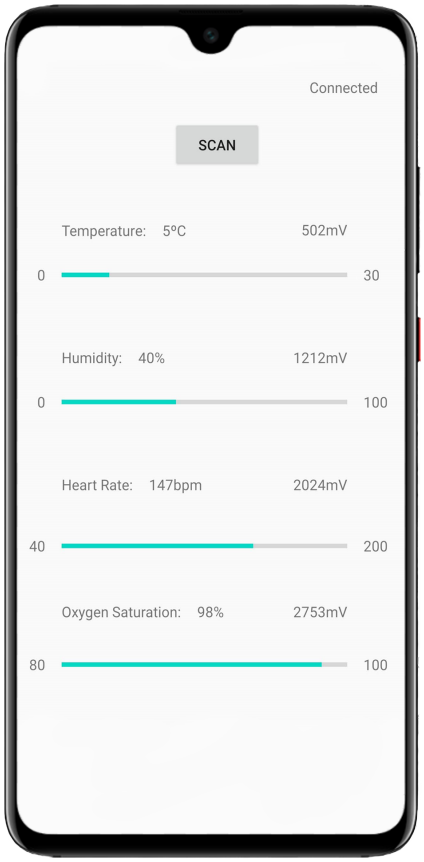


Figura 3.11: Aplicació mòbil

CONCLUSIONS

Aquest projecte serveix per considerar si BLE és la tecnologia adequada per a les aplicacions de mesures mediambientals o biològiques.

Abast

Com s'ha comentat, l'abast de la tecnologia BLE ve limitat tant per la distància entre transmissor i receptor com per les interferències. En mesures biològiques es pot considerar que el transmissor i el receptor estaran relativament a prop, per tant, no hi haurà problemes d'abast. En canvi, per a mesures ambientals si considerem instal·lacions privades en habitatges, cal tenir en compte els obstacles que s'oposen al senyal. També cal considerar la interferència més que probable de les tecnologies amb les quals BLE comparteix espectre com wifi, altres dispositius intel·ligents o amb Bluetooth Clàssic mateix. Per combatre aquests desavantatges BLE té múltiples estratègies. Primerament, sempre és possible augmentar la potència de transmissió (fins al límit permès), però reduint el cicle de vida de la bateria. També es poden utilitzar capes físiques que implementen més redundància (*LE Coded*). Finalment, BLE implementa salts en freqüència i la *Slot Availability Mask* per combatre interferències.

Totes aquestes tècniques augmenten la complexitat del protocol però ajuden a poder tenir un gran abast. A més a més, BLE utilitza canals de freqüència estrets comparats amb altres tecnologies com wifi per tant, les interferències afecten menys a BLE que a altres tecnologies amb canals més amples.

Consum d'Energia

BLE és dels protocols que permet consumir menys energia per a transmetre informació. Això només serà un avantatge quan els sensors estiguin alimentats per bateria i la transmissió sigui el que consumeix més energia de tot el sistema. Si els sensors tenen pantalles, s'alimenten de la instal·lació elèctrica, fan un processament de les dades o emmagatzemen les dades localment; és possible que el consum de la transmissió no sigui significant. En aquests casos no s'ha d'escollir el protocol de transmissió segons el consum, ja que el temps entre recàrregues no es veu especialment afectat pel protocol.

En els escenaris on és important tenir un consum baix d'energia, el protocol BLE és una molt bona opció. Com ja s'ha comentat múltiples vegades, BLE defineix moltes opcions d'implementació i això suposa una flexibilitat molt important. Aquesta flexibilitat permet, per exemple, poder prescindir de les transmissions redundants com el reconeixement. Tanmateix, es pot utilitzar la latència d'esclau per reduir els esdeveniments d'una connexió quan no són necessaris. També, permet transmetre molta informació sense necessitat d'establir una connexió.

Així doncs, poder evitar realitzar tots aquests procediments permet reduir significativament el consum que suposa la transmissió de dades i fa possible augmentar el cicle de vida de la bateria o reduir la mida d'aquesta. Gràcies a BLE és possible que dispositius no hagin d'estar connectats a cap altre dispositiu a través de cables ni a la xarxa elèctrica.

Penetració del mercat

Quan en un projecte hi ha usuaris involucrats d'alguna manera, és molt probable que el telèfon mòbil sigui un component important. BLE té el gran avantatge que ve incorporat en tots els mòbils intel·ligents. Això facilita l'ús, ja que els usuaris estan més acostumats, i simplifica l'arquitectura d'un desplegament. L'arquitectura és més simple perquè el mateix dispositiu mòbil és el receptor de les dades. En cas de no utilitzar BLE, no hi ha cap tecnologia de baix consum que es pugui connectar directament amb els telèfons dels usuaris. Altres tecnologies acostumen a utilitzar un dispositiu entre els sensors i els usuaris que s'anomena concentrador o *hub*. A l'afegir un nou dispositiu s'incrementa el cost d'un desplegament. A més a més, augmenta la complexitat del flux de dades i també incrementa l'ús de la banda freqüencial, ja que calen més transmissions per la mateixa quantitat d'informació.

En canvi, en el cas de connexió directa fins al terminal de l'usuari BLE és perfecte. No només està present en telèfons mòbils sinó també en: joguines, televisors, electrodomèstics, càmeres, comandaments a distància, entre d'altres... En total es preveu la producció de 7.500 milions de dispositius entre 2020 i 2024 amb un creixement del 26% anual segons el SIG [38].

BIBLIOGRAFIA

[1] Bluetooth Special Interest Group “Bluetooth Core Specification“ (Revision 5.2)

[2] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA; TERMCAT, CENTRE DE TERMINOLOGIA; ENCICLOPÈDIA CATALANA. Diccionari de telecomunicacions [en línia]. Barcelona: TERMCAT, Centre de Terminologia, cop. 2017. (Diccionaris en Línia) (Ciència i Tecnologia) https://www.termcat.cat/ca/diccionaris-en-linia/235

[3] Honkanen, M.; Lappetelainen, A.; Kivekas, K. (2004). *Low end extension for Bluetooth*. 2004 IEEE Radio and Wireless Conference 19–22 September 2004. IEEE. pp. 199–202. [Consulta: Octubre 2020] https://ieeexplore.ieee.org/document/1389107 4

[4] Arxiu del lloc web de MIMOSA. [Consulta: Octubre 2020] https://web.archive.org/web/20160804035320/http://www.mimosa-fp6.com/ 4

[5] Millores de BLE 5 respecte BLE 4. [Consulta: Octubre 2020] https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/03/Bluetooth_5-FINAL.pdf xi, 7, 8

[6] Figura basada de la que es troba a [Consulta: Octubre 2020]: https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-phy-layer ix, 10

[7] Casals Ibáñez, Lluis & Mir Masnou, Bernat & Vidal Ferré, Rafael & Gomez, Carles. (2017). *Modeling the energy performance of LoRaWAN*. Sensors. 17. 2364. 10.3390/s17102364. [Consulta: Octubre 2020] https://www.researchgate.net/publication/320435869

[8] Latré, Benoît; De Mil, Pieter; Moerman, Ingrid; Dierdonck, Niek; Dhoedt, Bart; Demeester, Piet. (2005). [Consulta: Octubre 2020] Maximum Throughput and Minimum Delay in IEEE 802.15.4. 3794. 866-876. 10.1007/11599463_84.

[9] Gomez, C.; Oller, J.; Paradells, J. Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology. Sensors 2012, 12, 11734-11753. [Consulta: Octubre 2020] 11

[10] Link Layer States [Consulta: Octubre 2020] https://dev.ti.com/tirex/explore/content/simplelink_academy_cc13x2_26x2sdk_4_10_01_00/modules/ble5st
link-layer ix, 11

[11] Figura basada de la que es troba a [Consulta: Octubre 2020]: http://software-dl.ti.com/lprf/simplelink_cc2640r2_sdk/1.00.00.22/exports/docs/blestack/html/blestack/index.html ix, 12

[12] Bluetooth Special Interest Group “GATT Services Specification“ [Consulta: Octubre 2020] https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/services/ 13

[13] Bluetooth Special Interest Group “GATT Charasteristics Specification“ [Consulta: Octubre 2020] https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/characteristics/ 13

[14] O'Reilly online learning Chapter 4. GATT (Services and Characteristics) [Consulta: Octubre 2020] https://www.oreilly.com/library/view/getting-started-with/9781491900550/ch04.html ix, 14

[15] Especificació de la característica de nivell de bateria. [Consulta: Octubre 2020] https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Sitecore-Media-Library/Gatt/Xml/Characteristics/org.bluetooth.characteristic.battery_level.xml 14

[16] Especificació de la característica de temperatura. [Consulta: Octubre 2020] https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Sitecore-Media-Library/Gatt/Xml/Characteristics/org.bluetooth.characteristic.temperature.xml 14

[17] Llistat de UUID reservats per a empreses. [Consulta: Octubre 2020] https://www.bluetooth.com/specifications/assigned-numbers/ 15

[18] Bluetooth Special Interest Group "GATT Descriptors Specification" [Consulta: Octubre 2020] https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/descriptors/ 15

[19] Blog oficial sobre els anuncis en BLE. [Consulta: Octubre 2020] https://www.bluetooth.com/blog/bluetooth-low-energy-it-starts-with-advertising/ 15

[20] Figura basada de la que es troba a [Consulta: Octubre 2020]: https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/Bluetooth-5 ix, 16

[21] Diagrama dels paràmetres d'anunci. [Consulta: Octubre 2020] https://dev.ti.com/tirex/explore/content/simplelink_academy_cc13x2_26x2sdk_4_10_01_00/modules/ble5st ix, 17, 18

[22] Diagrama del procés de connexió. [Consulta: Octubre 2020] https://microchipdeveloper.com/wireless:ble-link-layer-connections ix, 20

[23] Diagrama de la latència d'esclau. [Consulta: Octubre 2020] http://software-dl.ti.com/lprf/simplelink_cc2640r2_latest/docs/blestack/ble_user_guide/html/ble-stack-3.x/gap.html#connection-parameters ix, 21

[24] BLUETOOTH SPECIFICATION Version 4.2 [Vol 6, Part B] apartat 2 [Consulta: Octubre 2020] ix, 22, 23

[25] Estructures de les dades d'anunci possibles [Consulta: Octubre 2020] https://www.bluetooth.com/specifications/assigned-numbers/generic-access-profile/ 22

[26] BLUETOOTH CORE SPECIFICATION Version 5.2 — Vol 6, Part B apartat 2.3.4 ix, 23

[27] Fotografia del LaunchXL CC1352R [Consulta: Octubre 2020] http://www.ti.com/diagrams/med_launchxl-cc1352r1_launchxl-cc1352r1.jpg ix, 25

[28] CC1352R SimpleLink Datasheet [Consulta: Octubre 2020]
https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-CC1352R1#technicaldocuments 25

[29] Web de l'entorn de desenvolupament Eclipse. [Consulta: Octubre 2020]
https://www.eclipse.org/ide/ 26

[30] Figura dels UUID del Project 0 [Consulta: Octubre 2020]
https://dev.ti.com/tirex/explore/content/simplelink_academy_cc13x2_26x2sdk_4_20_00_00/modules/ble5st
ix, 27

[31] Characteristic Extended Properties [Consulta: Octubre 2020]
https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Sitecore-Media-
Library/Gatt/Xml/Descriptors/org.bluetooth.descriptor.gatt.characteristic_extended_properties.xml
29

[32] Configuració del port sèrie [Consulta: Octubre 2020]
http://dev.ti.com/tirex/explore/content/simplelink_academy_cc13x2_26x2sdk_4_10_01_00/modules/ble5sta
29

[33] Generador de fitxers per a nous serveis [Consulta: Octubre 2020]
http://dev.ti.com/tirex/explore/content/simplelink_academy_cc13x2_26x2sdk_4_10_01_00/modules/ble5sta
service-generator 30

[34] https://developer.android.com/reference/android/bluetooth/le/package-summary 42

[35] https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth-le 42

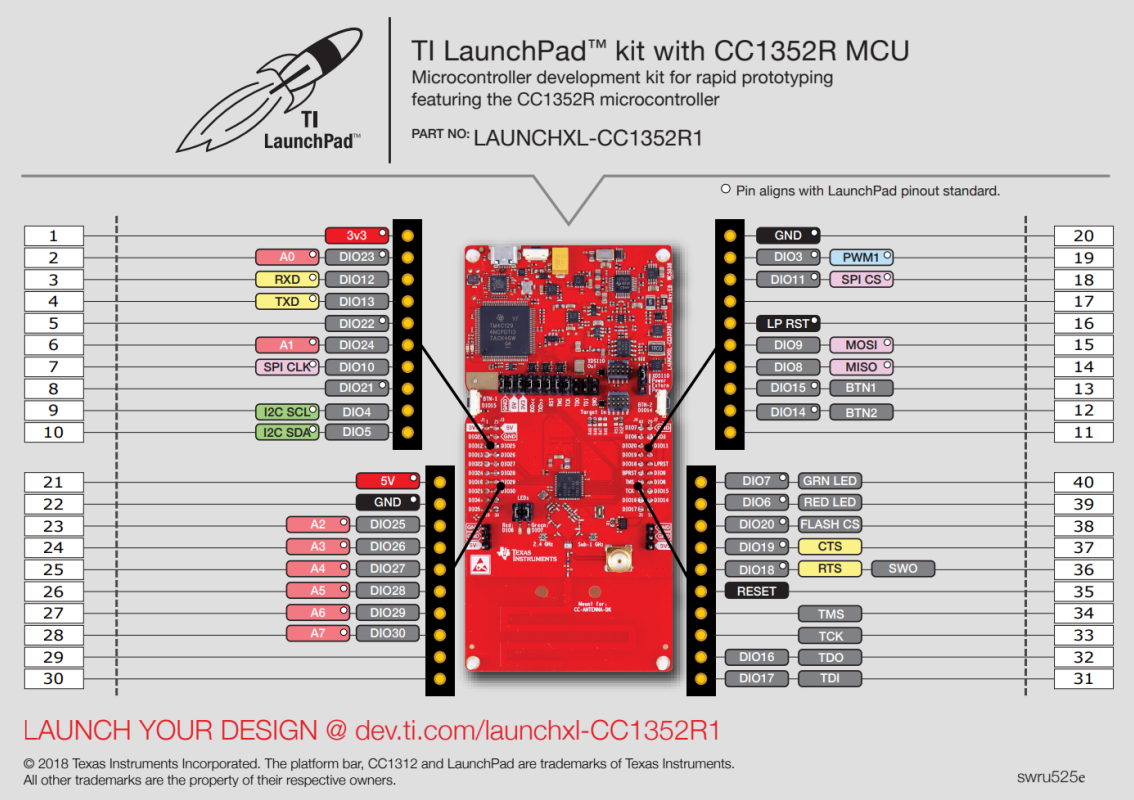
[36] Respositori amb l'aplicació Android desenvolupada.
https://github.com/garretaserra/sensorReader 44

[37] Manual del LaunchPad CC1352R [Consulta: Octubre 2020]
https://www.ti.com/lit/pdf/swru525 44

[38] Anàlisi del mercat de Bluetooth [Consulta: Octubre 2020]
https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2020/03/2020_Market_Update-EN.pdf
48

APÈNDIXS

APÈNDIX A. DATASHEET DEL LAUNCHXL CC1352R1



La figura correspon al manual que ve amb el kit de desenvolupament i descriu quines funcionalitats té cada pin de la PCB.