

# Estudi de l'energia consumida en xarxes de sensors IEEE 802.15.4 / ZigBee

M. A. Ribot<sup>1</sup>, B. Alorda<sup>2</sup>

Enginyeria Tècnica de Telecomunicacions, especialitat en Telemàtica

<sup>1</sup>virtualo@gmail.com <sup>2</sup>tomeu.alorda@uib.es

**Resum—** La importància de les xarxes de sensors està creixent amb l'aparició de noves aplicacions i tecnologies que expandeixen les prestacions inicials. Aquest treball pretén donar a conèixer algunes de les característiques dels protocols utilitzats en les xarxes de sensors o “Wireless Sensor Network” (WSN), així com mostrar alguns dels resultats obtinguts en el PFC. Aquests resultats s'han obtingut centrats en els estàndards IEEE 802.15.4 i les definicions del protocol ZigBee. Així es pot veure com s'aprofiten al màxim els recursos del sistema i es mostra una característica del consum del circuit emissor/receptor que podria ser usada a l'hora de la presa de decisions durant la configuració dels nodes de la xarxa.

## I. INTRODUCCIÓ A LES WSN

Amb l'actual popularitat dels ordinadors portàtils, els telèfons mòbils, les PDA, els dispositius GPS, etc., els dispositius de computació electrònics s'han fet cada vegada més barats, mòbils i més habituals en aplicacions de la vida diària. Una de les tecnologies que podria tenir una gran expansió en un futur proper són les xarxes de sensor sense fil o “Wireless Sensor Network” (WSN) [1].

La idea principal es podria resumir com: “uneix-te i guanyaràs”. Així, una WSN permet la col·laboració de petits dispositius electrònics que s'uneixen per a dur endavant una tasca més complexa. Els àmbits de les aplicacions de les WSN són molt variades i alguns exemples inclouen:

1. Monitoratge mèdic,
2. Monitoratge d'entorns industrials, de medis i fenòmens naturals,
3. Tasques de vigilància i reconeixement,
4. Aplicacions domòtiques, etc.

Generalment, una WSN està formada per un nombre gran de nodes, arribant a alguns centenars. Aquests nodes es poden comunicar via ràdio i són desenvolupats amb capacitats per a executar tasques de forma cooperativa. Un node típic d'una WSN estaria format per diversos sensors, un microcontrolador, un transceptor ràdio i obté l'energia d'un sistema de bateries. Aquests components es poden trobar integrats en una única o en múltiples PCBs, i amb una mida total de només alguns centímetres quadrats.

Un dels reptes més importants amb que es troben les WSN, és l'aprofitament òptim dels recursos disponibles per a desenvolupar la tasca. Com que els nodes disposen d'alimentació per bateries de limitada capacitat i, a més, els recursos computacionals també són reduïts; la majoria de treballs en aquest àmbit es troben orientats a desenvolupar estratègies per aprofitar de la forma més eficient possible aquests recursos. L'eficiència energètica significa aconseguir

tenir el màxim de temps possible el mòdul de ràdio, el microcontrolador i els sensors en un estat de baix consum. Així mateix, després de l'anàlisi que s'en fa en aquest treball del consum d'un node, es pot veure com el mòdul de ràdio és el subsistema que provoca un consum més alt amb la seva posada en marxa, per tant tenir un control d'aquest dispositiu podria aportar una gran millora en termes de reducció del consum energètic. En aquest treball es realitza un estudi del hardware disponible en el mòdul de ràdio i com aquest utilitza l'energia en els diferents nivells de potència. L'elecció del nivell de potència necessari en cada moment i en cada transmissió permetria utilitzar de forma òptima l'energia disponible.

Avui en dia, la majoria de WSN es basen en l'estàndard IEEE 802.15.4 que defineix la capa Física i algunes de les funcions de la capa d'enllaç o capa MAC. Aquesta estandardització ha permès la proliferació de dispositius hardware que donen suport a aquesta tecnologia. A la vegada hi ha voluntats per a desenvolupar estàndards de protocols de les capes superiors que pretenen possibilitar la comunicació de dispositius de diferents fabricants amb un mateix llenguatge de comunicació. Un exemple d'aquests protocols de nivell superior és el ZigBee, definit per l'aliança de diferents fabricants [2]. ZigBee deixa les definicions de la capa física i de MAC a l'estàndard IEEE 802.15.4, i afegint la definició de noves funcions d'enllaç, la descripció del nivell de xarxa i dels nivells de capes superiors.

Així doncs, en els pròxims apartats es donaran a conèixer les principals característiques de les WSN basades en els estàndards IEEE802.15.4/ZigBee, seguidament es donaran dades de les característiques del hardware utilitzar per a realitzar l'experimentació i l'estudi i finalment es mostraran les principals conclusions.

## II. CARACTERÍSTIQUES DEL IEEE802.15.4/ZIGBEE

L'estàndard IEEE 802.15.4 és una de les interfícies més habituals per a xarxes sense fil d'àrea personal amb baixes taxes de transmissió de dades (anomenades “Low-Rate Wireless Personal Area Network”, LR-WPAN). Aquest estàndard només defineix les capes física (PHY) i de control d'accés al medi (MAC). D'altra banda, la ZigBee Alliance [2] creà ZigBee per a definir les capes més altes del model OSI i de la resta d'aspectes generals de la xarxa. La idea principal era aconseguir una definició senzilla, orientada a treballar amb nodes amb reduïts recursos i amb alimentació amb bateries. La figura 1 mostra la pila (o stack) del protocol ZigBee i es poden veure quins nivells queden definides per l'estàndard

IEEE 802.15.4 i els que ha definit la ZigBee Alliance. Val a dir que la orientació principal d'aquest tipus de protocol ha sigut en una primera instància per aplicacions domòtiques, i de control industrial.

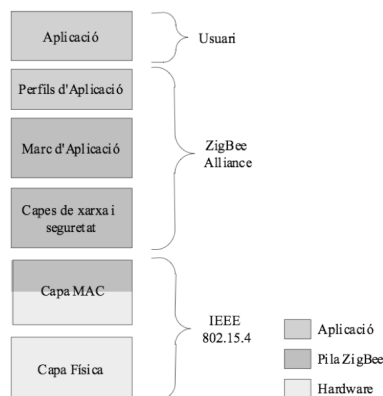


Fig. 1 Pila de protocols on es poden veure els nivells definits per cada un dels diferents estàndards IEEE802.15.4 i ZigBee.

#### A. Capes física i d'accés al medi segons IEEE 802.15.4.

A nivell de la capa física (PHY), l'estàndard defineix dos tipus de modulació diferents: "Binary Phase Shift Keying" (BPSK) i "Offset-Quadrature Shift Keying" (O-QPSK), totes dues utilitzades amb "Direct Sequence Spread Spectrum" (DSSS), sobre un canal de 2 MHz d'amplada de banda [3]. Fou dissenyat per a operar sobre les bandes d'espectre lliures, dins una distància típica entre 5 i 75 m. Se n'han definit tres bandes de freqüència, amb diferents taxes de transmissió de dades per cada una: 250 kbps a la banda de 2.4 GHz, 40 kbps a la banda de 915 MHz i 20 kbps a la banda de 868 MHz. La modulació O-QPSK s'utilitza a la banda de 2.4GHz, mentre que la BPSK és l'escollida per altres dues bandes. Per altra banda, es defineix una sensibilitat mínima del receptor d'almenys -85 dBm, i una potència de transmissió màxima recomanada d'almenys 0 dBm. Així mateix, avui en dia, existeixen dispositius que permeten augmentar les distàncies entre nodes amb l'increment de la potència de transmissió. En aquest treball s'ha pogut experimentar amb un d'aquests dispositius que permetia arribar a uns +15 dBm.

A nivell de la capa d'accés al medi (MAC), les principals funcionalitats definides inclouen: el control d'accés al canal, la validació de trames, la transmissió de trames d'ACK i la connexió i desconnexió entre nodes. A més, es defineixen dos tipus possibles de nodes dins la xarxa, segons la seva funcionalitat [3]: Dispositius de funcionalitat completa o "Full Function Devices" (FFD) i Dispositius de funcionalitat reduïda o "Reduced Function Devices" (RFD) que només proporcionen un conjunt reduït o parcial dels serveis MAC.

#### B. Les Capes de Nivell Superior: ZigBee

Les capes superiors de ZigBee són les responsables de: la gestió i encaminament de paquets dins la xarxa, la formació d'aquests a partir de les dades de l'aplicació, la gestió dels nodes entrants i sortints a la xarxa i, en general, de les funcions corresponents als nivells superiors al nivell d'enllaç del model OSI. ZigBee proporciona capacitats de xarxa

ampliades que permeten estendre aquelles específiques de l'IEEE 802.15.4, com per exemple incorpora tècniques de seguretat i encriptació de les dades que circulen per la xarxa.

Una xarxa ZigBee pot adoptar una de les tres topologies que es mostren en la figura 2. La forma com s'encaminen els missatges d'un node a un altre dependrà de la topologia. Així mateix, en qualsevol xarxa ZigBee serà necessari que un node assumeixi el paper de coordinador de la xarxa; el node central en la topologia en estrella o el node superior en les topologies d'arbre de clústers i malla. Exceptuant la topologia en estrella, les altres topologies necessiten nodes que retransmetin els missatges dels nodes veïns a un altre node superior en la jerarquia. Aquests dispositius actuen com a encaminadors o "routers".

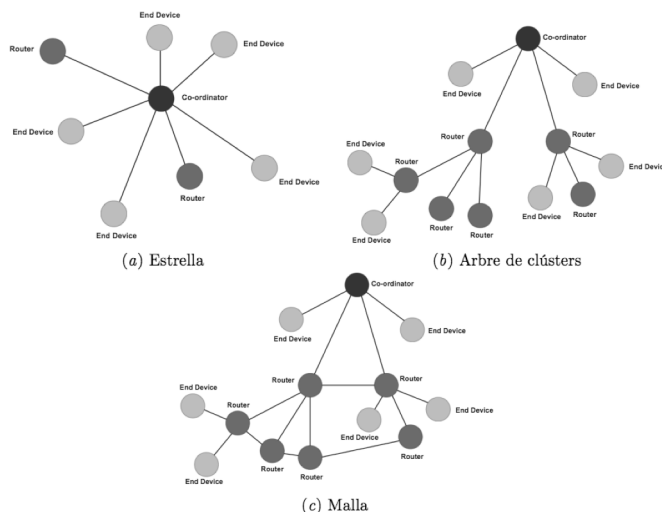


Fig. 2 Topologies de xarxa disponibles en una xarxa basada en ZigBee amb la funcionalitat dels nodes.

Així doncs, els nodes ZigBee es poden classificar segons la funció que desenvolupen a dins la xarxa: coordinador, router i dispositiu final o "End Device" (ED). Els dos primers necessàriament han de ser dispositius FFD, segons l'IEEE 802.15.4, mentre que els dispositius finals poden ser tant FFD com RFD segons l'aplicació concreta i amb l'objectiu de reduir al mínim les necessitats de recursos dels nodes.

1) *Coordinador*: Totes les xarxes ZigBee han de tenir un, i només un d'aquest nodes, independentment de la topologia de la xarxa. El node coordinador és necessari, principalment, per a iniciar i gestionar tant l'alta com baixa de nodes a la xarxa. Degut a la seva importància per a mantenir la comunicació de la WSN, aquest dispositiu ha de tenir una alimentació garantida durant tota la vida útil de la xarxa.

2) *Router*: Una xarxa ZigBee amb una topologia en malla o en arbre de clústers requereix la presència d'almenys un node amb funcions de router. Les principals funcions que desenvolupa són: retransmetre missatges rebuts d'un node cap a un altre i permetre que nodes (anomenats "fills") lluny del coordinador s'hi puguin connectar per a passar a formar part de la xarxa, i així ampliar l'àrea d'actuació. A nivell

d'alimentació, aquests dispositius requereixen del mateix tipus de font que el coordinador per a garantir la comunicació de la xarxa.

3) *Dispositiu final (ED)*: La tasca principal a nivell de xarxa és transmetre i rebre missatges, d'acord amb la funció que desenvolupi la xarxa. Normalment els ED es troben alimentats per bateries; per tant, mentre no es trobin realitzant alguna tarea de xarxa, passen a un estat latent de baix consum (mode Sleep) per tal d'estalviar energia.

### III. UNA SOLUCIÓ ZIGBEE COMERCIAL

Per a comprovar les característiques d'una solució comercial ZigBee, s'ha fet servir el ZigBee Evaluation Kit de Jennic [4]. L'elecció d'aquest kit ha vingut motivada sobretot pel baix cost de la solució i l'entorn de programació basat en el llenguatge C. Aquest hardware proporciona totes les eines software necessàries per a desenvolupar una xarxa de sensors amb implementacions de la pila de protocols ZigBee i de l'IEEE 802.15.4. L'element principal del sistema són els mòduls JN5139-Z01-M03 que integren tant el mòdul de ràdio com el microcontrolador dels nodes (figura 3).

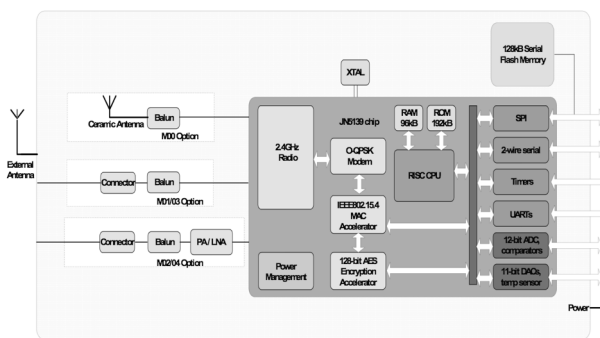


Fig. 3 Esquema dels elements que formen un mòdul JN5139-Z01-M0x.

El JN5139 és un microcontrolador de consum i cost reduïts dissenyat específicament per a aplicacions IEEE 802.15.4 i ZigBee. Integra un processador RISC de 32 bits, un transceptor per a 2.4 GHz totalment compatible amb l'IEEE 802.15.4, 192 kB de ROM, 96 kB de memòria RAM, i un conjunt variat de perifèrics, tant analògics com digitals [4,5] que li permeten connectar-se amb una àmplia varietat de sensors. El dispositiu permet enviar dades usant fins a 6 nivells diferents de potència de transmissió ( $P_{Tx}$ ). Integra hardware accelerador per a les funcions de capa MAC i encriptació AES; modes de baix consum i de repòs (Sleep); i mecanismes de seguretat per a encriptar el codi de programa.

### IV. ESTUDI DEL CONSUM ENERGÈTIC DELS NODES

Per tal de caracteritzar el comportament del consum energètic dels del mòduls JN5139-Z01-M03 de Jennic, com a exemple de nodes ZigBee comercials, es van desenvolupar dos tests experimentals: el primer per a caracteritzar el consum del node a diferents potències de transmissió ( $P_{Tx}$ ), i un segon test per mesurar empíricament la  $P_{Tx}$  de sortida dels nodes. L'objectiu és aconseguir una estimació del cost energètic de cada nivell de potència disponible en el node.

#### A. Potència de transmissió disponible.

Mesurar la potència de transmissió de sortida ( $P_{Tx}$ ) dels mòduls JN5139-Z01-M03 en cadascun dels 6 nivells de potència de transmissió es va realitzar amb l'ajuda d'un analitzador d'espectre. La figura 4 mostra un esquema del muntatge realitzat amb la connexió directe de la sortida del transmissor i l'analitzador d'espectre. Durant el test, que consistia en transmetre una seqüència de bits pseudoaleatòria durant un minut en cada un dels nivells de potència [4], el node es trobava connectat a una font d'alimentació externa de 5.6VDC, aportant una alimentació constant de 3V del microcontrolador. La tensió d'entrada del microcontrolador és important, ja que la potència de transmissió depèn directament d'aquesta, motiu pel qual calia que fos la mateixa en totes les mesures.

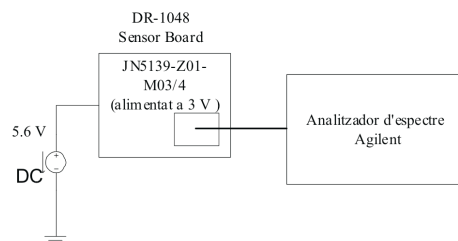


Fig. 4 Esquema del muntatge experimental per a mesurar la  $P_{Tx}$  de sortida

La figura 5 mostra com l'espectre del senyal que es transmet evoluciona quan s'augmenta el nivell de potència de l'emissor usant sempre el mateix canal, mateixa freqüència.

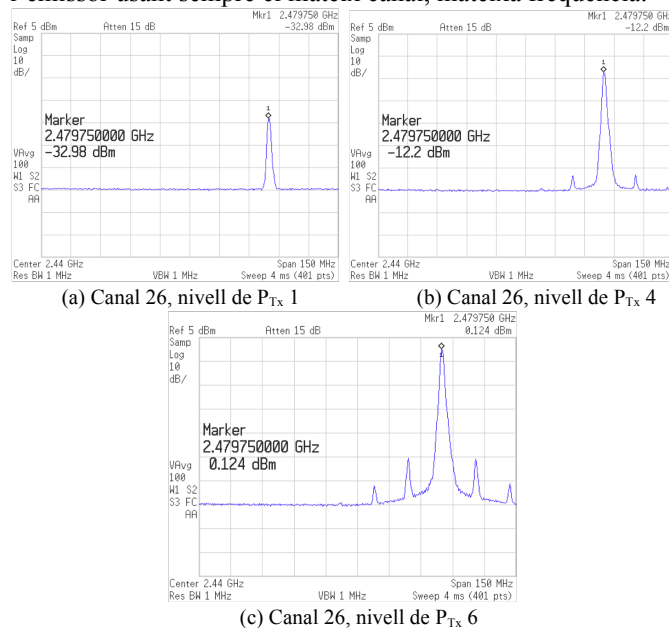


Fig. 5 Captures de l'espectre de sortida del senyal generat pel mòdul JN5139-Z01-M03 a diferents nivells de  $P_{Tx}$

A partir de les captures mostrades a la figura 5, queda clar que l'augment de potència de transmissió té un cost: part de la potència útil apareix en forma d'harmonics, mirar figura 5.b i 5.c que al final poden arribar a crear interferències en el receptor. La figura 6 mostra el mateix cas que la figura 5.c, però usant els mòduls que superen els 0dBm definits per

l'estàndard. En aquest cas es multiplica l'efecte sobre els harmònics i l'ample de banda que es transmet pot arribar a ser superior a l'especificat per l'estàndard.

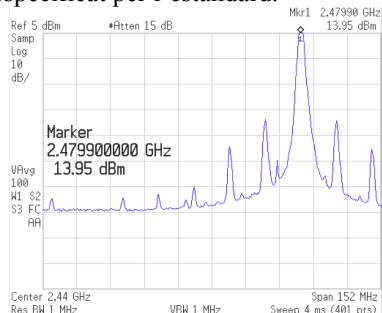


Fig. 6 Captura de l'espectre de sortida del senyal generat pel mòdul JN5139-Z01-M04 en el canal 26 i nivell de  $P_{Tx}$  de 6.

### B. Consum Energètic dels Nodes.

En el segon test es va mesurar el consum de corrent dels mòduls realitzant diferents tasques habituals en els nodes de les WSN: com la transmissió i recepció de dades, la presa de mesures amb els sensors, etc. Per a mesurar aquest corrent s'insereix una resistència de  $R_m=14\Omega$  (valor seleccionat per a garantir el correcte funcionament del controlador) entre la font d'alimentació i el pin d'alimentació del mòdul. D'aquesta forma mesurant la caiguda de tensió sobre la resistència  $R_m$  amb l'oscil·loscopi, es pot calcular el valor del corrent consumit pel microcontrolador en diferents estats i utilitzant diferents nivells  $P_{Tx}$ . A més, s'observaren les variacions del corrent consumit en un mateix estat, així com el temps i el consum de corrent que suposen els canvis d'estat. La figura 7 mostra l'evolució del corrent de consum quan es realitzen tasques típiques, passant d'un estat de repòs, períodes H, D, a estats de recepció (període G) o transmissió (període C).

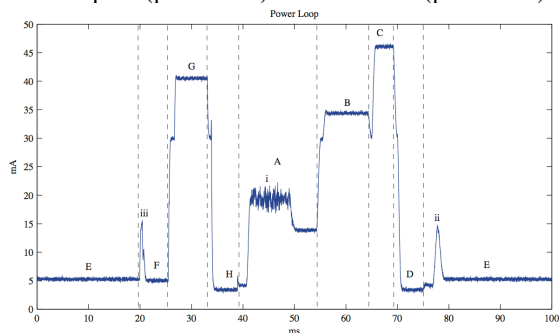


Fig. 7 Diferents nivells de potència en funció del tipus d'operacions que està desenvolupant.

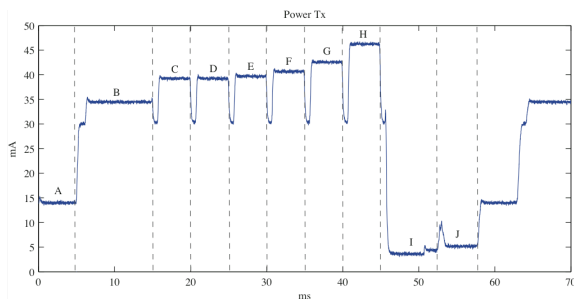


Fig. 8 Consum de corrent mesurat en el mòdul JN5139-Z01-M03.

El resultats més rellevants foren les mesures obtingudes referent al consum de corrent que suposa la transmissió utilitzant els diferents nivells de potència disponibles als mòduls, per a poder comparar el consum energètic que suposa cada una de les  $P_{Tx}$  efectives dels mòduls. La figura 8 mostra el comportament del mòdul durant l'experiment de mesura. Es poden veure clarament els increments de corrent de consum per cada transmissió a diferent potència seleccionada. Així, el consum menor, període C es correspon al nivell 1 de  $P_{Tx}$ , mentre que el període H es correspon al nivell màxim 6.

A partir de les dades obtingudes es possible obtenir la figura 9 en que es compara els nivells de consum energètic i els valors de potència de transmissió obtinguts.

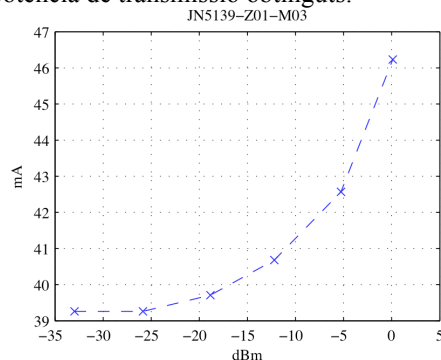


Fig. 9 Comparativa de la  $P_{Tx}$  versus el consum de corrent dels mòduls JN5139-Z01-M03 de Jennic.

La figura 9 deixa clar que el pas d'un nivell de potència de transmissió al següent dur un cost associat exponencial en consum energètic. Aquesta característica no està associada únicament als mòduls de ràdio Jennic, sinó que una característica similar es pot observar en altres mòduls comercials com el CC2420 de Chipcon[4].

Una aplicació directa d'aquest resultat el trobam a l'hora d'inicialitzar una xarxa WSN i prendre la decisió de quina potència és necessària per a transmetre la informació. En aquest cas, la figura 9 ens proporciona una informació útil a l'hora de calcular la durada de les bateries. Per altra banda, si l'enllaç té unes característiques constants en el temps, la presa de decisió inicial hauria de ser suficient per a considerar-la òptima al llarg de la vida útil del node. No es pot fer així, si l'enllaç ràdio té característiques que evolucionen amb el temps o si els nodes són mòbils. Es fa necessari relacionar les característiques de l'enllaç amb la informació de la potència transmesa per a poder proporcionar una correcta estimació del nivell de potència òptima en funció del temps.

### V. CARACTERÍSTIQUES D'UN ENLLAÇ DE RÀDIO

Una vegada analitzat el comportament energètic del node, es va procedir a realitzar la caracterització de l'enllaç entre dos nodes per conèixer la fiabilitat de l'enllaç i tenir dades reals de quins són els millors paràmetres per a caracteritzar l'evolució amb el temps d'un enllaç.

Aquests indicadors s'han classificat en dos tipus: estadístics, o que incorporen l'evolució en funció del temps i puntuals, o que indiquen la qualitat de l'enllaç en la transmissió en curs. Els indicadors puntuals són proporcionats

pel hardware ràdio i aporten informació de l'estat del canal en un instant concret. Exemples serien: l'energia detectada en un moment donat, o durant períodes de temps molt curts, l'energia detectada corresponent a un conjunt reduït de bytes de la trama en curs. En aquest treball s'ha elegit com a indicador puntual el següent paràmetre:

- Link Quality Indicator (LQI): És una mesura de la potència del senyal rebut i/o de la qualitat corresponent a un paquet rebut. D'acord l'especificació a [5], es pot calcular en funció de l'energia detectada al receptor, com una estimació de la relació senyal-renou, o com una combinació d'aquests mètodes.

Els indicadors estadístics proporcionen informació sobre el comportament del canal al llarg d'un període de temps donat. Emprar aquest tipus d'indicador per a prendre decisions abans de la transmissió d'una trama, implica haver de disposar de dades prèvies sobre el canal, i això pot suposar un cost en temps i en energia abans de tenir un indicador fiable. En aquest treball s'ha elegit el següent paràmetre:

- Packet Reception Rate (PRR): Representa la proporció de trames que s'han transmès correctament envers el nombre total de trames transmeses per un node. Es pot calcular mitjançant la següent expressió:

$$PRR = G / A$$

On G representa el nombre de trames rebudes correctament al node destinatari, i A representa el nombre total de trames transmeses al destinatari.

#### A. Test de l'enllaç ràdio entre dos nodes IEEE802.15.4

L'objectiu d'aquest test fou analitzar el comportament de l'enllaç ràdio entre dos nodes que es comuniquen per mitjà del protocol IEEE802.15.4. El test es va dissenyar seguint l'esquema de la figura 10, per tal d'enregistrar i avaluar el conjunt d'indicadors seleccionats en aquest treball [4].

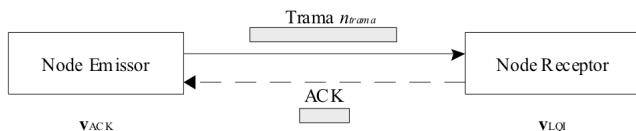


Fig. 10 Esquema del disseny proposat del test d'enllaç ràdio entre dos nodes

L'experiment es realitza a nivell d'enllaç, per tant, implica només dos nodes, que anomenarem "node emissor" i "node receptor", veure figura 10. El node emissor s'associarà al node receptor i transmetrà un nombre preestablert de trames de forma continuada usant trames ACK (Acknowledge) de resposta. La transmissió de trames d'informació a l'enllaç serà unidireccional, on el node emissor enviarà les trames i el node receptor les rebdrà. Tot i això, el node receptor respondrà amb trames de tipus ACK al node emissor per confirmar les trames d'informació rebudes correctament. El node emissor emmagatzemarà una certa estadística sobre els ACKs rebuts corresponents a cada trama, mentre que el node receptor emmagatzemarà el valor de LQI assignat a cadascuna d'aquestes trames. Una vegada finalitzada la transmissió de totes les trames previstes. Es llegirà aquesta informació dels nodes i es combinarà per a poder caracteritzar l'enllaç [4].

La ubicació seleccionada per a dur a terme el test de l'enllaç ràdio fou el carrer Cabrera del campus de la Universitat de les Illes Balears, veure figura 11. Aquest escenari fou seleccionat per a permetre una visió directa entre els nodes durant l'experiment en un espai exterior. Es varen determinar un conjunt d'ubicacions per al node transmissor a diferents distàncies del node emissor, veure els punts indicats a la fotografia 11. El test es va repetir per a cada ubicació. La posició del node receptor es va fixar prèviament i va ser la mateixa per a tots els tests realitzats. L'alçada del node emissor durant tots els tests fou de 1.65 m, mentre que la del node transmissor fou d'aproximadament 1.60m, igual per a totes les ubicacions.



Fig. 11 Escenari exterior (carrer Cabrera del campus universitari) on es van desenvolupar les mesures de cobertura

Es considera que una trama s'ha rebut correctament si la seva longitud és la correcta i ha superat la comprovació CRC. En cas d'un enllaç funcionant amb mode ACK, es determinarà que una trama ha estat transmesa correctament quan el node transmissor rep l'ACK corresponent abans d'excidir un temps màxim donat.

El mode ACK implica que, cada vegada que un node rep correctament una trama, envia al node emissor d'aquesta un missatge de confirmació.

La figura 12 mostra l'evolució de l'indicador PRR en funció de la distància a diferents nivells de  $P_{Tx}$ . Es pot observar com el PRR decreix a mesura que augmenta la distància. A tots els nivells de  $P_{Tx}$  s'aprecia un descens pronunciat a partir d'una determinada distància. Per exemple, amb el nivell de  $P_{Tx} = 5$ , quan es passa de 140 a 160 m es produeix una abrupta caiguda del PRR, que passa de pràcticament 1 a 0.18. El nivell de  $P_{Tx} = 4$  presenta una "peculiaritat" a 120m, amb un PRR=0, tot i que a 140m aquest torna a pujar de forma poc significativa. És possible considerar que, amb aquest nivell, a partir de 100m apareix la zona límit de cobertura, per la qual cosa el PRR pot presentar altes variacions; i, així mateix, que en el moment del test a 120 m, l'entorn pogué presentar alguna hostilitat addicional. Es pot observar de la figura 12 que, fins i tot a 180m, hi ha una bona qualitat de comunicació si s'utilitza el nivell de  $P_{Tx}$  màxim (que implica transmetre a aproximadament 0dBm).



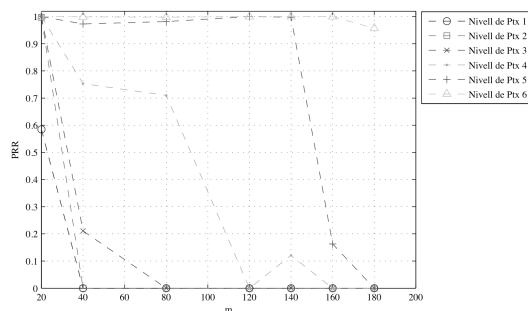


Fig. 12 PRR en funció de la distància per a diferents PTx a l'escenari exterior mostrat a la figura 11

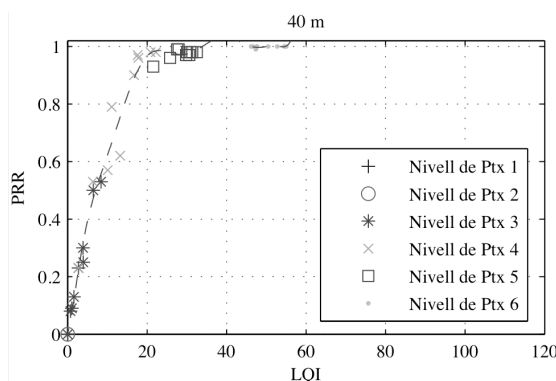


Fig. 13 LQI vs PRR en un escenari exterior amb visió directa i a una distància entre nodes de 40m

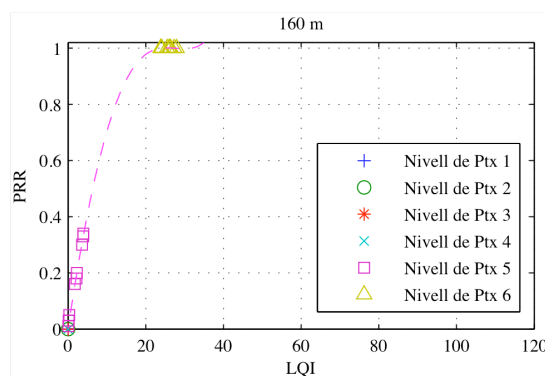


Fig. 14 LQI versus PRR a l'escenari exterior amb distància entre nodes de 160m

D'altra banda, s'ha volgut comparar l'indicador LQI mitjà corresponent a un conjunt determinat de  $m$  trames amb el PRR corresponent al mateix conjunt. Aquesta comparació ajudarà a caracteritzar la relació existent entre el PRR i els valors de l'indicador LQI. Aquest estudi pretén mostrar si es pot determinar un valor llindar mínim de LQI independent de l'entorn, que assegurí una bona qualitat de l'enllaç, és a dir, un PRR proper a 1. Trobar aquest valor llindar permetria discriminar la fiabilitat d'un enllaç de forma pràcticament instantània. Així que es varen definir dos entorns més d'experimentació: un entorn interior, a l'Edifici Mateu Orfila i un nou entorn exterior a la zona d'aparcament darrera l'edifici Mateu Orfila. Per cada entorn experimental es van obtenir dades a diferents ubicacions. Les gràfiques 13 i 14 es corresponen amb les parelles de valors ( $LQI_{ij}$ ,  $PRR_{ij}$ )

obtingudes. Les dades s'han agrupat en funció del nivell de  $P_{Tx}$ . La corba discontinua de la gràfica 13 correspon a l'estimació obtinguda aplicant eines de regressió polinòmiques sobre el conjunt de punts.

S'ha observat que existeix un valor de LQI llindar per sota del qual el PRR varia de forma considerable, ja que per a canvis petits del valor LQI mitjà hi ha una forta variació del PRR. Aquest valor LQI llindar és sempre  $\geq 20$ . Així doncs caldria evitar transmetre amb els nivells de  $P_{Tx}$  on la variabilitat de PRR fos elevada per assegurar una bona qualitat de l'enllaç.

## VI. CONCLUSIONS

S'ha pogut observar com el consum dels nodes d'una WSN, quan aquests es troben transmetent informació, augmenta de forma no lineal amb l'augment de la potència de transmissió ( $P_{Tx}$ ). Inicialment, es va pensar que això podria ser una peculiaritat del hardware de Jennic, però es va comprovar que aquesta relació entre la  $P_{Tx}$  i el consum també es dona en transceptors d'altres fabricants. Aquesta relació entre els nivells de  $P_{Tx}$  i el consum podria augmentar els beneficis de determinar el nivell de  $P_{Tx}$  òptima, en lloc de la màxima  $P_{Tx}$  disponible.

Els resultats del test de l'enllaç entre dos nodes IEEE 802.15.4 han permès comprovar el comportament de l'enllaç en funció dels paràmetres LQI i PRR. S'ha determinat un abast operatiu dels mòduls JN5139-Z01-M03, en un entorn exterior, superior als 200 m utilitzant el màxim nivell de  $P_{Tx}$  disponible. També a partir dels resultats del test, s'ha comprovat que estimar la qualitat real de l'enllaç entre dos nodes només a partir del valor del paràmetre LQI no resulta eficaç. A més, s'ha confirmat l'existència de l'anomenada "zona grisa", és a dir, la zona conformada per tots aquells punts que es troben propers al límit de la zona de cobertura d'un node i en els quals, per a una  $P_{Tx}$  donada, el PRR presenta una alta variabilitat, mentre que la variabilitat dels valors de LQI és manté baixa.

## REFERÈNCIES

- [1] Y. Yu, V.K. Prasanna, B.Krishnamachari, "Information Processing and Routing in Wireless Sensor Networks", 2006.
- [2] ZigBee 2006 Specification, <http://www.zigbee.org>.
- [3] IEEE Standard for Information Technology. Part 802.15.4: MAC and PHY specifications for LR-WPANs. 2003.
- [4] Miquel Àngel Ribot Sanfèlix, "Estudi i proposta d'una metodologia de selecció de la potència del transmissor a partir del consum energètic en xarxes IEEE 802.15.4/ZigBee", memòria Projecte Final de Carrera, gener 2009.
- [5] Jennic Ltd. Datasheets: JN5139 Module Datasheet, v.1.4. 2008.

*Miquel Àngel Ribot.* Enginyer Tècnic de Telecomunicacions Esp. Telemàtica, UIB, febrer de 2009. Actualment al·lumne del Master of Science in Information and Communication Technologies (MINT), UPC.

*Bartomeu Alorda.* Enginyer de Telecomunicacions (UPC, 2000) i Doctor en Física, (UIB, 2005). És professor del Departament de Física a la Universitat de les Illes Balears en el grup de recerca de Sistemes Electrònics.