

Estudi de l'energia consumida en xarxes de sensors IEEE802.15.4/ZigBee

B. Alorda i M. A. Ribot

Resum—Aquest article pretén aportar una visió general sobre els protocols IEEE 802.15.4 i ZigBee per a xarxes de sensors sense fils. Inicialment s'introduirà breument el concepte de xarxa de sensor sense fils, per a continuar recollint les característiques més importants dels protocols IEEE 802.15.4 i ZigBee. Posteriorment recull breument els resultats obtinguts corresponents a una part del PFC titulat *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*. Concre

I. INTRODUCCIÓ A LES WSN

Amb l'actual popularitat dels ordinadors portàtils, els telèfons mòbils, les PDA, els dispositius GPS, etc. de l'era post-PC, 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 amb més futur serà l'aparició i popularització de les xarxes de sensor sense fil (Wireless Sensor Network, WSN).

La idea principal és la col·laboració de petits dispositius electrònics per a dur endavant una tasca més complexa, en un sistema més gran. Els àmbits de les aplicacions de les WSN són molt variats [?] i inclouen:

- 1) monitoratge mèdic
- 2) monitoratge d'entorns industrials, i de medis i fenòmens naturals,
- 3) tasques de vigilància i reconeixement,
- 4) aplicacions domòtiques, etc.

Normalment, una WSN pot arribar a estar formada per alguns centenars de nodes, els quals es poden comunicar via ràdio i poden executar tasques de forma cooperativa. Típicament, un node d'una WSN està format per diversos sensors, un microcontrolador i un transceptor ràdio. Aquests components es poden trobar integrats en una única o en múltiples plaques, amb una mida total de només alguns centímetres quadrats.

Un dels reptes més importants amb què s'enfronten les WSN és l'aprofitament màxim dels recursos disponibles, ja que els nodes solen trobar-se alimentats per bateries de baixa capacitat i tenir recursos computacionals reduïts. La majoria d'investigacions actuals en aquest àmbit es troben orientades a aprofitar de la forma més eficient possible aquests recursos i l'energia de què disposen els nodes.

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 d'enllaç. Això ha permès la proliferació de dispositius hardware que donen suport a aquest estàndard. A la vegada s'estan creant estàndards de protocols de nivell superior que pretenen possibilitar la comunicació de dispositius

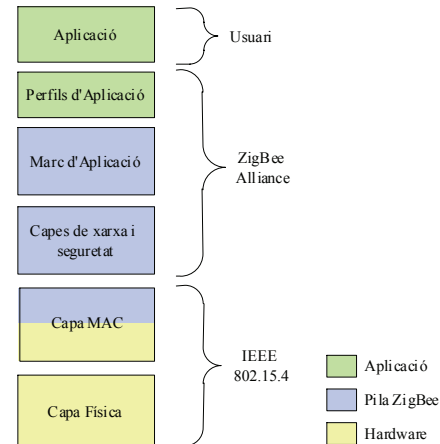


Figura 1. Pila del protocol ZigBee

de diferents fabricants amb un mateix llenguatge de comunicació. Un exemple d'aquests protocols de nivell superior és el ZigBee, creat per l'aliança de diferents fabricants. Aquest estàndard deixa les definicions de la capa física i d'enllaç a l'estàndard IEEE 802.15.4, i afegeix la definició de noves funcions d'enllaç, la definició a nivell de xarxa i a nivells de capes superiors.

II. IEEE 802.15.4/ZIGBEE

L'IEEE 802.15.4 és un dels estàndards 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 [ref. a la web] creà ZigBee per a definir les capes més altes del model OSI i de la resta d'aspectes generals d'una xarxa WSN. La figura 1 mostra la pila (o stack) del protocol ZigBee i quines parts queden definides per l'estàndard IEEE 802.15.4 i quines per la ZigBee Alliance.

A. Capes física (PHY) i MAC definides per IEEE 802.15.4

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), amb una taxa de chip de 2 MChip/s sobre un canal de 2 MHz d'amplada de banda. Fou dissenyat per a operar sobre les bandes lliures ISM, dins un rang típic de 5 a 75 m. Se defineixen tres bandes de freqüència, amb diferents taxes de transmissió de dades cada una: 250 kbps a

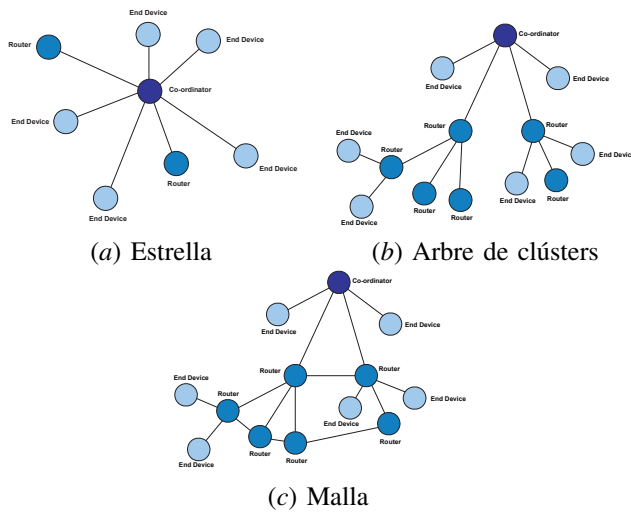


Figura 2. Topologies de xarxa disponibles en una xarxa ZigBee amb la funcionalitat dels nodes

la banda de 2.4 GHz ISM, 40 kbps a la banda de 915 MHz ISM i 20 kbps a la banda de 868 MHz ISM. La modulació O-QPSK s'utilitza a la banda de 2.4GHz ISM, mentre que la BPSK és l'escollida per les dues bandes restants.

L'estàndard 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 d'operació amb l'increment de la potència de transmissió. Pel que respecta a la capa MAC, les principals funcionalitats definides inclouen: el control d'accés al canal, la validació de trames, la transmissió de trames d'ACK i l'associació i dissociació de nodes. A més, defineix dos tipus de dispositius (els elements més bàsics de la xarxa) segons la seva funcionalitat [?]: Dispositius de funcionalitat completa (Full Function Devices, FFD) i Dispositius de funcionalitat reduïda (Reduced Function Devices, RFD) que només proporcionen un conjunt reduït o parcial dels serveis MAC IEEE 802.15.4

B. Capes superiors: ZigBee

Les capes superiors de ZigBee són les responsables de: la gestió de l'enrutament de paquets, la formació d'aquests a partir de les dades de l'aplicació, la gestió dels nodes entrants i sortints 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 la seguretat de les comunicacions.

Una xarxa ZigBee pot adoptar una de les tres topologies que es mostren en la figura 2 (estrella, arbre de clústers o malla). La forma com s'enruten els missatges d'un node a un altre depèn de la topologia.

Així mateix, en qualsevol xarxa ZigBee és 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, a les altres topologies calen nodes que retransmetin els missatges dels nodes veïns a un altre node superior, aquests

	JN5139-Z01-M03	Notes
Sensibilitat en recepció	-96 dBm	Valor nominal per a 1% PER (Packet Error Rate), d'acord amb la secció 6.5.3.3 de [?]
Potència de transmissió màxima	+1 dBm	Valor nominal
Potència de transmissió a 3.6 V	-	Amb tensió d'alimentació del microcontrolador $V_{DD} = 3.6$ V (màxima)
Màxim senyal d'entrada	0 dBm	Per a un PER = 1%
Rang RSSI	-95 a -10 dBm	
Impedància del Port RF - Conector SMA	50 Ω	2.4 - 2.5 GHz

Taula I

dispositius actuen com a encaminadors o *routers*. Segons la funció que desenvolupen a la xarxa, els nodes ZigBee es poden classificar en coordinador, *router* i dispositiu final (ED). Els dos primers necessàriament han de ser dispositius FFD, segons l'IEEE 802.15.4, mentre que els ED poden ser tant FFD com RFD.

- 1) Coordinador PAN: Totes les xarxes ZigBee n'han de tenir un, i només un, independentment de la topologia de la xarxa. El node coordinador és necessari, principalment, per a iniciar, mantenir i gestionar l'alta i baixa de nodes a 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 estendre l'àrea d'actuació d'aquesta.
- 3) Dispositiu final (ED, de End Device): 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 transmetent o rebent missatges, passen a un estat latent de baix consum (mode Sleep) per tal d'estalviar energia.

III. SOLUCIÓ ZIGBEE COMERCIAL: Jennic Development Kit

Per a comprovar les característiques d'una solució comercial ZigBee típica, s'ha fet servir el JDK. Aquest kit proporciona tot el hardware i les eines software necessaris 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 constitueixen els nodes (figura 3).

El JN5139 és un microcontrolador wireless 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

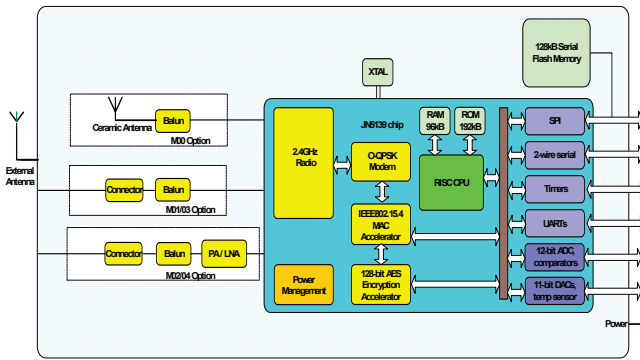


Figura 3. Esquema dels elements que formen un mòdul JN5139-Z01-M03

conjunt variat de perifèrics, tant analògics com digitals [?] que li permeten connectar-se amb una àmplia varietat de sensors. El JN5139 utilitza una arquitectura de memòria unificada: on la memòria de programa, la memòria de dades, els perifèrics i els ports E/S s'organitzen dins el mateix espai lineal d'adreces. El dispositiu 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. Totes aquestes característiques converteixen el JN5139 en un microcontrolador altament eficient, de baix consum, i en una solució integrada molt adequada per a aplicacions wireless que requereixin dispositius alimentats per bateries.

IV. TESTS EXPERIMENTALS PROPOSATS

Per tal de caracteritzar el comportament dels del mòdul JN5139-Z01-M03 de Jennic, com a exemple de nodes ZigBee comercials, es van desenvolupar tres tests experimentals: el primer per a caracteritzar el consum del node a diferents potències de transmissió (P_{Tx}), un segon test per mesurar empíricament la P_{Tx} de sortida dels nodes i un darrer test per a caracteritzar el comportament de l'enllaç radio entre dos nodes.

A. Potència de transmissió disponible i consum dels nodes

Es va mesurar la potència de transmissió de sortida (P_{Tx}) dels mòduls JN5139-Z01-M03 en cadascun dels 6 nivells de potència de transmissió de què disposen. La figura 5 mostra el muntatge realitzat. Durant el test, la placa es trobava connectada a una font d'alimentació externa a 5.6 V DC, cosa que suposava que el microcontrolador rebés una alimentació constant de 3 V. 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.

Per altra part, 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'inserí una resistència de $R_m = 14 \Omega$ (valor seleccionat per a no alterar el valor de

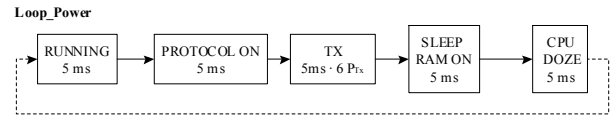


Figura 4. Esquema de seqüència d'estats de consum del programa *Loop_Power*

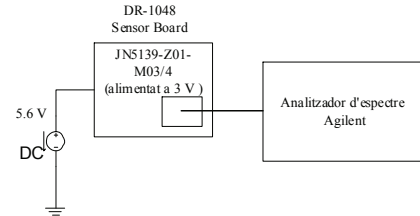


Figura 5. Esquema del muntatge experimental per a mesurar la P_{Tx} de sortida dels mòduls

les mesures) entre els pins 2 i 3 del *jumper* J2 de la placa *DR-1048 Sensor Board* de Jennic on es muntaren els mòduls ([?]). Mesurant la caiguda de tensió sobre la resistència R_m amb l'oscil·loscopi, es va 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.

El resultats més rellevants foren amb les mesures obtingudes referents al consum de corrent que suposa la transmissió utilitzant els diferents nivells de potència disponibles als mòduls, per a poder comparar el consum amb la P_{Tx} efectiva dels mòduls. La figura 7 mostra el comportament del mòdul durant el procés de mesura.

B. Test de l'enllaç ràdio entre dos nodes IEEE 802.15.4

L'objectiu d'aquest test fou analitzar el comportament de l'enllaç ràdio entre dos nodes que es comuniquen per mitjà del protocol IEEE 802.15.4, implementats amb els mòduls JN5139-Z01-M03 de Jennic. El test es va dissenyar per tal d'enregistrar i avaluar el conjunt d'indicadors que permetran caracteritzar estadísticament l'enllaç ràdio.

Aquests indicadors s'han classificat en dos tipus: estadístics i puntuals.

Els indicadors puntuals són proporcionats pel *hardware* ràdio i aporten informació de l'estat del canal en un instant concret, com l'energia detectada en un moment donat, o durant períodes de temps molt curts, com l'energia detectada corresponent a un conjunt de bytes d'una trama rebuda.

- *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 amb allò especificat a [?], 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

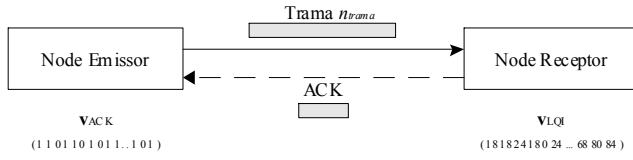


Figura 6. Esquema del disseny del test d'enllaç ràdio entre dos nodes proposat

dades prèvies sobre el canal, i això pot suposar un cost temps i un cost energètic.

- *Packet Reception Rate (PRR)*: Representa la proporció de trames que s'han transmès correctament¹ envers el nombre total de trames transmeses per un node. Es pot calcular mitjançant la següent expressió:

$$PRR = \frac{G}{A} \quad (1)$$

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

El test dissenyat es realitza a nivell d'enllaç; per tant, implica només dos nodes, que anomenarem "node emissor" i "node receptor". El node emissor s'associarà al node receptor i transmetrà un nombre preestablert de trames de forma continuada en mode ACK².

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 correctament rebudes. El node emissor emmagatzemarà dades 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.

C. Entorn experimental per al test de l'enllaç ràdio

La ubicació seleccionada per a dur a terme el test de l'enllaç ràdio fou un carrer (sense nom) adjacent a les instal·lacions esportives del campus de la Universitat de les Illes Balears.

Aquesta escenari fou seleccionat per a permetre una visió directa entre els nodes durant l'experiment en un espai exterior.

Es varen determinar 7 ubicacions per al node transmissor a diferents distàncies del node emissor, concretament múltiples de 20 m. 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 d'1.65 m, mentre que la del node transmissor fou d'aproximadament 1.60 m, igual per a totes les ubicacions.

¹Es 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'excedir un temps màxim donat.

²El mode ACK (*Acknowledge*) implica que, cada vegada que un node rep correctament una trama, envia al node emissor d'aquesta un missatge de confirmació

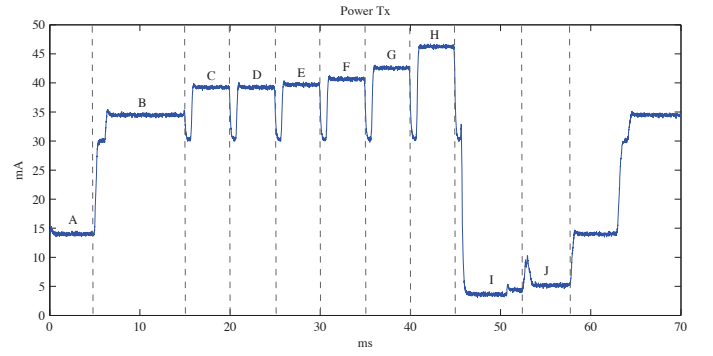


Figura 7. Consum de corrent mesurat en l'execució de *Power_Tx* per al mòdul JN5139-Z01-M03

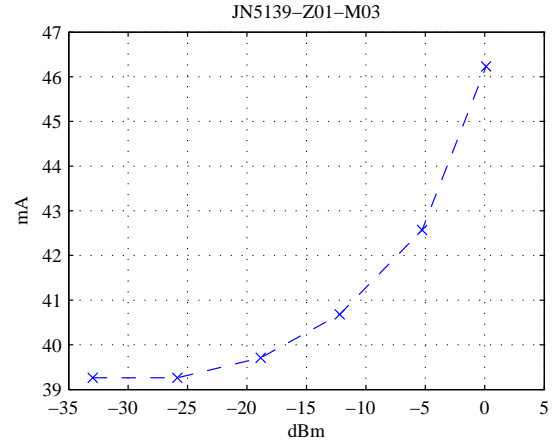


Figura 8. P_{Tx} vs. consum de corrent dels mòduls JN5139-Z01-M03 de Jennic

V. ANÀLISI DELS RESULTATS

A. Potència de sortida del transmissor i consum del mòdul

Les dades obtingudes en els test de consum i de P_{Tx} de sortida s'han combinat per elaborar el gràfic de la figura 8, que mostra la relació entre la P_{Tx} de sortida als diferents nivells disponibles i el consum de corrent del mòdul durant la utilització d'aquests.

S'ha pogut observar que el consum del mòdul augmenta de forma no lineal quan s'incrementa el nivell de P_{Tx} . En augmentar el nivell de P_{Tx} 3 al 4, es produeix un augment en la P_{Tx} de 6.65 dB, pràcticament igual que quan es passa del nivell 4 al 5 (6.47 dB). En canvi, la diferència de consum entre el nivell de P_{Tx} 3 i el 4 és inferior a la diferència de consum entre els nivells 4 i 5. Aquesta diferència en l'increment del consum podria derivar de la forma en què aquest *hardware* està dissenyat i dels diferents consums dels amplificadors que generen els diferents nivells de P_{Tx} .

Es podria pensar que es tracta d'un cas concret per als mòduls de Jennic, però també es dona en altres transceptors comercials IEEE 802.15.4, com el CC2420 de Chipcon [?].

Aquest augment no lineal del consum amb l'augment de la P_{Tx} pot tenir implicacions significatives en la selecció del nivell de P_{Tx} d'un node, i fer encara més important des del punt de vista energètic la selecció del nivell de P_{Tx} en funció del medi i el node.

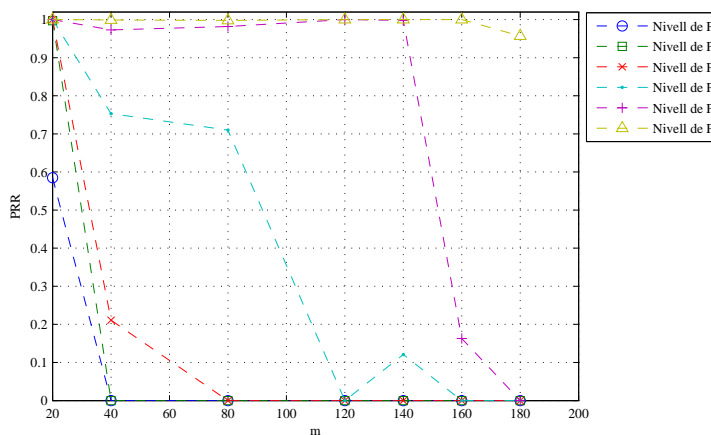


Figura 9. PRR en funció de la distància per a diferents P_{Tx} a l'entorn experimental exterior seleccionat

- Taula amb la P_{Tx} de sortida i una imatge d'exemple de l'espectre
- Imatge de consum en els diferents nivells de P_{Tx}

B. Test de l'enllaç ràdio entre dos nodes IEEE 802.15.4

La figura ?? mostra l'evolució del PRR en funció de la distància a diferents nivell de P_{Tx} obtinguda a l'entorn experimental. Es pot observar com el PRR cau a mesura que augmenta la distància. A tots els nivell 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 120 m, amb un $PRR = 0$, tot i que a 140 m aquest torna a pujar. És possible considerar que, amb aquest nivell, a partir de 100 m ens trobam a 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.

S'ha observat que, fins i tot a 180 m, tenim una bona qualitat de comunicació si s'utilitza el nivell de P_{Tx} màxim (que implica transmetre a aproximadament 0 dBm).

D'altra banda, s'ha volgut comparar l'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'LQI. Aquest estudi pretén mostrar si es pot determinar un valor llindar mínim d'LQI independent de l'entorn, que assegurí una bona qualitat d'enllaç, és a dir, un PRR proper a 1. Trobar aquest valor llindar d'LQI permetria discriminar la fiabilitat d'un enllaç de forma pràcticament instantània.

Per a cada entorn experimental s'ha creat un conjunt de gràfiques corresponents a cadascuna de les ubicacions del node ED seleccionades als diferents escenaris. Els punts d'aquestes gràfiques es corresponen amb les parelles de valors ($LQI_{i,j}$, $PRR_{i,j}$) obtingudes. Aquests punts s'han agrupat en funció de i , és a dir, en funció del nivell de P_{Tx} .

La corba de la gràfica correspon a l'estimació obtinguda aplicant eines de regressió polinòmiques sobre el conjunt de

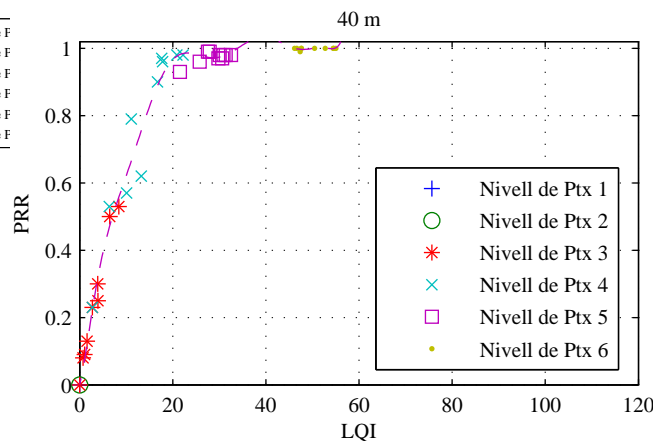


Figura 10. LQI vs PRR a Escenari exterior I amb distància entre nodes de 40 m.

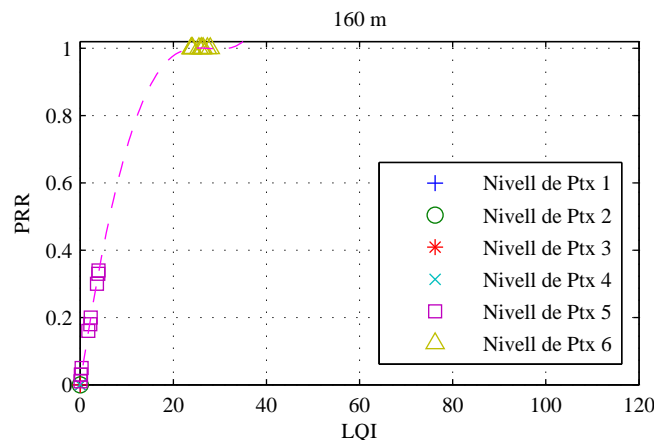


Figura 11. LQI vs PRR a Escenari exterior I amb distància entre nodes de 160 m.

tots els punts d'aquell. Aquesta estimació mostra la tendència que segueixen els punts.

Les figures 10, ?? mostren dos exemples de gràfiques LQI vs. PRR obtingudes. La figura 10 es correspon a la situació en que la distància entre els nodes era de 40 m. La figura XXXX es correspon amb una distància de 100 m.

S'ha observat que existeix un valor d'LQI llindar per sota del qual el PRR varia de forma considerable per a canvis petits del valor mitjà d'LQI. S'ha observat que aquest valor d'LQI llindar és sempre ≥ 20 . *A priori*, caldria evitar transmetre amb els nivells de P_{Tx} on la variabilitat de PRR fos elevada per a assegurar una bona qualitat de l'enllaç.

VI. CONCLUSIONS I FUTURS TREBALLS

S'ha pogut observar com el consum dels nodes, 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 donava en transceptors d'altres fabricants. Aquesta relació entre els nivells de P_{Tx} i el consum augmenta els beneficis de determinar el nivell de

P_{Tx} més adequat i fer-lo servir, en lloc d'emprar la màxima P_{Tx} disponible com es fa per defecte.

{Possibilitat de definició de l'índex de decisió i proposta d'algoritme}

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 l'LQI és manté baixa.

{Conclusions de l'estudi - Introducció a l'índex de decisió i la possibilitat d'un algoritme}