

Control d'un sistema de rails mitjançant una xarxa de nodes sense fils basada en ZigBee

Javier Oliver Bennassar i Bartomeu Alorda

P.F.C. Ingeniería Técnica Industrial, especialidad en Electrónica Industrial

Resum— Aquest article detalla el desenvolupament d'un node controlador d'elements d'un sistema de rails usant el protocol ZigBee. Partint d'un sistema de rails on els vehicles estan dotats de capacitats de comunicacions ZigBee es pretén implementar un nou tipus de node, que integrant-se dins la xarxa establerta permeti la interacció amb la resta d'elements del sistema (canvis de via, il·luminació, sistemes d'avís en es passos a nivell, ...). També s'han explorat les limitacions d'integració de les revisions 2004 i 2006 del protocol, la caracterització física del mòdul emissor del fabricant Microchip i la facilitat d'integració en una xarxa basada en mòduls del fabricant Jennic.

I. INTRODUCCIÓ

La navegació de vehicles en espais oberts és una de les disciplines de la robòtica que permet a un sistema mòbil arribar allà on se'l necessita. El sistema de rails es caracteritzen per limitar els possibles moviments del vehicle, ja que existeix un sistema de guiatge que en limita les possibles trajectòries i a la vegada en simplifica el sistema de control. Un dels sistemes de guiatge més conegut són els rails usats pels ferrocarrils, tramvies i metros. En els sistemes tradicionals de vehicles sobre rails els elements de guiatge són els canvis de via, els semàfors, sistemes de localització i sistemes de pas a nivell. Tots aquests sistemes es gestionen des de la unitat central de control mitjançant una xarxa de comunicacions que generalment és en topologia d'arbre i basada en cablejat.

La utilització de sistemes de comunicacions sense fils està fent possible que elements que estan en moviment un respecte a l'altre es puguin comunicar i autogestionar-se sense necessitat de la intervenció de tercers. La proposta que es pretén desenvolupar es basa en la utilització d'una xarxa de nodes sense fils que permeti una gestió local de la ruta. Així, els vehicles tenen capacitats de gestionar el seu entorn proper, decidir accions en funció de la posició dels sistemes de guiatge o comunicar-se entre ells per a determinar la correcta posició en cas de creuar-se.

Una solució d'aquest tipus permetria optimitzar recursos, ja que els espais entre vehicles es podrien reduir. Flexibilitat enfront a situacions no previstes, ja que aquests es poden detectar abans i la presa de decisions es més ràpida per ser local. A més, el sistema és totalment compatible amb els actuals sistemes pel fet d'utilitzar diferents mitjans de comunicació alternatius. Per una banda es dota al vehicle de capacitat d'autogestió, però a més, el conductor aconsegueix el màxim d'informació sobre l'estat dels elements de ruta, els vehicles propers o l'adequada senyalització del seu pas.

Aquesta solució és aplicable no només en sistemes de transport de passatgers, sinó també a sistemes de logística automatitzats, gestió de magatzem, mecanismes de prevenció de col·lisions, transport de mercaderies autònoms o fins i tot la gestió d'autovies d'alta velocitat com a possibles aplicacions futures.

La resta de l'article es troba organitzat de la següent forma: la secció següent detalla l'evolució i l'estat actual del sistema que està en procés de desenvolupament. Seguidament la tercera secció introdueix les característiques bàsiques de la tecnologia ZigBee. La quarta secció descriu el desenvolupament del node controlador de canvis de ruta i accessoris, mentre que la cinquena secció es centra en la caracterització física del mòdul emissor de Microchip usat en el projecte. La sisena secció descriu el codi creat pel node i la integració amb el software de gestió del sistema ZigBee. Finalment es detallen les conclusions principals del treball.

II. EVOLUCIÓ DEL SISTEMA

En el marc d'un conveni industrial el departament de física de la UIB va adquirir una maqueta ferroviària amb l'objectiu d'estudiar les possibles alternatives de control que es poden implantar en els vehicles que es mouen sobre sistemes de rails. El sistema de control original triat es basava en el desenvolupat pel fabricant alemany ZIMO [1]. La tria d'aquest sistema es va condicionar per les possibilitats d'emular els sistemes actuals de control existents en diferents xarxes ferroviàries. El sistema original es mostra a la Fig. 1.

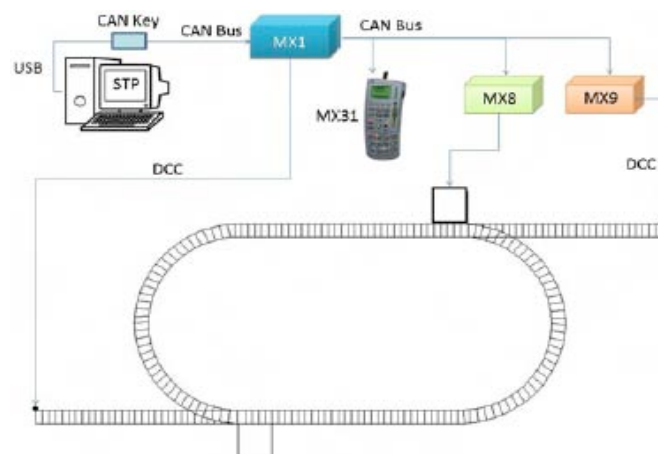


Figura 1. Sistema de control original de ZIMO

L'element principal del sistema és el mòdul MX1 que actua com a centraleta o sistema de comandament centralitzat,

però també com a sistema d'alimentació dels vehicles. Existeixen altres tres elements addicionals al sistema: el mòdul MX31 que permet indicar manualment qualsevol ordre a la resta de mòduls. El mòdul MX8 que és el controlador dels elements no mòbils del sistema (semàfors, canvis de via, senyals lluminosos, ...). I el mòdul MX9 que permet conèixer la secció que ocupen cada un dels vehicles. Els vehicles estan dotats d'un element indispensable: el descodificador MX69. Aquest dispositiu, que s'instal·la en tots els vehicles permet el control del moviment d'aquests remotament a través del processament dels missatges que la centraleta MX1 envia a través de les vies mitjançant el protocol de comunicació DCC.

La proposta de control del sistema que s'està explorant en diverses etapes es basa en un control distribuït a partir d'una xarxa de sensors. En aquesta proposta els elements poden comunicar-se entre si sense la intervenció de tercers o centrals. La tecnologia elegida pel desenvolupament del sistema es basa en la pila de protocols ZigBee, sistema que s'introduirà amb major detall a la secció III. Per aconseguir aquest desenvolupament el primer objectiu va consistir en l'aprofundiment del funcionament del sistema adquirit a través de la creació d'un conjunt de llibreries que varen permetre adaptar el control del sistema ZIMO a les necessitats requerides en el conveni [2,3]. Seguidament es van desenvolupar la primera de les accions per substituir tots els elements de control dels vehicles i constituir una xarxa de sensors que permetés localitzar i gestionar les funcions dels vehicles. Així es va dotar als vehicles d'un node ZigBee amb capacitats de comunicació i de control sobre el vehicle [5]. A més, es va estudiar la possibilitats de crear un sistema de localització sobre la mateixa locomotora oferint uns bons resultats [4]. D'aquesta forma la primera etapa va veure la llum quedant el sistema com el mostrat a la Fig. 2. El mòdul MX9 es van eliminar, l'alimentació del sistema provenia d'una font externa i es mantenien en el sistema el mòduls MX1 i MX8 per al control dels elements de ruta i senyalitzacions.

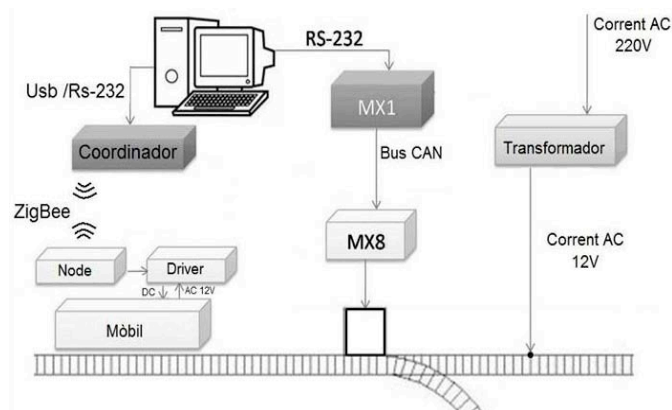


Figura 2. Sistema de control dels vehicles basat en ZigBee

Aquest article es centra en el desenvolupament d'un nou node ZigBee que permeti la substitució dels mòduls MX1 i MX8. A més, es va voler explorar la compatibilitat entre alternatives de diferents fabricants i l'estudi de les capacitats físiques del nou emissor.

III. LA TECNOLOGIA ZIGBEE

La pila de protocols ZigBee es tracta d'una tecnologia sense fils relativament nova, que va ser definida en un principi com a xarxa d'àrea personal (WPAN), però que està essent utilitzada en la comunicació entre dispositius que tinguin un requeriments d'una baixa taxa de transmissió de dades i una simplificació del protocol.

El protocol ZigBee va ser definit per un grup d'empreses agrupades amb el nom de *ZigBee Alliance* [6]. A [7] es presenta una detallada informació sobre aquest protocol i les característiques físiques dels dispositius fabricats per Jennic [8] i usats en els projectes [4] i [5].

Els tipus de nodes que poden existir en una xarxa ZigBee són de tres tipus:

- **Coordinador:** és el node més important, ja que és l'encarregat d'iniciar la xarxa i realitzar la gestió de peticions de connexió, pèrdues de nodes i assignació d'adreces. Només pot hi haver un coordinador actiu dins cada xarxa al mateix temps.
- **Dispositiu Final o EndDevice:** és el node que desenvolupa les funcions distribuïdes.
- **Router:** La seva funció és la de estendre l'àrea de cobertura del node coordinador.

Com es pot apreciar a la Fig. 2, la xarxa sense fils està format per un Coordinador connectat a un ordinador i pels dispositius finals situats en cada una dels mòbils. La topologia usada en aquests moments és en estrella, per tant tota la informació que circula per la xarxa passa necessàriament pel node Coordinador. Aquesta topologia es variarà en futures implementacions per a permetre una comunicació entre nodes amb independència del node principal.

IV. DESENVOLUPAMENT D'UN MÒDUL ZIGBEE: HARDWARE

El sistema desenvolupat fins ara es basa en la utilització d'una plataforma d'avaluació propietat de l'empresa Jennic [8]. Aquesta plataforma implementa l'especificació del protocol ZigBee 2004, una de les primeres que es va publicar.

Per la implementació del nou mòdul ZigBee es va optar per l'emissor del fabricant Microchip [9] que en aquest cas implementava l'especificació del protocol ZigBee 2006. El fet de triar diferents fabricants ha aportat una certa incertesa a l'hora d'establir comunicacions entre dispositius que en principi seguien un mateix estàndard.

El tractament de la implementació feta del nou node ZigBee basat en un emissor de Microchip s'ha dividit en dues parts: primerament es descriurà el disseny i fabricació del node sense fils i, seguidament, la implementació del sistema de control d'accessoris (canvis de ruta i altres elements).

A. Node de comunicacions ZigBee/Microchip

Aquest sistema tindrà les funcions d'establir la comunicació amb el Coordinador de la xarxa i de processar les comandes rebudes executant-les mitjançant la placa de control d'accessoris. El node estarà format per tres seccions:

- **Secció de captació/transmissió de senyals:** la seva funció serà fer l'adaptació al medi físic seguint les especificacions IEEE 802.15.4.

- **Secció de comunicació:** la seva funció es situa en la capa MAC de la pila de protocols ZigBee i s'encarrega d'establir un enllaç punt a punt entre nodes dins la mateixa xarxa.
- **Secció de control:** permet la implementació de la resta de capes definides a ZigBee i a més, pren les decisions adequades sobre el sistema d'accessoris.

Les seccions de comunicació i de captació del senyal s'han implementat a partir del mòdul MRF24J40MA de Microchip. A la Fig. 3 es mostra un detall d'aquest mòdul que incorpora l'antena integrada sobre la mateixa PCB.

La secció de control s'ha realitzat amb un microcontrolador, el PIC18LF2620, ja que disposa de totes les característiques necessàries per a executar el software amb la resta de capes de la pila de ZigBee.



Figura 3. Mòdul MRF24J40MA de Microchip

La connexió definitiva d'aquestes seccions s'ha realitzat seguint l'esquema mostrat a la Fig. 4.

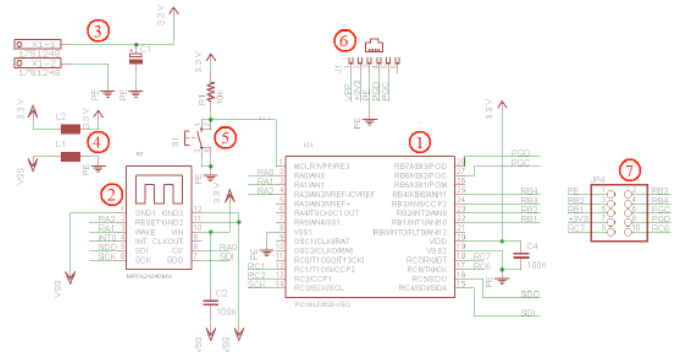


Figura 4. Esquema de connexions del node de comunicacions ZigBee/Microchip

Es pot observar com, a més del microcontrolador (número 1 a la Fig. 4) i el mòdul MRF24J40MA (component 2 a la Fig. 4), existeixen altres components. El component 3 es tracta del connector d'alimentació que ha de ser d'uns 3.3 V_{DC}. L'element 5 és el botó de *reset* del microcontrolador. El component 6 es el connector de programació, necessari per a programar el microcontrolador amb el software. El component 7 és el connector que permetrà comunicar el microcontrolador a la placa controladora d'accessoris. Per acabar el component 4 són dues "ferritas" que han estat introduïdes per a separar el pla d'alimentació i el pla de massa de la secció de transmissió

del de la secció de control. A la Fi. 5 es mostra el layout definitiu amb la col·locació definitiva dels elements sobre la PCB. La numeració usada a la Fig. 5 és la mateixa que la usada a la Fig. 4.

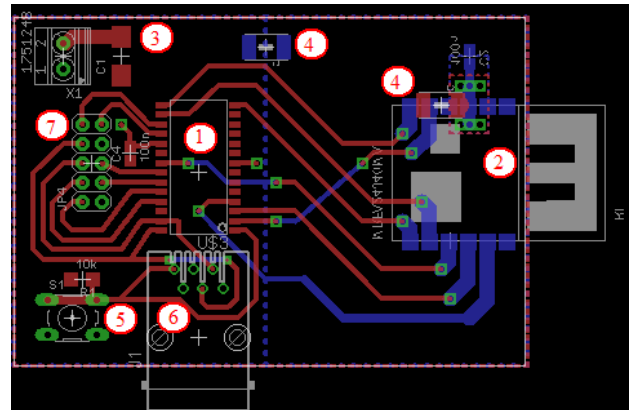


Figura 5. Layout del node ZigBee/Microchip

En el disseny de la placa definitiva s'ha tingut especial cura a la col·locació del mòdul MRF24J40MA. Es pot observar a la Fig. 5 com l'antena del mòdul està situada fora dels límits de la PCB. Aquesta col·locació s'ha fet així per a permetre una correcta emissió del senyal RF. A més, a la Fig. 6 es mostra la col·locació definitiva de les "ferritas" separant els plans d'alimentació i massa de la secció de control de la resta de seccions. La situació de la "ferrita" mostrada a la Fig. 6(b) permet veure en claretat el dos plans de massa.

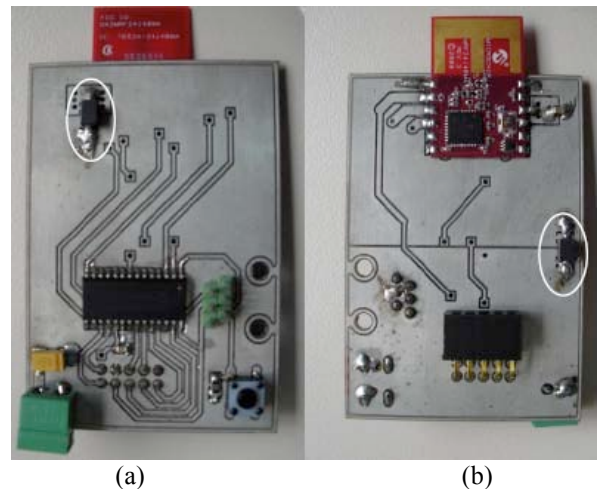


Figura 6. (a) Visió superior i (b) inferior del node ZigBee/Microchip

A la cinquena secció d'aquest document es mostren els resultats obtinguts de la caracterització energètica del node ZigBee/Microchip implementat.

B. La controladora d'accessoris

El control dels accessoris de ruta de la maqueta es realitza amb aquesta segona PCB. Els accessoris principals que es pretenen controlar són els canvis de ruta, que actuen directament sobre la ruta seguida pels vehicles. Els canvis de ruta estan formats per petits motor en continua que accionen el moviment dels rails.

Per aquest motiu sobre la controladora d'accessoris s'hi han dissenyat dos interfícies de control de motors en contínua a través d'un senyal PWM generat des del microcontrolador. A més a més, aquesta controladora també disposa d'una font d'alimentació capaç de generar els nivells de voltatge adequat a partir del voltatge AC present sobre els rails.

- **Sistema d'alimentació:** es tracta d'una font convertora AC/DC formada per un rectificador (component 2 de la Fig. 7), un filtre i els reguladors per facilitar uns nivells de contínua adequats per cada part del sistema. Així es fan necessaris 3 reguladors: un de 3.3 V_{DC} per alimentar al node ZigBee/Microchip (component 5 de la Fig. 7), un segon de 5V_{DC} per alimentar els components digitals i altres accessoris (component 4 de la Fig. 7), i finalment un de 9V_{DC} per alimentar els motors dels canvis de ruta (component 3 de la Fig. 7).

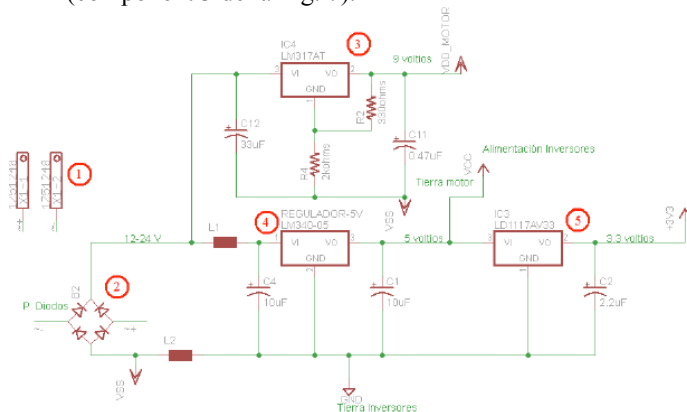


Figura 7. Esquemàtic de la font d'alimentació implementada

- **Control de motors:** En aquest cas s'ha fet servir el controlador L293NE (component 5 de la Fig. 8). Permet activar un màxim de dos motors a la vegada mitjançant una modulació PWM. També s'hi ha afegit un *buffer* elevador (component 2 de la Fig. 8) que transforma els senyals de 3.3V_{DC} del node ZigBee/Microchip en senyals de 5V_{DC} pel controlador de motors.

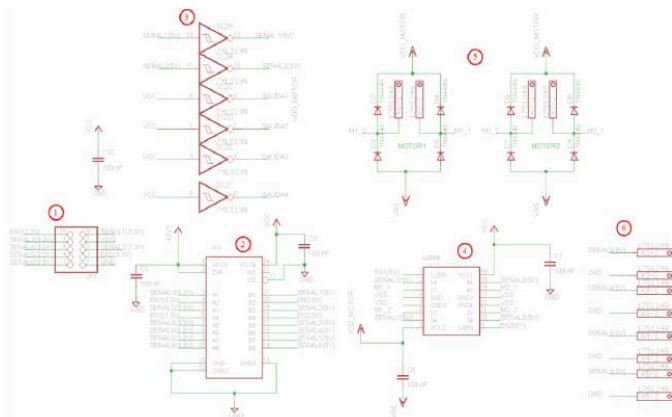


Figura 8. Esquemàtic del circuit de control de motors

S'han fet servir capacitats de desacoblament per a reduir les interferències entre els circuits de la placa. El layout definitiu es mostra a la Fig. 9 on es poden diferenciar els circuits de control i alimentació.

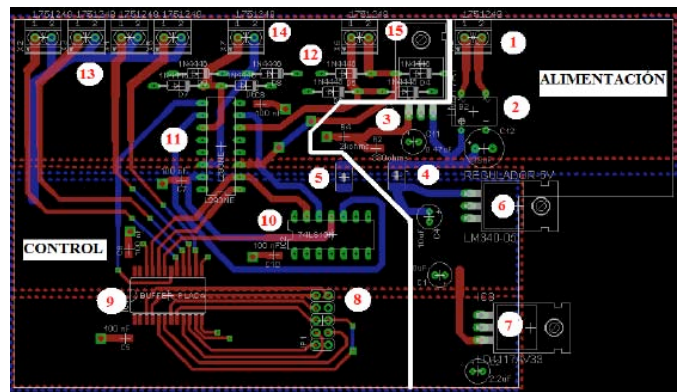


Figura 9. Layout de la placa controladora d'accessoris

La Fig. 10 mostra les dues PCB connectades i preparades per a ser utilitzades en una xarxa ZigBee, mentre la Fig. 11 mostra l'acabat definitiu del node controlador dins una caixa adaptada.



Figura 10. Controlador d'accessoris ZigBee/Microchip complet



Figura 11. Aspecte definitiu del controlador

V. ESTUDI DE L'ENERGIA CONSUMIDA

De la mateixa forma com es va fer a [7] amb el controlador de Jennic, també en aquest cas, s'ha realitzat un estudi de l'energia consumida pel dispositiu emissor de Microchip. En aquest cas, la mesura s'ha realitzat forçant una emissió constant d'informació amb un nivell de potència i en un canal definit prèviament. La Fig. 12 mostra una captura de pantalla de l'analitzador d'espectre on es pot veure el perfil de potència quan l'emissor es configura a màxima potència. Es poden veure els armònics i la freqüència central a 2.405625 GHz que correspon al canal 11. El valor màxim en aquest cas és de 6.4 dBm, enlloc del teòric 0dBm degut a que l'antena està integrada sobre la mateixa PCB i la captació del senyal per part de l'analitzador d'espectre s'ha realitzat mitjançant una antena monopòl.

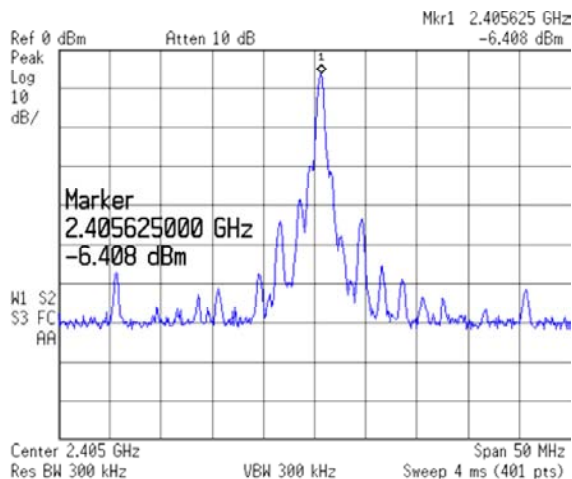


Figura 12. Espectre de potència del canal 11 quan el transmissor es configura a la potència teòrica de 0dBm

S'han realitzat mesures del corrent de consum del dispositiu emissor a cada una de les potències d'emissió. La mesura del corrent de consum s'ha realitzat intercalant una resistència de mesura entre la font d'alimentació i el dispositiu emissor. I mitjançant una sonda diferencial, s'ha obtingut la caiguda de tensió deguda al pas del corrent. La Fig. 13 mostra la gràfica obtinguda pel Canal 11 on es pot veure un màxim de consum d'uns 30 mA i un mínim de 17.5mA. S'ha de fer notar que la potència s'ha expressat en dBm, mostrant que per baixes potències el cost d'emetre a -20dBm respecte a emetre a -30dBm és només d'1mA, mentre que per potències elevades el consum s'incrementa més ràpidament.

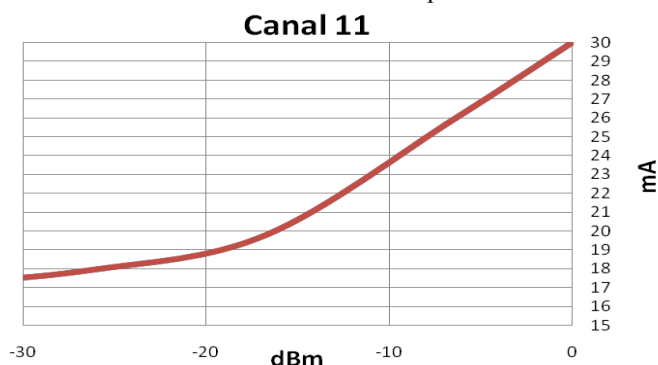


Figura 13. Evolució del consum energètic del node ZigBee/Microchip expressat en mA respecte a la potència de sortida mesurada en dBm usant el Canal 11 com a freqüència central.

El mòdul MRF24J40MA disposa de fins a 32 nivells possibles de potència agrupats en 4 nivells principals i 8 nivells secundaris per cada nivell principal. És a dir, és possible fer salts de potència entre nivells principals i ajustar el nivell secundari final. La Figura 13 mostra només l'evolució del consum quan s'activen els nivells principals de potència. La mateixa representació s'ha realitzat per a tots els nivells secundaris de potència, però en aquest cas usant el canal 18. Els resultats obtinguts es mostren a la gràfica de la Fig. 14. Es pot veure com el consum pràcticament no varia quan es modifica el nivell de potència secundària. Es tracta d'un comportament on la variació important de consum es produeix quan es realitza un canvi de potència principal,

mentre que el consum es manté en els canvis de potència secundària.

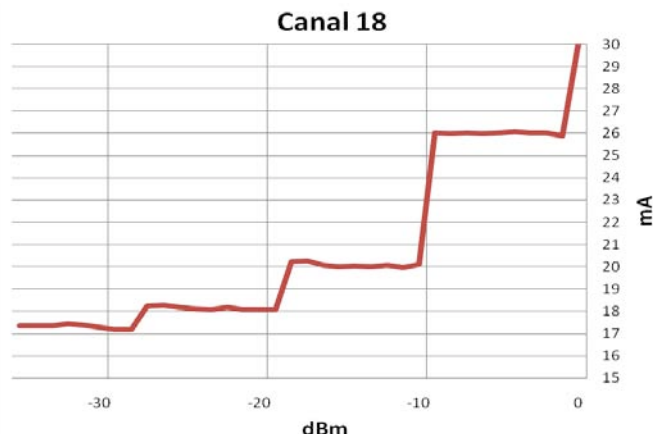


Figura 14. Evolució del consum energètic del node ZigBee/Microchip expressat en mA respecte a la potència de sortida mesurada en dBm, usant tota la graduació de potències que permet el node i el Canal 18 com a freqüència central.

Una segona característica que es pot observar en els resultats mostrats a la Fig. 14 és l'increment en el consum energètic en els canvis de les potències principals elevades. Així passar de -20 dBm a -10dBm incrementa el consum en 2mA, mentre que passar de -10 dBm a 0 dBm l'increment és d'uns 20mA.

VI. PROGRAMACIÓ DEL MÓDUL ZIGBEE/MICROCHIP

La pila de protocols ZigBee no especifica el nivell d'aplicació, per aquest motiu s'ha dissenyat la metodologia de comunicació entre el node Coordinador/Jennic i el mòdul d'accessoris ZigBee/Microchip. L'aplicació del node Coordinador es basa en els treballs previs [4,5]. Per tant, s'hi han afegit les parts de codi per a comunicar-se amb els nous tipus de nodes de la xarxa. La Fig. 15 mostra el diagrama de flux del programa d'aplicació usat en el Coordinador i amb les noves funcions afegides.

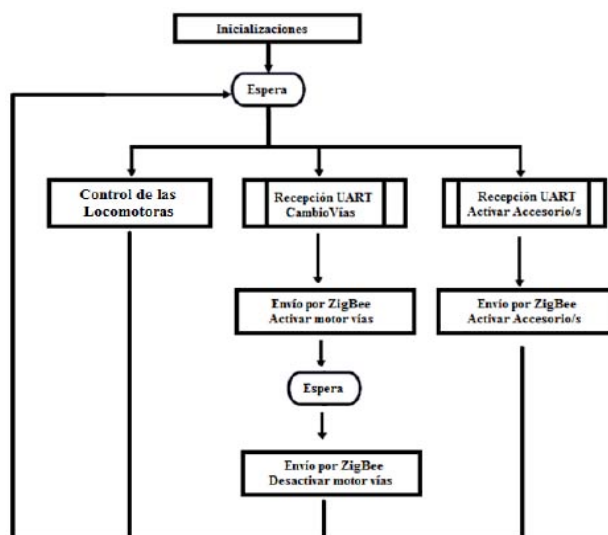


Figura 15. Diagrama de flux del programa d'aplicació del node Coordinador/Jennic

En el cas del programa d'aplicació del node *EndDevice/Microchip*, la diferenciació dels missatges es realitza gràcies a l'*EndPoint* al qual van dirigits. Aquesta particularitat es deguda a certes incompatibilitats existents entre la versió 2004 del protocol ZigBee del Coordinador/Jennic i la que es disposa per al node *EndDevice/Microchip* (versió 2006). L'aplicació del node *EndDevice/Microchip* el primer que fa és verificar a quin *EndPoint* va dirigit el missatge per a saber quina de les accions possibles ha de realitzar. El trobar una forma per a fer possible la comunicació entre les versions ha estat una de les dificultats més importants d'aquest treball.

VII. APLICACIÓ DE CONTROL PER ORDINADOR

Per a la gestió del sistema s'ha desenvolupat una aplicació de control que a través d'una connexió a l'ordinador personal permeti conèixer l'estat del sistema i interactuar amb els nodes de la xarxa. La Fig. 16 mostra el panell de l'aplicació creat per [2-5] pel control de les locomotores. La pantalla de l'aplicació permet actuar sobre els vehicles indicant el sentit, la velocitat i la posició que han d'ocupar. A més, es disposa d'una pantalla per a marcar rutes automàtiques i una altra per gestionar el mòdul d'accessoris, veure Fig. 17.

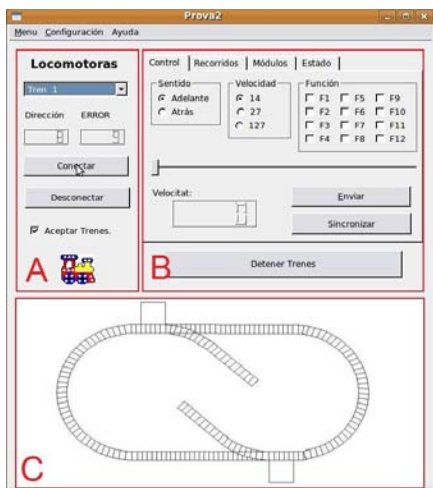


Figura 16. Aspecte panell frontal de l'aplicació

En aquest treball s'ha adaptat la secció d'accessoris per a permetre el control del mòdul implementat. Com es pot veure a la Fig. 17 és possible accionar fins a dos canvis de ruta independentment i fins a quatre accessoris extra amb un control ON/OFF.

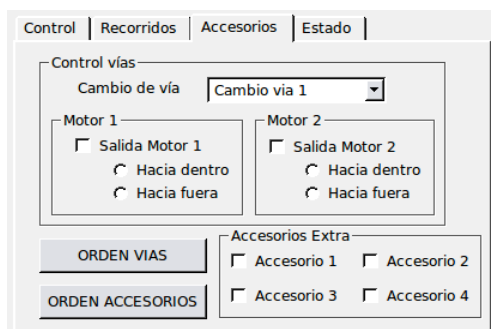


Figura 17. Aspecte final del panell de control del mòdul d'accessoris

VIII. CONCLUSIONS

En aquest treball es mostra el desenvolupament d'un mòdul de gestió d'accessoris per a sistemes de vehicles guiats per rails. Es descriu amb detall l'evolució del sistema i l'estat actual del mateix, així com el disseny i implementació del mòdul *EndDevice/Microchip*. Aquest mòdul és capaç de substituir l'element MX8 de ZIMO i integrar-se en una xarxa de nodes basada en ZigBee. La implementació es basa en un element emissor de Microchip, que usant les especificacions 2006, ha permès l'estudi tant de les seves característiques elèctriques, com de les característiques del protocol. Aquest anàlisi ha permès determinar una possible via de comunicació entre un node Coordinador/Jennic i un node *EndDevice/Microchip*. El treball ha permès la verificació i ampliació de l'estudi realitzat per [7], així com de l'adaptació de l'aplicació de control per admetre els nous tipus de nodes.

El sistema complet ha estat exposat a l'edició 2010 de la Fira de la Ciència organitzada pel Govern de les Illes Balears i ha estat en funcionament continu el tres dies de la Fira mostrant el seu bon comportament enfront d'un ús intensiu.

Com a tasques futures es pretén avançar en l'autonomia dels vehicles i la interacció entre els nodes existents, a més, es preveu l'actualització de la versió del protocol ZigBee a l'edició PRO que es perfila com a definitiva o de llarga durada.

REFERÈNCIES

- [1] <http://www.zimo.at>, consultada el juny 2010.
- [2] Andreu Fiol Salom, "Programa d'aplicació i desenvolupament de les llibreries de control del sistema ZIMO". PFC defensat el Març 2009.
- [3] Andreu Fiol Salom, "Programa d'aplicació i desenvolupament de les llibreries de control del sistema ZIMO", enginy@eps, nº 1, 2009. <http://enginy.uib.es>.
- [4] Cristian Carmona Gómez. "Programa d'Aplicació i de control wireless d'un mòbil sobre rails usant ZIMO". PFC defensat el Setembre 2009.
- [5] Rafel Payeras Roig. "Desenvolupament Hardware de control wireless d'un mòbil sobre rails usant ZigBee". PFC defensat el Setembre 2009.
- [6] ZigBee Alliance website: <http://www.zigbee.org/>, consultada el juny 2010.
- [7] M.A. Ribot, B. Alorda. "Estudi de l'energia consumida en xarxes IEEE802.15.4/ZigBee", enginy@eps, nº1, 2009. <http://enginy.uib.es>
- [8] Jennic website: <http://www.jennic.com>, consultada el juny 2010.
- [9] Microchip website: <http://www.microchip.com>, consultada el juny 2010.



Javier Oliver Bennassar

Enginyer Tècnic Industrial, especialitat
Electrònica Industrial.
javier_oliver_@hotmail.com

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.