



BLUETOOTH: CIRCUITS, SISTEMES I APLICACIONS EN L'ENTORN DE LES TIC

Xavier Aragonès¹, José Luis González¹, Ana Isabel Pérez², Ferran Casadevall²,
Josep Paradells³

¹*Departament d'Enginyeria Electrònica*

²*Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions*

³*Departament d'Enginyeria Telemàtica*

jlgonzalez@eel.upc.edu

Tipus d'ajut rebut: DURSI_2002

Resum

En el projecte s'han implementat uns mòduls formatius, que inclouen tant una vessant teòrica com una part experimental, que permetin a un estudiant de segon cicle de la ETSETB conèixer i desenvolupar aplicacions sobre un sistema de comunicacions sense fils de baix cost i àmplia acceptació comercial com és l'estàndard Bluetooth. Aquest sistema té la particularitat d'integrar aspectes horitzontals del currículum d'un enginyer de telecomunicacions, ja que comprèn aspectes de protocols de comunicacions, processat i transmissió del senyal, i integració de circuiteria digital, analògica i de radiofreqüència en tecnologia CMOS de baix cost. D'aquesta manera, a través dels mòduls formatius l'estudiant aplica i integra coneixements adquirits en assignatures del seu pla d'estudis corresponents a diverses àrees. En el projecte s'ha elaborat un temari, suportat per un material accessible a través d'una *web*, alhora que unes pràctiques de laboratori amb material específic. Tots aquests continguts poden ser utilitzats per diverses assignatures troncal i optatives del pla d'estudis d'Enginyeria de Telecomunicació de l'ETSETB.

Paraules clau

Sistemes de comunicació per RF, Bluetooth, Protocols de comunicacions inalàmbriques.

EL PROJECTE

1. Introducció

El projecte té com a finalitat la preparació i implementació d'uns mòduls formatius i experimentals que permetin a l'estudiant de 2^{on} cicle d'Enginyeria de Telecomunicacions de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona (E.T.S.E.T.B.) de la UPC aplicar els

coneixements adquirits en assignatures d'electrònica, telemàtica i comunicacions en un sub-sistema de comunicacions sense fils de baix cost i baix consum, ideal per ser integrat en multitud d'equips electrònics i informàtics per afegir una funcionalitat de comunicacions als mateixos. Aquest sub-sistema està basat en l'estàndard Bluetooth que té com a característica particular la seva implementació en un sol xip (SOC) o en molts pocs components que integren tots els circuits digitals, analògics i de radio freqüència (RF). L'objectiu és que els estudiants treballin amb el sistema a tots els nivells, començant per analitzar els mòduls Bluetooth a nivell de circuit i de blocs, estudiant el protocol de comunicacions i finalment implementant aplicacions reals de xarxes de comunicacions amb mòduls Bluetooth (les aplicacions es programen en ordinadors personals que tenen els mòduls Bluetooth com a perifèrics).

Aquest sistema Bluetooth té la interessant característica d'integrar aspectes horitzontals del currículum d'un Enginyer de Telecomunicació. En el nivell més baix integra components digitals de processat de senyal, aspectes d'encryptació i ús de microprocessadors incrustats (*embedded processors*), juntament amb circuiteria analògica i emissors i receptors de radio freqüència. En un segon nivell l'estàndard permet la formació de xarxes de comunicacions sense fils i transmissió tant asíncrona (dades) com síncronament (veu), doncs està orientat a substituir tant un mòdem com un telèfon. Finalment els equips de desenvolupament Bluetooth existents al mercat permeten crear aplicacions a alt nivell que facin servir els mòduls Bluetooth sense haver d'implementar la seva programació interna, ja que el propi estàndard proporciona interfícies que emulen, per exemple, un port sèrie.

Les activitats experimentals estan preparades per a que es realitzin en un laboratori dotat de l'equipament informàtic necessari. Això permetria a tot un grup d'estudiants desenvolupar una aplicació complexa de forma conjunta, i fer servir la possibilitat de formar xarxes de l'estàndard Bluetooth per que cada lloc de treball sigui un node de la xarxa on corri l'aplicació desenvolupada. Les aplicacions que es poden desenvolupar van des de qualsevol aplicació existent en xarxes cablejades (*chat*, videoconferències, compartició de perifèrics, etc) fins a xarxes de sensors distribuïdes, xarxes de control industrial (simulant els processos de fabricació a cada node), computació distribuïda, sistemes d'identificació personal, etc.

Aquest mòduls estan relacionats amb continguts de varies assignatures de la titulació, principalment amb: Disseny de Circuits i Sistemes Electrònics, Comunicacions II, Emissors i Receptors, Comunicacions Mòbils Multimèdia, Transmissió de Dades i Comunicacions Mòbils de 3a Generació.

2. Descripció

La sol·licitud original del projecte contemplava una durada de dos anys i es demanaven 18.000 euros al DURSI, preveient un cofinançament amb l'ETSETB fins arribar als 23.127 euros. El DURSI va concedir un ajut de 9.500 euros i va escurçar el projecte de dos a un any. Això implicava una reformulació del mateix per adaptar-se a les condicions de la concessió i a la reducció del

pressupost. Malgrat això, es plantejà mantenir els objectius i reduir els costos de bibliografia i fungible. Les despeses s'agruparen bàsicament en dos conceptes. Per una banda dos becaris, finançats respectivament pel DURSI i per la ETSETB, per l'execució de les tasques. Per altra banda, hi ha el *hardware* i *software* que s'utilitza en els mòduls formatius i experimentals.

El projecte es va realitzar durant el quadrimestre de primavera i el de tardor del 2003 amb les tasques i suports dels becaris que es descriuen a continuació.

Tasca 1: (amb el suport del becari ETSETB)

Durada: 9 mesos

Tasca 1.1 Elaboració d'un temari interdisciplinari que reculli els aspectes de les diferents assignatures aplicades als sistema Bluetooth incloent aspectes de circuits electrònics, emissors i receptors de RF, xarxes de comunicacions i transmissió de veu i dades.

Aquesta va ser la tasca inicial del projecte. L'objectiu ha estat preparar un temari multidisciplinar que, fent servir el Bluetooth com a fil conductor, permeti integrar coneixements d'aplicacions de transmissió de dades i veu, xarxes *ad-hoc*, sistemes de comunicacions sense fils, processament en bada base (encriptació, codis correctors d'errors, etc.), arquitectures i realització d'emissors i receptors de RF sobre silici i integració de tot el sistema en un sol xip (SoC).

Els continguts bàsics del temari es van consensuar entre els professors sol·licitats i es va determinar un índex per el material que caldria elaborar. Aquest temari has estat revisat al llarg de la preparació del material. Cada professor ha facilitat els continguts o les referències bibliogràfiques per a la part del temari més relacionada amb la seva especialitat. El temari elaborat es resumeix a continuació

1 Què és Bluetooth ?

1.1 Historia

1.2 Estandardització

2 Protocol

2.1 Pila de protocols Bluetooth

2.2 Protocol RADIO (RF)

2.3 Protocol BANDA BASE

2.4 Protocol LINK MANAGER PROTOCOL (LMP)

2.5 Protocol Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)

2.6 Protocol de búsqueda de serveis (SDP)

3 Implementació electrònica

3.1 Introducció

3.2 Partició hardware-software

3.3 Implementació dels mòduls Bluetooth

3.4 Implementació de la ràdio

3.5 Implementació de la banda base

Tasca 1.2. Elaboració d'un material docent en format digital que doni suport a la formació en els continguts del temari esmentat en el punt anterior.

El temari detallat a l'apartat anterior ha estat elaborat en format *html* i implementat com un *web* on es troben els continguts formatius i enllaços a altres materials d'interès que poden complementar la formació sobre aquesta material. L'estructuració del *web* s'ha fet pensant en l'aproximació al sistema Bluetooth des de dues vessants. La primera es centra en la descripció del protocol i en l'ús del mateix. La segona, detalla la implementació del sistema com a exemple de Sistema integrat en un Xip (SoC). D'aquesta manera es posa de manifest el marcat caràcter multidisciplinari que s'ha volgut donat a aquest projecte.

El *web* ha estat elaborat per l'estudiant Ignacio Carra amb una beca finançada per l'E.T.S.E:T.B. dintre del programa de Projectes Específics de Docència amb una dedicació de 20 hores setmanals des del 15 de març del 2003 al 31 de juliol del 2003.

El disseny del *web* s'ha fet de manera que sigui fàcil de fer servir. Tot el material proporcionat per els professors i trobat a la literatura ha estat re-elaborat de forma gràfica per fer-ho més fàcil de visualitzar en una pantalla d'ordinador. La navegació es fa mitjançant botons i menús desplegable, podent anar en tot moment d'un lloc a l'altre i relacionant els aspectes funcionals del protocol amb la seva implementació.

Les figures de la plana següent mostren la pantalla principal i la que dona accés als diferents nivells del protocol de forma gràfica.



Figura 1: Plana principal del material docent en format digital sobre Bluetooth

El racó del bluetooth - Netscape

Archivo Editar Ver Ir Marcadores Herramientas Ventana Ayuda

http://weble.upc.es/bluetooth/protocol.html

El racó del bluetooth

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Portada Protocols Implementació Links

Protocols - general

ETSETB

El racó del Bluetooth

Protocols

El protocol es defineix segons 2 blocs:

- ♦ **Core** : Nucli principal que han d'acomplir tots els dispositius bluetooth.
- ♦ **Profiles** : Especificacions concretes per cada tipus de dispositiu.

La pila de protocols bé definida en una visió modular :

- Radio protocol (RF)
- BaseBand Protocol
- Link Manager Protocol
- Logical Link Control and Adaptation Protocol
- Service Discovery Protocol
- RFCOMM
- TPS

Torna a l'index

Documento: Terminado

Figura 2: Plana d'accés a la descripció del protocol Bluetooth

Tasca 2: (amb el suport del becari DURSI)
Durada: 9 mesos

Tasca 2.1. Incorporació a un laboratori docent existent dels recursos necessaris (mòduls Bluetooth i *software* de desenvolupament) per a que els estudiants puguin dissenyar aplicacions fent servir aquest sistema.

El projecte elaborat té un marcat contingut experimental. S'ha volgut vol que els estudiants puguin treballar al laboratori aplicant els coneixements que han obtingut en les assignatures de la seva titulació (Telecomunicacions) particularitzades a l'estàndard Bluetooth. Per tal d'assolir aquest objectiu en el marc d'aquest projecte s'han adquirit els elements necessaris per complementar un laboratori ja existent (equipat amb equips informàtics, oscil·loscopis i altra instrumentació) amb el *hardware* i el *software* que permetin l'estudi i l'elaboració d'aplicacions amb l'estàndard Bluetooth formant xarxes sense fils, i també que permeti als professors de les diferents assignatures sol·licitants (i d'altres que vulguin fer servir el laboratori en el futur) la realització de demostracions o sessions pràctiques tipus tutorial.

El gruix d'aquest equipament són una sèrie de mòduls Bluetooth que contenen els components físics (radio, banda base i control de l'enllaç) de l'estàndard. El laboratori s'ha dotat d'un total de 10 d'aquests mòduls adquirits a l'empresa Teleca que distribueix aquests anomenats *kits* de desenvolupament d'aplicacions Bluetooth fabricats per Ericsson. Els mòduls venen acompanyats d'una sèrie de llibreries on estan tots els nivells superiors de la pila de protocols Bluetooth i que ens prement desenvolupar aplicacions mitjançant els mòduls hardware. El *software* corre als PCs del laboratori i els mòduls es connecten a aquest fent servir un port RS232 o un port USB. La figura 3 mostra un d'aquest mòduls Bluetooth.



Figura 3 Mòdul Bluetooth d'Ericsson

Els mòduls anteriors permeten el desenvolupament d'aplicacions però no ens donen accés al *hardware*. Per tal de complementar el laboratori en aquest sentit, també s'ha adquirit un *kit* de desenvolupament de *hardware*. Aquest *kit*, mostrat a la figura 4, està compost per una sèrie de plaques i accessoris. A les plaques tenim una ràdio Bluetooth i els components (FPGA, microcontrolador, ASIC banda base) que ens permeten personalitzar la part més física del sistema.



Figura 4 Kit de desenvolupament hardware Bluetooth

Un altre complement al laboratori molt útil és una eina que ens permeti detectar els tràfic de la xarxa i descodificar els paquets, tot indicant a quin nivell del protocol pertanyen i quines dades o control s'està enviant en cada moment entre els nodes de la xarxa. Aquesta utilitat, anomenada *sniffer* (que podríem traduir per 'rastrejador') pot captar el tràfic a diferents llocs de la xarxa: pot capturar tràfic a l'aire (amb un receptor Bluetooth dedicat); també ho pot fer al cable que va del PC al mòdul Bluetooth, interceptant instruccions que les aplicacions del PC envien al mòduls però que no es tradueixen en cap transmissió a l'aire; i fins i tot pot capturar els missatges que, a dins del PC, els diferents mòduls de l'aplicació es passen entre si, és a dir, el tràfic intern de l'aplicació que passa d'un nivell del protocol a l'altre (veure Figura 5). Tota aquesta informació és presentada de forma gràfica per aquesta eina i és molt útil per a que els professors puguin il·lustrar amb exemples els processos més bàsics de les comunicacions, la formació de la xarxa, la configuració dels nodes i situacions específiques a les quals es pot trobar una xarxa Bluetooth (veure Figura 6). Aquesta eina ha estat adquirida a la companyia Frontline i s'anomena FTS-Bluetooth.

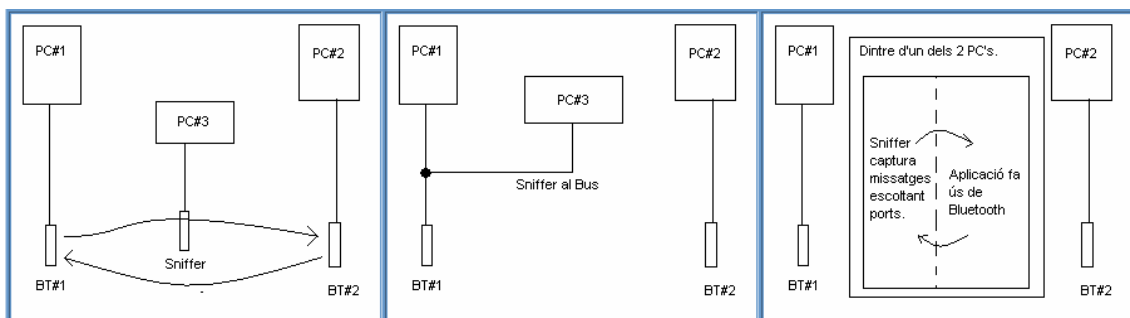


Figura 5 Diferents possibilitats de capturar tràfic Bluetooth de l'sniffer FTS-Bluetooth

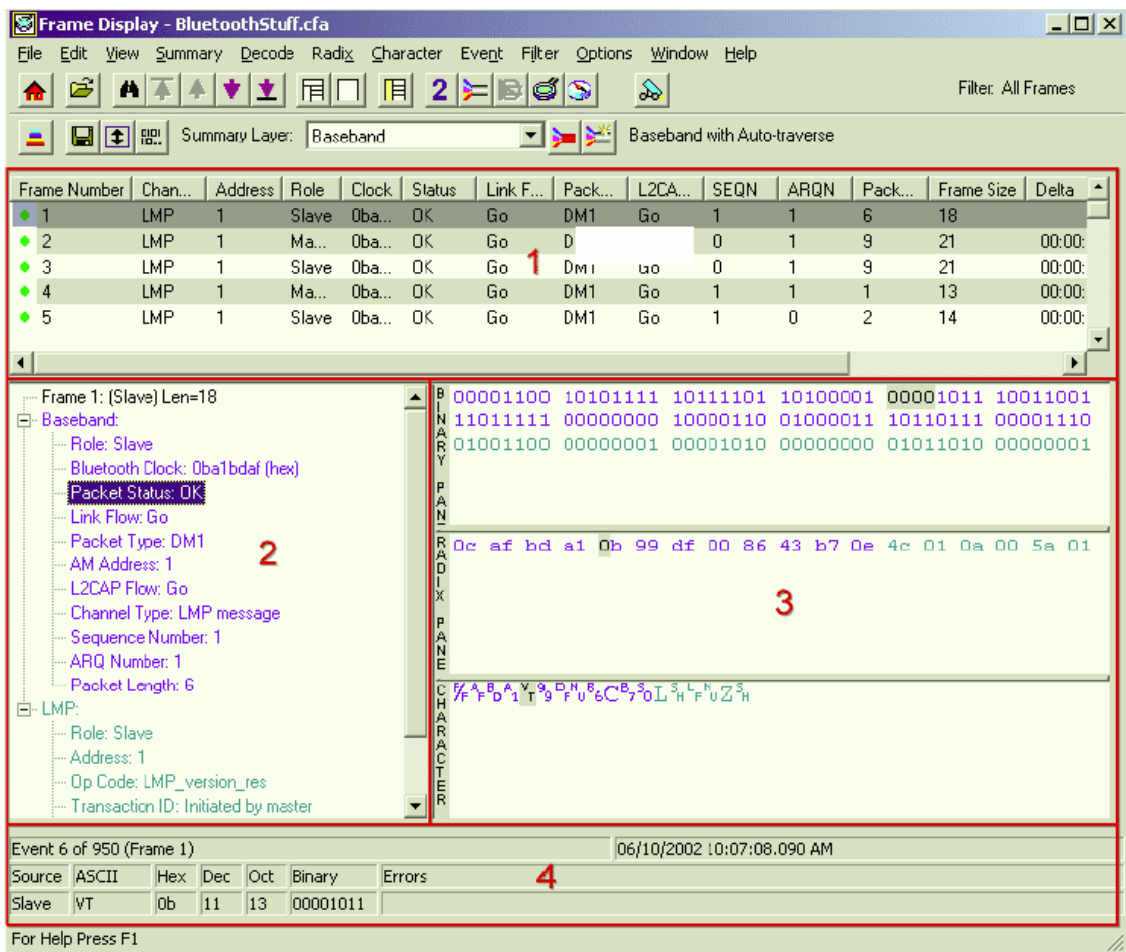


Figura 6 Una de les pantalles de visualització de l'sniffer FTS-Bluetooth

El material del laboratori s'ha completat amb una sèrie de perifèrics (càmeres, micròfons i altaveus, *codecs* de veu) que permetin desenvolupar aplicacions sobre Bluetooth amb transmissió de veu i imatges.

La posada a punt, instal·lació i verificació de tots els elements del laboratori han estat dutes a terme per l'estudiant Iker Bilbao, amb una beca de nou mesos (de març del 2003 a desembre del 2003) amb una dedicació de 20 hores a la setmana finançada amb l'ajut concedit pel DURSI. Aquest becari ha estat també el responsable de l'elaboració del material de suport i els tutorials que es presenten a l'apartat següent.

El material *hardware* i *software* s'ha adquirit amb la subvenció concedida pel DURSI i amb un ajut per a Projectes Específics de Docència de l'E.T.S.E.T.B. En tots els casos s'ha negociat amb els proveïdors i s'han aconseguit descomptes educatius, ja que en molts casos els preus d'aquestes eines quedaven fora de l'abast del finançament disponible en el projecte.

Tasca 2.2. Preparació de tutorials i aplicacions senzilles d'exemple sobre els mòduls Bluetooth per que els estudiants puguin aprendre a fer-los servir de forma autònoma.

La recerca, compra i instal·lació del diferent material esmentat a l'apartat anterior es va dur a terme durant el quadrimestre de primavera del 2003. Aquest segon quadrimestre s'ha dedicat a la preparació de tutorials i proves pilot amb un grup d'estudiants reduït, per tal d'avaluar el temps d'aprenentatge i les possibles mancances de la documentació. Aquest grup d'estudiants (un total de quatre) en una primera fase s'han dedicat a provar els tutorials i les aplicacions d'exemple que venen amb els *kits* de desenvolupament d'aplicacions. En una segona fase se'ls ha encomanat la realització d'un projecte senzill. La dedicació d'aquests estudiants és de 90 hores en total, és a dir, unes sis hores a la setmana. El seu treball és reconegut per l'E.T.S.E.T.B. com a crèdits de lliure elecció (ALE) per treballs dirigits.

El treballs de aquests estudiants estan a la fase final. Alguns ja l'han completat i altres estan a punt de fer-ho. Els treballs han estat:

- Implementació d'una aplicació que mesuri el nivell de potència rebuda per una unitat Bluetooth (fent servir el RSSI o indicador de nivell de senyal del *hardware* del mòdul).
- Programació d'una aplicació que permeti controlar els modes de baix consum dels sistema Bluetooth.
- Implementació dels procediments d'autenticació que permet el Bluetooth.
- Programació d'una aplicació que faci servir les possibilitats d'encriptació de dades de l'estàndard Bluetooth

Tots aquests petits projectes estan servant per dimensionar el temps d'aprenentatge de les eines de disseny i programació d'aplicacions, així com les possibilitats del laboratori. A més a més, es demana als estudiants que documentin els seus treballs en forma de tutorials, de manera que es puguin fer servir com a exemples per altres estudiants a l'hora de desenvolupar aplicacions més complexes.

En paral·lel s'ha elaborat un *web*, complementari al de formació teòrica amb tot el material necessari per poder fer pràctiques al laboratori i amb aplicacions d'exemple que resolguin tasques bàsiques (connexió a la xarxa, configuració d'un enllaç de dades, configuració d'un enllaç de veu, etc). Aquest *web* ha estat estructurat amb les següents seccions:

- *Software*: conté tota la documentació sobre les eines de desenvolupament d'aplicacions, inclosa la llibreria de la pila de protocols de l'estàndard.
- *Hardware*: conté una descripció del mòduls Bluetooth, del *kit* de desenvolupament de *hardware* (incloent tota la documentació).

- Aplicacions: aquí s'han inclòs les aplicacions d'exemple desenvolupades per el becari a càrrec del projecte i s'aniran afegint les aplicacions desenvolupades per els estudiants a mida que les vagin completant i documentat. Cada aplicació va acompanyada d'una breu descripció, el manual d'ús, el codi font i un tutorial sobre com s'ha fet a partir dels recursos de programació que proporciona el fabricant dels mòduls i les eines de desenvolupament Bluetooth.
- Utilitats: informació i documentació sobre utilitats de programació i sobre tot, sobre utilitats d'anàlisis senzilla de la xarxa i el mòduls Bluetooth (incloses als kits de desenvolupament) i sobre l'eina 'sniffer' FTS-Bluetooth de Frontline.

La figura 7 mostra la plana principal d'aquest web de laboratori.

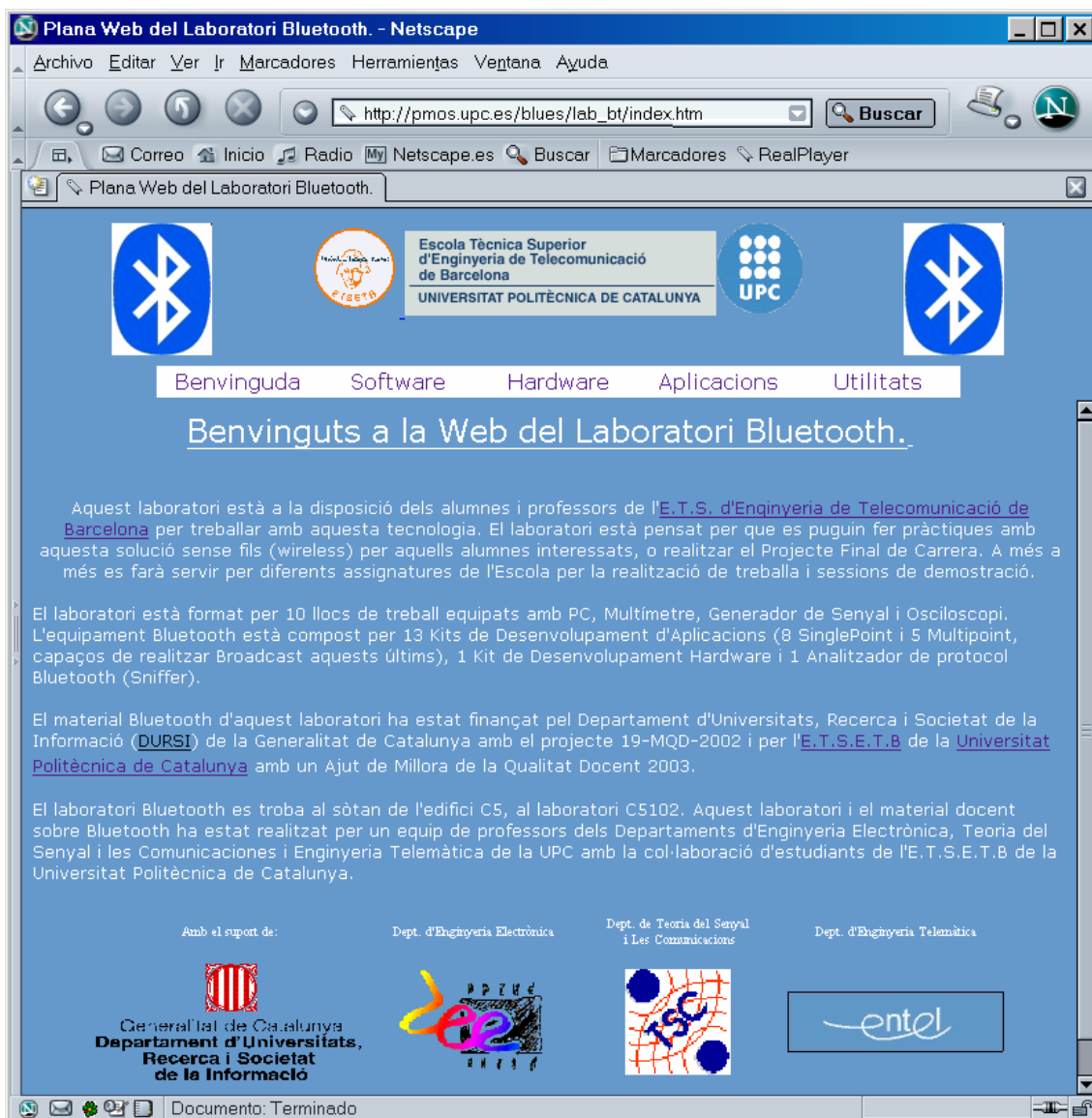


Figura 7. Plana principal del web del laboratori Bluetooth

Els dos *webs* es mantenen per separat, de moment, donat que el *web* del laboratori conté material protegit per propietat intel·lectual i per llicències i encara està per resoldre com s'instal·larà amb condicions de seguretat adequades a les intranets de la Universitat.

3. Resultats

L'experiència de elaboració del material docent sobre Bluetooth ha estat una bona ocasió per comprovar la possibilitat de treball entre professors de diferents Departaments i àrees de coneixement. A la pràctica, ha estat molt complicat realitzar aquesta tasca de forma conjunta, donat que l'activitat no formava part de cap assignatura. Més aviat, cada professor va proporcionar el material de la seva àrea d'expertesa a l'estudiant encarregat d'elaborar el *web*, sense comunicació entre els diferents professors.

En quant al laboratori Bluetooth, l'experiència ha estat molt més positiva. Un cop posat en marxa pel becari responsable, es van oferir a diferents estudiants la possibilitat de realitzar treballs dirigits fent servir el laboratori. Aquests treballs, amb una càrrega mínima d'unes 90 hores, els hi han estat reconeguts com a crèdits ALE. Un total de quatre estudiants van estar treballant en diferents aplicacions d'exemple durant el quadrimestre de tardor del 2003 coordinats pel mateix estudiant que va posar en marxa el laboratori. Els resultats d'aquests treballs i la documentació elaborada per els estudiants s'ha incorporat al *web* de laboratori com a exemples d'aplicacions fent servir els recursos i el *software* Bluetooth.

El quadrimestre de tardor del 2003, doncs, ha servit com a experiència pilot per l'ús del laboratori i el material docent *on-line*. A partir del quadrimestre de primavera del 2004 estava previst que l'esmentat laboratori i el material elaborat passés a formar part de les activitats docents convencionals de l'E.T.S.E.T.B. Malgrat això, no tenim constància que aquest material s'hagi fet servir tret de l'assignatura DCiSE del 2on cicle d'Enginyeria de Telecomunicació, on s'ha publicat com a material de suport del temari. Aquesta assignatura fa servir l'estàndard i els mòduls Bluetooth com a exemple de SoC (sistema en un chip) per a comunicacions i s'explica el seu funcionament i implementació a les primeres sessions de teoria.

4. Conclusions

Podem concloure que l'experiència no ha tingut tots els resultats esperats. Si bé l'elaboració del material docent Bluetooth i del material de suport al Laboratori es poden considerar que s'han assolit amb èxit, l'ús d'aquest material no ha estat tant profitós com s'havia previst.

La idea inicial era realitzar un material que permetés la relació entre diferents àrees de coneixement i Departaments que imparteixen docència en

l'E.T.S.E.T.B. fent servir un sistema de comunicacions que incorpora aspectes de xarxes de comunicació, processament del senyal, sistemes de RF i circuits integrats com a element integrador de les diferents disciplines. Aquest aspectes es donen com a part del temari de diferents assignatures, els professors responsables de les quals van participar en la proposta i elaboració del material docent. No es va plantejar mai realitzar una assignatura nova de tipus optatiu o de lliure elecció i pot ser aquesta ha estat la raó del baix ús que s'està fent del material docent.

En quant a l'ús del laboratori, hem de constatar que malgrat haver informat a l'Escola que el laboratori i el material estaven disponibles per a tots els estudiants o professors que el volguessin fer servir, no hem rebut cap resposta i no som conscients que s'hagi fet cap publicitat del mateix.

5. Referències/Més informació

Informació sobre l'estàndard Bluetooth (web del Bluetooth Special Interest Group, seu oficial de l'estàndard):

<http://www.bluetooth.com>

Planes *web* de les assignatures participants al projecte i que inclouen en els seus temaris aspectes relacionats amb Bluetooth:

- Disseny de Circuits i Sistemes Electrònics (DEE):
<http://gummel.upc.es/dcise/findex.html>
- Comunicacions Mòbils de 3a Generació (ENTEL):
<http://www.etsetb.upc.es/estudis/assignatures/HTML/catala/11529.html>
- Sincronització i Mòdems d'Alta Velocitat (TSC):
<http://www.etsetb.upc.es/estudis/assignatures/HTML/catala/11640.html>
- Comunicacions Mòbils Multimèdia (TSC):
<http://www.etsetb.upc.es/estudis/assignatures/HTML/catala/11554.html>

Plana *web* del material docent elaborat al projecte:

<http://weble.upc.es/asig/bluetooth/index.html>

Plana *web* del laboratori Bluetooth elaborat al projecte:

http://pmos.upc.es/blues/old_web/lab_bt/index.htm

