



TFM: Study of cognitive radio networks capacity

Simó López i Xirau

UOC-URL Màster d'Enginyeria de Telecomunicació

N. Javier Villares Piera

4-1-2015



Aquesta obra està subjecta a una llicència de
[Reconeixement-NoComercial-
SenseObraDerivada 3.0 Espanya de Creative
Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FITXA DEL TREBALL FINAL

Títol del treball:	<i>Study of cognitive radio networks capacity</i>
Nom de l'autor:	<i>Simó López i Xirau</i>
Nom del consultor:	<i>N. Javier Villares Piera</i>
Data de lliurament (mm/aaaa):	<i>01/2015</i>
Àrea del Treball Final:	<i>Sistemes de comunicació</i>
Titulació:	<i>UOC-URL Màster de telecomunicació</i>
Resum del Treball:	
<p>En aquest TFM (Treball de fi de màster) s'estudia la possibilitat d'emetre simultàniament dues comunicacions sense fils independents en la mateixa banda de freqüència, generant una interferència mínima per tal que es garanteixi la comunicació. Aquesta opció és una de les vessants que tracta la Ràdio Cognitiva (<i>Cognitive Radio</i>).</p> <p>Per aconseguir-ho, primerament es fa un incís de l'estat de l'art de la ràdio cognitiva, incidint en varis punts com la seguretat, l'aprenentatge, l'arquitectura de les xarxes i més concretament en la detecció de l'espectre en l'espai on es vol conèixer la disposició geogràfica dels altres usuaris i la distància entre ells, que és on se centra el TFM.</p> <p>Seguidament, es simula l'escenari de treball, a través de la simulació amb Matlab, primerament a partir de les densitats d'usuari es genera una xarxa primària aleatòria i, de la mateixa manera, una de secundària. També se situen els transmissors d'ambdues xarxes. Encara que hi ha varis usuaris, es suposa que hi ha un usuari de cada xarxa en connexió simultàniament.</p> <p>A partir de l'anàlisi estadístic, el transmissor secundari ha d'emetre sense superar el llindar de restricció que ha pactat amb la xarxa primària.</p> <p>Dins d'aquest escenari, s'han especificat tres supòsits diferents i se n'han obtingut uns resultats concloents mitjançant la simulació.</p> <p>Finalment es presenten els resultats obtinguts, s'analitza com influencia el coneixement de la distribució dels usuaris a la velocitat de transmissió i les possibles línies d'actuació en un futur.</p>	

Abstract:

This Master Thesis studies the possibility of a simultaneous emission of two independent, wireless communications in the same frequency band, with minimal interference so as to guarantee communication. This is one of the areas of interest of Cognitive Radio.

In order to achieve this goal, firstly a state-of-the-art of Cognitive Radio is presented, going over issues such as security, learning, network architecture and, more specifically, on the detection of the spectrum in the space where one wants to establish the geographical location and distances between users, this being the focus of the Thesis.

Then, the working scenario is simulated using Matlab: first of all, a random primary network is generated from the density of users, and in the same way a secondary one is generated as well. The transmitting stations of both networks are also situated. Although there are several users, it is assumed that there is one user of every network in simultaneous connection.

Using statistical analysis data, the secondary transmitter has to transmit without exceeding the restriction boundary agreed with the primary network.

Within this framework, three different cases have been studied and numerically validated.

Finally, the obtained results are presented, the effect of the knowledge of the distribution of the users on the transmitting velocity is investigated, and possible further research lines are discussed.

Paraules clau (entre 4 i 8):

Cognitive radio, Quality of Service, spectral efficiency, secondary network, scenario performance, simultaneously transmission

Índex

1. Introducció.....	1
1.1 Motivació	1
1.2 Objectius.....	2
1.3 Enfocament i mètode seguit	2
1.4 Planificació del Treball	3
Diagrama de Gantt, planificació del TFM	4
1.5 Breu sumari de resultats obtinguts	5
1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria	5
2. Estat de l'art.....	6
3. Descripció del problema.....	15
3.a Descripció de la solució proposada.	15
3.1 Escenari 1 (D12 conegut, sense sensat)	19
3.2 Escenari 2 (pt1 conegut, amb sensat i sense error)	20
3.3 Escenari 3 (D12 desconegut, pt1 desconegut, amb sensat i sense error)	20
3.4 Tractament de l'error de sensat.	21
4. Presentació de resultats.....	22
4.1 Escenari 1: D12 conegut, sense sensat	23
4.2.a Escenari 2: pt1 conegut, amb sensat i sense error	25
4.2.b Tractament de l'error de sensat escenari 2b.	27
4.3 Escenari 3: D21 i pt1 desconegut, amb sensat i sense error.....	28
4.3.b Escenari 3b: el 3 però amb error de sensat.....	30
4.4. Comparació dels escenaris descrits	31
5. Conclusions	32
6. Glossari.....	35
7. Bibliografia.....	36
6. Annexos.....	38

Llista de figures

Figura 1 Diagrama de Gantt, planificació de la feina realitzada	4
Figura 2: Emissió de tres comunicacions simultànies	7
Figura 3: representació de les bandes de freqüència respecte el temps.	7
Figura 4: L'usuari secundari A transmet a l'usuari secundari B [3]	8
Figura 5: Representació del detector d'energia sobre una subbanda de l'espectre. [4]....	9
Figura 6 : Nombre de mostres en condicions d'incertesa de soroll. [5]	9
Figura 7: Arquitectura amb infraestructura [2]	10
Figura 8: Arquitectura ad hoc[2]	10
Figura 9: Arquitectura de malla [3]	10
Figura 10: arquitectura a)no cooperativa b)cooperativa [2]	11
Figura 11: Arquitectura bàsica d'un controlador de lògica difusa [5].....	12
Figura 12: arquitectura cross-layer cognitiva difusa [6].....	13
Figura 13: estructura típica d'una xarxa neuronal	13
Figura 14: resultats escenari 1 modificant rho2.....	23
Figura 15: resultats escenari 1 modificant prob.....	24
Figura 16: resultats escenari 2 modificant rho2.....	25
Figura 17: resultats escenari 2 modificant prob.....	26
Figura 18: resultats escenari 2 modificant Tobs	27
Figura 19: resultats escenari 3 amb varis rho2	28
Figura 20: resultats escenari 3 variant la limitació de restricció	29
Figura 21: resultats escenari 3 modificant Tobs.....	30
Figura 22: comparació dels diferents escenaris	31

1. Introducció

1.1 Motivació

Arribats al s.XXI, les comunicacions sense fils han evolucionat ocupant cada vegada més ample de banda (BW) i amb unes necessitats de velocitat més elevades. Per fer possibles les comunicacions i l'accés a continguts multimèdia en temps real, és necessari establir noves tecnologies que donin velocitats adequades i un accés dinàmic a les noves necessitats.

En aquest treball, s'estudien les diferents capacitats que pot tenir la ràdio cognitiva (CR) en diferents supòsits.

Tenint en compte que es necessita més ample de banda (BW) per facilitar l'accés a Internet, que el BW és escàs i car i que els sistemes actuals no fan un ús eficient del BW, com es demostra per exemple a partir de la redistribució de l'espectre dels canals de televisió, s'han d'aportar solucions i iniciatives que regulin i satisfacin aquestes connexions millorant l'eficiència de l'espectre.

Malgrat que la Ràdio Cognitiva és una tecnologia que permet millorar l'eficiència espectral no existeixen estudis concloents que demostrin quina és l'eficiència espectral que es pot aconseguir amb la Ràdio Cognitiva.

Els resultats obtinguts són útils als operadors de les diferents xarxes, tant primària com secundària, per les següents raons:

- Podran fer una estimació de la capacitat esperada en reproduir un dels escenaris del treball..
- Proporcionen un patró de comportament que permet als administradors de xarxa intuir els resultats que poden obtenir en modificar les condicions, com per exemple en la variació de la densitat dels usuaris de les xarxes o la limitació de la restricció d'interferència.
- Sabran quines són les velocitats de transmissió esperades si la xarxa secundària desconeix informació de la xarxa primària, com la posició del transmissor i receptor primari, i com es veu influïda la velocitat de transmissió de la xarxa secundària (R2).
- Indicar el camí a seguir a les operadores per tal que dirigeixin els seus esforços cap on s'obtinguin millors resultats.

- Finalment els resultats obtinguts poden ser útils en la definició dels futurs estàndards de telecomunicació.

1.2 Objectius

- a) Fer un retrat fidedigne sobre l'evolució de la Ràdio Cognitiva i quines són les principals línies de treball (estat de l'art).
- b) Presentar uns resultats clars sobre les velocitats de transmissió que es poden arribar a obtenir en la xarxa secundària.
- c) A partir d'un escenari principal, realitzar modificacions per presentar patrons de comportament, indicant els pros i contres de cadascun.
- d) A partir dels resultats, indicar les futures línies d'actuació per obtenir-ne de millors.

1.3 Enfocament i mètode seguit

Aquest treball de fi de màster TFM, contribueix a l'estudi i aplicació de la Ràdio Cognitiva. Per fer-ho es procedeix de la següent manera:

- Se situa en l'escenari actual de la tecnologia a través de l'estudi de diferents publicacions (articles) i es defineix l'estat de l'art.
- Es defineix un escenari de comunicació realista que serveix per avaluar la capacitat que es pot aconseguir amb una xarxa cognitiva.
- Segons la informació que rep la xarxa secundària, s'han presentat petites variacions dins de l'escenari principal.
- Els resultats s'han calculat i s'han processat per representar-los gràficament (Matlab).
- Finalment és a partir d'aquestes representacions que s'han extret unes conclusions concretes.

Així doncs, per realitzar aquest projecte, caldrà tenir accés a les principals biblioteques de continguts i articles tècnics (IEEE, per exemple) a través de la biblioteca de la UOC. També s'haurà de treballar amb un programa que permeti simulació, càlcul i representació, en aquest projecte s'ha emprat MATLAB 7.10.0 (R2010a).

1.4 Planificació del Treball

Definició del tema → primerament s'ha portat a terme un debat inicial per escollir un tema adequat que il·lusionés a l'estudiant i definir l'abast del projecte.

PAC1: pla de treball → El pla de treball és allò que hem de fer abans de començar per conèixer que hem de fer i en quin ordre, així com la necessitat que volem cobrir i els objectius que volem aconseguir.

P1.1: Objectius → definim els objectius realistes

P1.2: Planificació → Important per saber en quin ordre ho farem.

PAC2: State of the Art → S'haurà de conèixer clarament en quin punt es troba la tecnologia i quines són les possibles línies d'investigació.

P2.1: State of the Art, aplicacions → quines fites són les que actualment ja s'han aconseguit.

P2.2: perspectives de futur → quines són les investigacions futures, o cap a on ens porta aquesta tecnologia.

PAC3: resultat del projecte → s'obtenen els diferents resultats.

P3.1: programari desenvolupat → el programari emprat s'ha de detallar i explicar (també les diferents simulacions i els paràmetres variats).

P3.2: resultats obtinguts → saber exposar i justificar els resultats.

PAC4: Memòria tècnica → donar sentit a la feina feta de manera que sigui entenedora.

P4.1: Extracció de conclusions → a partir dels resultats obtinguts, s'ha de ser capaç d'obtenir conclusions clares i concises.

P4.2: Redactar memòria tècnica → El producte final del treball és una memòria tècnica, que serà el document que inclourà tota la feina feta.

PAC5: Presentació i defensa → Explicació per part de l'estudiant

P5.1: Presentar memòria en format final → Saber explicar el perquè de tot contingut que hi hagi a la memòria.

P5.2: Presentació final multimèdia → Poder exposar els resultats de forma visual i entenedora.

Diagrama de Gantt, planificació del TFM

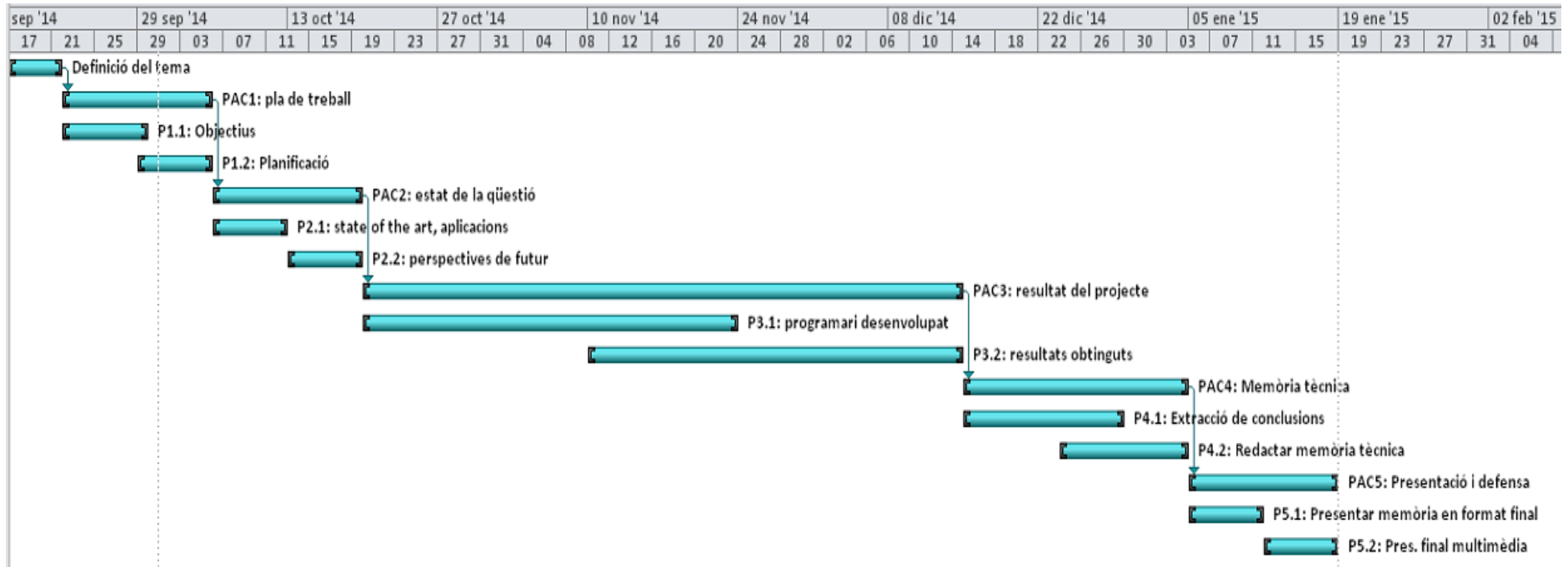


Figura 1 Diagrama de Gantt, planificació de la feina realitzada

1.5 Breu sumari de resultats obtinguts

Per cadascun dels diferents escenaris s'ha representat la capacitat màxima en bps (R2) de la xarxa secundària, la seva relació respecte la velocitat de transmissió de la xarxa primària (R1), la potència a la qual el transmissor secundari (TX2) ha d'emetre per complir la restricció d'interferència i finalment la capacitat de transport (*transport capacity*) que consisteix en la velocitat que s'assoleix respecte a la distància que s'emet $R2 \cdot \text{distància}$ (d2) al receptor secundari (RX2) s'expressa en bps*m. Aquests resultats són positius i concloents, varien segons quin escenari es suposi, milloren com més coneixement té el TX2 es té de la xarxa primària, tant coneixent la distància de l'emissor primari, com la potència transmesa per aquest, com únicament la potència que rep (pr12) el transmissor secundari(TX2) del transmissor primari (TX1).

1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria

Al capítol dos es fa una descripció de l'estat de l'art de la Ràdio Cognitiva i de les seves línies de desenvolupament i s'incideix en la detecció de l'espectre en l'espai, que és l'objecte del TFM.

Al tercer capítol s'explica com s'ha procedit per solucionar el problema i quines són les diferents consideracions i variacions que s'han portat a terme.

Al quart capítol es representen en gràfiques i es comenten els resultats obtinguts mitjançant la simulació en Matlab.

Seguidament en l'apartat 5 a partir dels resultats s'extreuen conclusions.

Finalment també es fa una valoració de l'organització, distribució i metodologia seguida per part del projectista per realitzar el TFM.

2. Estat de l'art

Com ja s'ha exposat en l'apartat anterior, la Ràdio Cognitiva (CR) és una tecnologia sorgida i investigada, els darrers 15 anys. Per les seves característiques i possibles aplicacions en el futur de les comunicacions, centra bona part dels esforços de la comunitat científica per tal d'aconseguir un salt disruptiu en les telecomunicacions.

El fet d'anomenar Ràdio Cognitiva a aquesta tecnologia, implica que la CR ha de ser capaç d'observar el medi, prendre les decisions adequades a partir del coneixement del medi i adaptar-se a l'entorn. En conseqüència per definir l'estat de l'art sobre la CR, és imprescindible tractar els següents punts on, els dos primers seran d'aplicació en el nostre TFM i els dos següents pretenen ajudar a comprendre el funcionament de la tecnologia.

- Detecció de l'espectre
- Arquitectures de la Ràdio Cognitiva
- Presa de decisions i aprenentatge
- Seguretat

2.1 Detecció de l'espectre

La detecció de l'espectre consisteix en conèixer en cada moment, quins usuaris tenim dins de la cel·la definida i així conèixer l'espectre disponible. Un usuari de Ràdio Cognitiva, pot transmetre únicament per les freqüències no emprades pels altres usuaris. Això comporta que si coneix els usuaris i pot observar les bandes disponibles, podrà saber quines freqüències estan infrautilitzades i les podrà emprar. Dins de la detecció, també s'ha de detectar la disponibilitat de recursos en el temps, la freqüència, l'espai i el codi. Com més variables a monitorar, més cost computacional.

De la detecció en el temps, si s'analitza la figura 1, s'observa les oportunitats de transmissió dels diferents espais blancs en les diferents bandes de freqüència. Un bon sistema de CR, ha de poder omplir-los i així augmentar la velocitat de comunicació.

De la detecció en l'espai, s'obtenen els avantatges de conèixer la disposició geogràfica i la distància respecte els altres usuaris. Si es coneix la posició dels usuaris, poden

transmetre per la mateixa freqüència garantint la QoS sempre que la potència de la transmissió sigui petita respecte la distància que els separa.

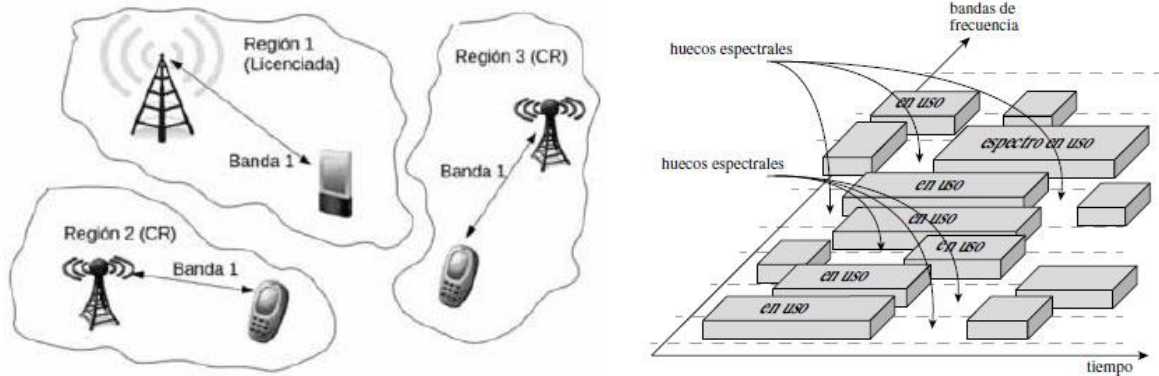


Figura 2: Emissió de tres comunicacions simultànies en la mateixa freqüència separades en l'espai.[1] Figura 3a: representació de les bandes de freqüència respecte el temps.[1]

La detecció en el codi, fa referència a les possibilitats de trobar en el codi forats per poder-hi afegir el senyal que ens interressi, aquest fet es pot donar quan la banda de freqüència sigui emprada per un codi d'espectre eixamplat o per senyals que emprin salts en freqüència, ha de ser possible transmetre simultàniament sense interferir amb els altres usuaris.

Més específicament en l'àmbit del TFM l'article [2], exposa la necessitat de trobar l'equilibri entre l'eficiència energètica (EE) i l'eficiència espectral (SE) en la CR. El que té de rellevant l'article, és que es demostra com aquest equilibri (*trade-off*) es pot sistematitzar segons les diferents arquitectures, nivells d'anàlisi i capacitats. Finalment es presenten tres casos, que poden influir en el resultat del nostre TFM.

S'entén que l'eficiència energètica es refereix a l'eficiència amb què es consumeix l'energia i que l'eficiència espectral es refereix a l'aprofitament de l'ample de banda del sistema.

Referent a les despeses, s'indica en [2] que les despeses operatives (OPEX) de les xarxes cognitives, consistiran en el lloguer d'espectre per obtenir ample de banda i el consum d'electricitat per optimitzar l'eficiència energètica.

Sobre el model d'accés jeràrquic [3] que es planteja en el TFM, trobem que és aquest model el que adopta la classificació d'usuari primari i secundari. La idea és que l'espectre amb llicència dels usuaris primaris, pugui ser utilitzat pels usuaris secundaris, limitant la interferència generada per la comunicació secundària.

En el cas d'accés jeràrquic, es consideren varis enfocaments: *underlay* (espectre eixamplat), *interweave* (la nostra) i *overlay* (dirty-paper coding).

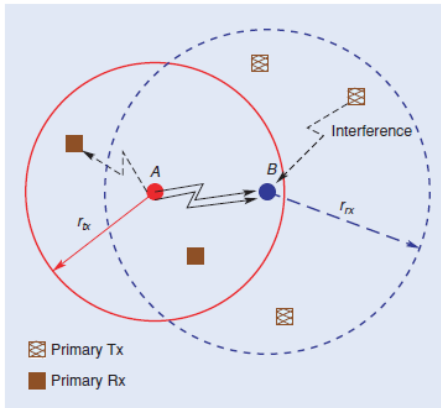


Figura 4: L'usuari secundari A transmet a l'usuari secundari B, tant A com B han d'observar l'espectre per no produir interferències en els transmissors i receptors primaris. [3]

En l'enfocament de *underlay*, s'imposen limitacions en la potència de transmissió dels usuaris secundaris per tal que operin per sota el llindar de soroll de la xarxa primària. Això implica que els usuaris secundaris, tinguin un abast curt o mitjà amb una potència de transmissió baixa i una alta velocitat de transmissió de dades. Encara que l'usuari primari transmeti constantment (pitjor cas), la connexió secundària no l'afecta suficientment per produir-li suficients interferències.

En l'enfocament de *interweave* [3], es centra en detectar els espais blancs espacials i temporals (explicats anteriorment) permetent als usuaris secundaris transmetre en aquests forats sense interferir sobre es comunicacions dels usuaris primaris. Aquest TFM es centra en aquesta opció, concretament s'aprofiten els forats espacials que deixa la xarxa primària per poder transmetre-hi la xarxa secundària de forma òptima.

Val a dir que aquesta política de gestió de l'espectre jeràrquica, és probablement la més compatible amb les polítiques de gestió d'espectre i l'adaptació a les tecnologies sense fils ja existents.

Primerament en *interweave* cal detectar la presència dels usuaris primaris i estimar la seva posició, per fer-ho hi ha diferents formes d'aconseguir-ho. El TFM es centra en la detecció d'energia [4], en aquesta tècnica, un detector d'energia, tracta el senyal primari com a soroll i conclou si hi ha senyal primari a partir de la potència o energia de senyal observada. El detector té una complexitat baixa i no requereix càlculs complicats per processar el senyal. A l'article [4] es conclou que l'ús del detector d'energia, és especialment indicat per a la detecció de l'espectre de banda ampla. La detecció simultània de diverses subbandes es pot realitzar escanejant la densitat espectral de potència dins del senyal de banda ampla rebut. És aconsellable en la detecció de la banda ampla establir dos passos, el primer per detectar l'energia i buscar les possibles

subbandes *figura 4* i en la segona aplicar-hi tècniques més sofisticades com detecció cicloestacionària.

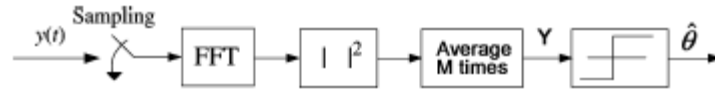
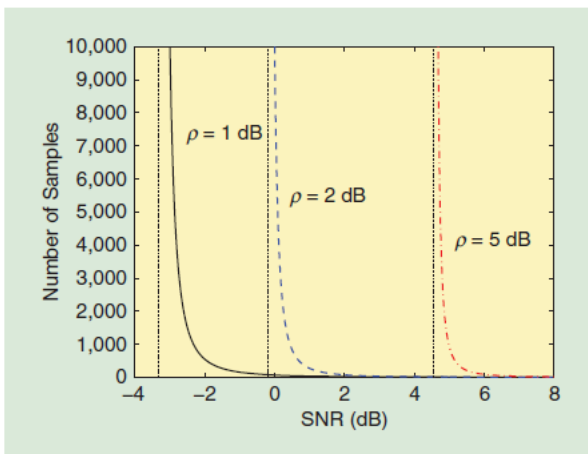


Figura 5: Representació del detector d'energia sobre una subbanda de l'espectre. [4]

En [5] es presenten els límits fonamentals per a la detecció i el concepte d'SNR wall. Com s'ha vist anteriorment, la CR ha de ser capaç de detectar als usuaris principals en tots els escenaris possibles, això implica un repte ja que existeixen limitacions a baixa relació senyal soroll SNR. En conseqüència ja que es troben incerteses en els models, la



detecció exacta és impossible sota un cert nivell de SNR, això és el que es coneix com SNR wall.

Per tal de garantir que la probabilitat de falsa alarma PFA està per sota del nivell necessari, lògicament el llindar s'ha d'ajustar per complir el requisit en el pitjor dels casos, tal com es pot veure a la figura 5 [5].

Figura 6 : Nombre de mostres requerides per satisfer un PFA de 0,05 i una PD de 0,9 emprant el detector d'energia en condicions d'incertesa de soroll. [5]

2.2 Arquitectures de Xarxa de Ràdio Cognitiva

Com s'ha vist a partir de la detecció dels paràmetres de l'espectre, és possible transmetre sense interferir en la xarxa primària. En quant al disseny de l'arquitectura de la xarxa de Ràdio Cognitiva, a continuació es proposen diverses opcions per la millor utilització de la xarxa enlloc de vincular-ho únicament a l'eficiència espectral, vista en el punt anterior.

Per atendre les diferents demandes, les xarxes de ràdio cognitives, es poden implementar en una xarxa centralitzada, distribuïda, ad hoc i amb diferents arquitectures de malla. A nivell general de xarxes cognitives, els components comuns són l'estació mòbil, l'estació base o punt d'accés i les xarxes troncales o nucli. Amb aquests

components s'obtenen tres tipus d'arquitectures de xarxa. També es poden classificar en cooperatives i no cooperatives. En el TFM tenim múltiples usuaris primaris i secundaris, però només n'hi ha un de cada xarxa que s'està comunicant durant el temps de la simulació i estableixen una xarxa ad hoc.

Arquitectura amb infraestructura:

En aquesta arquitectura, l'estació mòbil (MS) només pot accedir a l'estació base (BS) o punt d'accés (AP) en un sol salt. L'estació mòbil emet en cap a l'estació base i les comunicacions entre les diferents cel·les s'encaminen a través de les xarxes troncales. Hi ha una infraestructura preestablerta per realitzar les connexions.

Arquitectura Ad hoc:

En l'arquitectura Ad hoc, no hi ha una estructura predefinida, però si l'estació mòbil troba una altra estació mòbil i és possible que es connectin, llavors poden establir un enllaç ad hoc (per aquella ocasió).

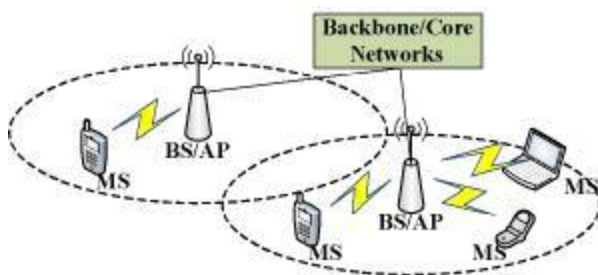


Figura 7: Arquitectura amb infraestructura [1]

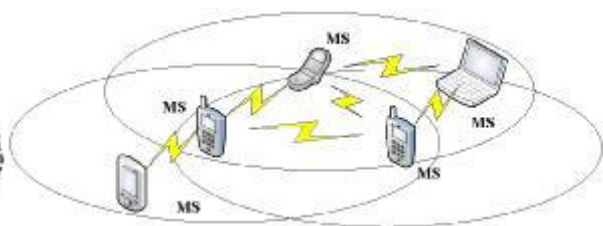


Figura 8: Arquitectura ad hoc[1]

Arquitectura de Malla

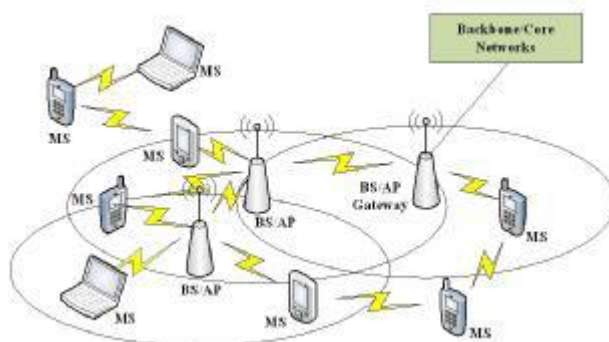


Figura 9: Arquitectura de malla [1]

Aquesta arquitectura és una barreja de les dues anteriors, empra les connexions entre els punts d'accés de manera que poden formar xarxes troncales sense fils. El terminal mòbil, pot accedir directament a l'estació base, o accedir-hi a través d'altres terminals en un cert nombre de salts.

En aquest TFM, s'estableix una connexió ad hoc a cada xarxa, una connexió en la xarxa primària i una connexió en la secundària que es mantenen actives mentre dura la simulació. Malgrat s'ha limitat el problema a aquesta necessitat, s'expliquen les característiques cooperatives i no cooperatives de les xarxes, per entendre com poden treballar entre ells els diferents elements d'una mateixa xarxa, així com marcar unes línies de futur.

Arquitectura no cooperativa

En la figura 9a de la xarxa no cooperativa trobem dues connexions de ràdio, una amb llicència i una altra cognitiva. S'il·lustra com els recursos de ràdio cognitiva s'empren per construir una nova xarxa, que es superposa a la que ja existeix amb llicència. La capacitat del sistema d'una xarxa cel·lular cognitiva no cooperativa és l'equivalent a la suma de les dues xarxes. Es remarca que en moltes bandes cognitives, s'han de limitar les potències de transmissió o ajustar-les per protegir als titulars [2], això comporta que amb l'augment de la distància del receptor secundari minvi la capacitat de la xarxa i conseqüentment que només valgui la pena desplegar la xarxa de comunicacions secundària a curt o mitjà abast.

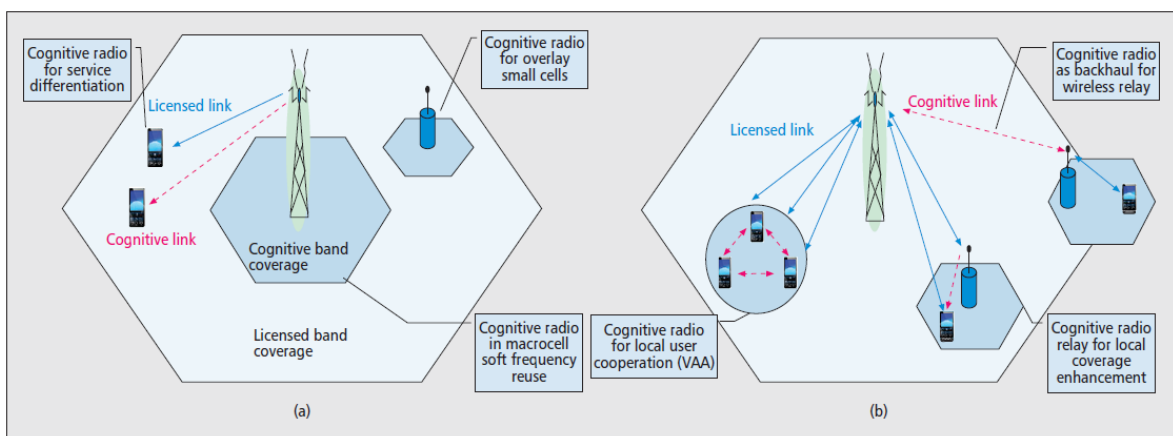


Figura 10: arquitectura a)no cooperativa b)cooperativa [2]

Arquitectura cooperativa entre primari i secundari

L'arquitectura de cooperació permet millorar el rendiment a partir de processar i transmetre informació de manera coordinada per aconseguir un millor rendiment. Es creen diferents tipus de connexions en el sistema. (figura 10b) [2]

En l'arquitectura de cooperació, els guanys de capacitat són més estables que en la no cooperativa.

En la figura 9b, podem s'observa tres tipus de xarxes de cooperació, per millorar la cobertura local, per la cooperació d'usuaris locals i la ràdio cognitiva com a retorn de la retransmissió sense fils.

2.3 Presa de decisions i aprenentatge en les xarxes cognitives

Tot i que no és objectiu del TFM entrar en algorismes d'optimització de la CR, es fa una presentació d'alguns dels mètodes més representatius d'aprenentatge que poden donar una visió més global del funcionament de la tecnologia de CR.

Com ja s'ha exposat, les xarxes cognitives estan relacionades amb l'aprenentatge de la màquina per poder adaptar-se al medi. Aquests mètodes d'aprenentatge, han de ser automàtics tant per part de la xarxa com per als dispositius d'usuari (autogestió).

Aquesta autogestió, ha de permetre que el sistema identifiqui les oportunitats per millorar el seu rendiment i gestionar activament possibles situacions problemàtiques, fins i tot, abans que aquestes ocorrin.

Per aconseguir la gestió adequada és necessari que tant els equips de xarxa com els d'usuari tinguin capacitat d'aprenentatge, per saber si les variacions que s'apliquen són positives o no es té en compte la qualitat de servei (QoS) i particularment en la taxa de bits aconseguida.

Si els equips d'usuari tenen capacitat d'aprenentatge, són capaços de recordar les preferències d'usuari i així poder configurar-se pels costums de l'usuari.

Per tal de poder establir l'aprenentatge, hi ha varis mètodes. En [5] es presenta un sistema de control difús, que és un controlador on les accions de control es porten a terme mitjançant la lògica difusa. L'arquitectura d'un sistema difús amb els seus mòduls el trobem a la figura 6 i es porta a terme amb l'arquitectura *cross-layer* (figura 12) amb aquesta arquitectura s'aconsegueix obtenir un rendiment òptim al tractar la optimització

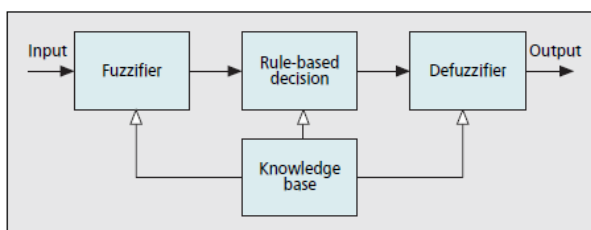
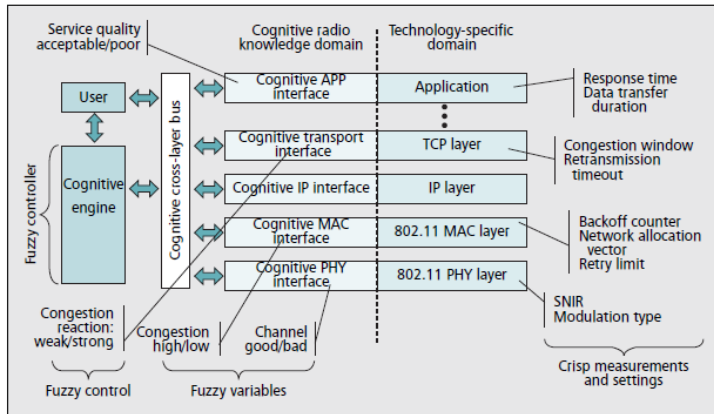


Figura 11: Arquitectura bàsica d'un controlador de lògica difusa [5]

conjunta de tots els components a la vegada, enlloc de cada component per separat i amb la lògica difusa per la representació de la informació i els controladors.

La figura 12 il·lustra com es pot dotar als diferents controladors d'uns valors de referència, que es configuren i aprenen dels diferents valors que es puguin captar i així prendre decisions i portar a terme un aprenentatge.



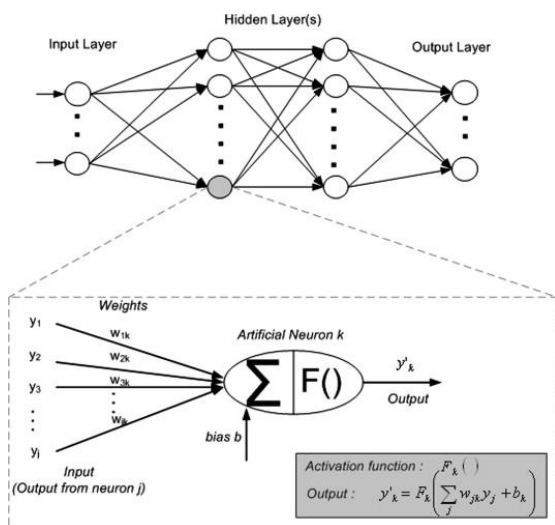
També es troben en la literatura algorismes genètics (GA), per tal d'escollir la població i poder obtenir una funció cost més elevada respecte QoS a partir de l'evolució de l'algorisme genètic.

Figura 12: arquitectura cross-layer cognitiva difusa [6]

També es troben algorismes implementats com a algorismes genètics, on tracten de predir la velocitat de les dades d'una configuració candidata. [7]

En els articles sobre el tema, es troben múltiples exemples d'optimització de resultats, a partir de processos estadístics, lògicament per millorar la QoS, on es tenen en compte les probabilitats d'un èxit per marcar l'aprenentatge i així millorar els resultats i la percepció de l'usuari.

En [8], es presenta un enfocament per aprendre de forma dinàmica tant de la informació rebuda, com de les preferències de l'usuari en el context. La combinació dels dos tipus d'informació, dona millors resultats i pot ser aprofitat posteriorment. En l'article la QoS



es refereix a més d'un paràmetre com el *bitrate*, el *jitter*, el retard, la taxa d'error de bit i el rendiment de la xarxa. D'aquesta manera, s'escull la configuració de la xarxa. Llavors s'aprèn de les preferències de l'usuari en relació amb el nivell de QoS percebuda per l'usuari. D'aquesta manera es tracta d'estimar les preferències més probables de l'usuari segons nivell de qualitat, la ubicació i la zona horària.

Figura 13: estructura típica d'una xarxa neuronal

2.4 Seguretat

Respecte a la seguretat en CR, en els articles s'explica que els protocols cooperatius de Control d'Accés al Medi (MAC) estan dissenyats per donar opcions equitatives a totes les connexions. L'inconvenient és que pot haver-hi participants que siguin egoistes o malintencionats. Aquests poden negar una part de l'espectre als altres usuaris o quedar-se'n més del que els hi pertocaria.

Es classifiquen en tres classes les diferents vulnerabilitats en CR: els atacs a la detecció de l'espectre, els atacs a la negociació del canal i els atacs a la denegació del servei. Intrínsecament a la manera de procedir de la CR s'han de poder prevenir diferents accions malintencionades en diferents moments. Per part de la connexió cognitiva, pot succeir que:

- Quan manté la consciència de l'entorn que l'envolta i l'estat intern, se l'ataqui per suplantar-li la identitat
- Quan s'adapta a l'entorn, pot ser una oportunitat de forçar-li canvis no desitjats, convertint-se en la víctima
- Quan anticipa accions per recolzar decisions futures, pot afectar el comportament en un llarg període de temps.
- Quan col·labora amb altres dispositius, seria una oportunitat per portar a terme un atac en tota la xarxa.
- També comprèn els riscos d'una xarxa sense fils com el control d'accés, confidencialitat, autenticació, etc...[9]

Els atacs explicats anteriorment es poden contrarestar amb la capacitat de col·laboració dels diferents elements, capacitat d'aprendre d'atacs anteriors, capacitat d'anticipar comportaments de prevenció o la realització d'anàlisis interns de comportament (autocontrol) [10].

3. Descripció del problema

Com ja s'ha introduït, el problema que es pretén solucionar és la transmissió simultània en la mateixa banda de freqüència d'una comunicació primària i una de secundària. Per fer-ho en aquest TFM es treballa sobre diferents hipòtesis generant tres escenaris semblants però diferents entre ells. En conseqüència el receptor de la xarxa primària no ha de rebre una interferència superior al límit d'interferència que pot tolerar, tal com hagin pactat els representants de la xarxa primària amb els de la secundària.

3.a Descripció de la solució proposada.

Aquest TFM, presenta varis escenaris que podrien adaptar-se al context del treball. Es presenten les diferents velocitats de transmissió del transmissor secundari que es podrien obtenir garantint la QoS de la connexió primària. Aquestes velocitats es calculen a partir de la simulació en Matlab de l'escenari definit, de la següent manera:

- a) Simulació de la xarxa primària: Es defineix una àrea determinada, en les simulacions s'ha definit $a=9$, que equival a 9km^2 . Es situa l'emissor primari al centre dels eixos de coordenades (0,0) i es distribueixen els diferents usuaris primaris, a partir de la seva densitat (ρ_1), que al TFM s'ha fixat a 10 receptors per km^2 . El receptor primari (RX) és l'usuari que està més a prop del transmissor primari (TX1), on (d_1) és la distància entre el TX1 i el receptor 1 (RX1), α és l'exponent de path-loss i f_1 és el fàding d'aquest canal. El transmissor primari transmet a la potència necessària per tal que el RX1 rebi $p_{r1} = p_{sen} = 1 \cdot 10^{-11}\text{W}$, que es correspon a la sensibilitat del RX1.

```
% SIMULACIÓ XARXA PRIMÀRIA
x1=(rand(1,n1-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada horitzontal dels n1-1 usuaris primaris (TX
primari es troba al centre)
y1=(rand(1,n1-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada vertical dels n1-1 usuaris primaris (TX
primari es troba al centre)
dlvec=sqrt(x1.^2+y1.^2); % distància dels n1-1 usuaris primaris al TX primari (que es
troba al centre)
[d1, ind1] = min(dlvec); % d1 és la distància entre TX i RX primaris
xrl=x1(ind1); yrl=y1(ind1); % coordenades del RX primari
if canal==0 %fàding entre TX i RX primari
    f1 =1; % no hi ha fàding
elseif canal==1
```

```

    f1=(randn^2 + randn^2)/2; % sqrt(f1) té distribució Rayleigh => f1 té distribució
exponencial de mitja igual a 1
    elseif canal==2
        f1=10^(-mu+sigma*randn)/10; % f1 té distribució log-normal => 10*log10(f1) té
distribució normal
    end
    pt1=psen*(d1^alpha)/f1; % potència que ha de transmetre TX primari perquè la potència
que rep el RX primari sigui pr1=psen
% Nota: es considera que el control de potència és perfecte i es rep exactament pr1=psen

```

- b) Simulació de la xarxa secundària: Es procedeix de la mateixa manera que amb la xarxa primària per definir la xarxa secundària. La densitat d'usuaris de la xarxa secundària (ρ_2) és un dels paràmetres que s'aniran modificant per obtenir els resultats de l'estudi. En quant al transmissor secundari (TX2), un dels paràmetres que es tindran en compte és la distància entre ell i el transmissor primari (D12). Aquesta distància, s'anirà modificant per obtenir diferents valors per l'estudi.

```

% SIMULACIÓ XARXA SECUNDÀRIA
x2=(rand(1,n2-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada horitzontal dels n2 usuaris secundaris
y2=(rand(1,n2-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada vertical dels n2 usuaris secundaris
% ----- FIXAR POSICIÓ TX SECUNDARI -----
D12=0.1; % distància entre el TX primari i el TX secundari
xt2=D12; yt2=0; % coordenades del TX secundari
% -----
d2vec=sqrt((x2-xt2).^2+(y2-yt2).^2); % distància dels n2-1 usuaris secundaris al TX
secundari
[d2, ind2] = min(d2vec); % d2 és la distància entre el TX i el RX secundari
xr2=x2(ind2); yr2=y2(ind2); % coordenades del RX secundari

```

- c) Sensat del canal: El transmissor secundari mesura la potència que rep del TX primari (pr12).

```

% SIMULACIÓ SENSAT CANAL
% Nota: sensat el fa el TX secundari
if canal==0 % fàding entre el TX primari i el TX secundari
    F12 =1;
elseif canal==1
    F12=(randn^2 + randn^2)/2;

```

```

elseif canal==2
    F12=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
Tobs= 100; % temps de mesura/observació ** REVISAR VALORS **
error = sqrt(1.38e-23*290*4/Tobs)*randn; % error en la mesura de la potència del
primari si el temps de mesura és Tobs
pr12 = pt1 *D12^(-alpha)*F12 + error; % potència mesurada pel TX secundari

```

- d) Transmissió del TX2: A partir de la potència rebuda pel transmissor secundari del transmissor primari (pr12) s'ha de decidir la potència de transmissió del TX2 (pt2), amb la necessitat de complir la restricció de funcionament que la potència rebuda sigui superior a la potència màxima d'interferència (pmax) sigui inferior al llindar marcat per la restricció pactada entre les dues xarxes (prob (pr21>pmax)<prob). Per calcular la potència rebuda pel receptor primari hi intervenen: la potència de transmissió del secundari (pt2), la distància a la qual es troba aquest de RX1, l'exponent de path loss i el fàding. S'empra la següent relació, $pr21=pt2*d21^{(-alpha)}*f21$. Als següents apartats, en cada escenari es defineix com s'ha procedit exactament per decidir a quina potència es transmet.

```

% TRANSMISSIÓ SECUNDARI
if canal==0 % fàding entre el TX secundari i el RX primari
    f21 =1;
elseif canal==1
    f21=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
    f21=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
d21=sqrt((xt2-xr1)^2+(yt2-yr1)^2); % distància entre el TX secundari i el RX primari

% ----- DECIDIR POTÈNCIA TX SECUNDARI -----
pt2=1; % a partir pr12 s'ha de decidir pt2 amb l'objecte de complir CRITERI
prob(pr21>pmax)<prob
pr21=pt2*d21^(-alpha)*f21; % potència rebuda per RX primari quan TX secundari transmet
pt2 watts
% -----

```

- e) Potència rebuda per receptor secundari (pr2): per estimar la pr2 pel receptor secundari es té en compte la distància entre TX2 i RX2 i el valor de pt2 al qual s'està transmetent, es calcula la potència útil rebuda per RX2 (pr2), es té en compte el fàding del canal (f2).

```

if canal==0 % fàding entre el TX i el RX secundaris
    f2 =1;
elseif canal==1

```

```

        f2=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
        f2=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
d2=sqrt((xt2-xr2)^2+(yt2-yr2)^2); % distància entre el TX i el RX secundaris
pr2=pt2*d2^(-alpha)*f2; % potència útil rebuda per RX secundari

```

- f) Velocitat de connexió (R2): Finalment, seguint el límit de Shannon, es determina la màxima velocitat de connexió entre el TX2 i RX2.

```

if canal==0 % fàding entre el TX primari i el RX secundari. Nota: no confondre amb F12
        f12 =1;
elseif canal==1
        f12=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
        f12=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
pn = 1.38e-23*290*4*W; % potència de soroll al RX secundari
d12=sqrt(xr2^2+yr2^2); % distància entre el TX primari i el RX secundari. Nota: no
confondre amb D12
pint = pt1*d12^(-alpha)*f12; % potència interferència TX primari sobre RX secundari
R2=W*log2(1+pr2/(pn+pint)); % màxima velocitat de connexió entre TX i RX secundari
(bps) segons límit de Shannon

```

- g) Observacions generals (I): A partir de la plantilla de simulació, es pot observar que hi ha moltes variables que són aleatòries, en conseqüència per obtenir uns resultats òptims, s'ha procedit a fer un anàlisi estadístic dels resultats. S'ha configurat la plantilla de Matlab per tal que simulés moltes realitzacions i després poder-ne calcular els estadístics. S'han inclòs vectors que emmagatzemen els diferents valors.
- h) Observacions generals (II): La posició del transmissor secundari respecte del transmissor primari s'ha d'anar modificant, s'ha optat per fraccionar la distància màxima estudiada (1km) en 100 fraccions. De tal manera que s'ha començat les realitzacions a 10 metres de distància i posteriorment s'ha anat desplaçant el TX2. Per cadascuna de les posicions s'ha obtingut un resultat de la velocitat de connexió R2.

Els escenaris que es tracten en el treball són:

3.1 Escenari 1 (D12 coneguda, sense sensat)

3.2.a Escenari 2 (pt1 coneguda, amb sensat i sense error)

3.2.b Sensat: Escenari 2b (com el 2 però amb error de sensat),

3.3.a Escenari 3 (D12 desconeguda, pt1 desconeguda, amb sensat i sense error)

3.3.b Sensat: Escenari 3b (com el 3 però amb error de sensat)

3.1 Escenari 1 (D12 conegut, sense sensat)

El primer escenari dels tractats, es basa en la suposició que l'usuari secundari coneix perfectament on està situat el transmissor primari (TX1), però no coneix la posició dels usuaris primaris (RX1). Per desenvolupar aquest escenari, s'ha ajustat la potència de transmissió (pt2) de manera que no es superi la potència màxima (pmax) que el receptor primari pot tolerar (RX1), per realitzar l'estudi estadístic, s'ha procedit a repetir la distribució de receptors i emissors a partir de les diferents densitats. Seguidament, s'han emmagatzemat i ordenat les distàncies entre el transmissor secundari i el receptor primari (d21) en un vector. A partir de les distàncies que hi ha al vector d21, s'ha aplicat la restricció acordada entre les dues xarxes (prob) de manera que s'ha garantit que la potència del transmissor secundari (pt2) no interfereix al receptor primari més que pmax més que les vegades acordades (prob).

```
d21=sqrt((xt2-xr1)^2+(yt2-yr1)^2); % distància entre el TX secundari i el RX primari
estd21(1,i)=d21;%estadístic de les distàncies
end
ordestd21=sort(estd21);%ordenem el vector de les variables aleatòries distàncies entre
el TX secundari i RX primari
d21Tall=ordestd21(prob*repetir); %la distància que ocupa la posició llindar, tenint en
compte la prob.
```

El coneixement de les densitats dels usuaris, permet un control i precisió òptim per ajustar la potència de transmissió.

```
pt2=(pmax)*d21Tall^(alpha)/f21;%potència òptima transmissor secundari
pr21=pt2*d21Tall^(-alpha)*f21;%potència rebuda llindar es correspon amb pmax
```

3.2 Escenari 2 (pt1 conegut, amb sensat i sense error)

L'objectiu del transmissor és calcular la potència òptima a la qual emetre (pt2) a partir de pr12, com és lògic a partir de la pr12 i la pt1 es pot conèixer la D12.

$$D12=(pt1/pr12)^{(1/\alpha)} \quad (EQ.1)$$

En aquest escenari, la potència de pt1, s'ajusta abans de fer el desplegament de la xarxa primària. Pt1 s'ajusta de manera que el receptor més proper rebi el senyal per sobre de la seva sensibilitat (psen) un 90% de les vegades, a partir de la densitat d'usuaris s'estableix a quina potència mínima s'ha d'emetre. En aquest escenari la potència transmesa de tots els transmissors primaris s'ajusta al mateix valor pt1 abans de fer el desplegament de la xarxa primària.

A partir de la densitat d'usuaris primària (rho1), es pot establir quina és la distància en la que els usuaris han de rebre el senyal (d1Tall) per simulació, també podem utilitzar la següent fórmula extreta de l'article de Barbarossa&uccarelli Eq. 3 [11].

$$d1Tall=\sqrt{-\log(1-0.9)/(pi*rho1)};$$

S'assumeix que TX2 coneix pt1, ja que pt1 només depèn de rho1 i de la sensibilitat dels receptors (psen).

$$pt1=psen*(d1Tall*1000^\alpha)/f1;$$

3.3 Escenari 3 (D12 desconegut, pt1 desconegut, amb sensat i sense error)

A l'escenari 3, el transmissor secundari TX2 ha de calcular pt2 en funció de la potència rebuda (pr12) i les densitats d'usuaris (rho1 i rho2). Una forma de fer-ho seria mitjançant una fórmula tancada que donés el valor de pt2 en funció de pr12, rho1 i rho2. Una altra manera d'implementar-ho, ja que no coneixem la fórmula, és calcular una taula on el TX2 busca el valor de pt2 en funció de pr12. Aquesta taula ha estat calculada prèviament per diferents valors de rho1, rho2. La taula s'omple per simulació de l'escenari. En aquest TFM es considera aquesta segona alternativa

Prèviament, per simular l'escenari i omplir la taula de valors, el TX2 desplega la xarxa primària aleatòriament a partir de rho1 (igual que la suposada xarxa real). A partir del

sensat del canal, calcula D12 i hi col·loca el TX2. Es calcula d21 distància entre el TX2 i RX1. Es fa la realització amb moltes repeticions i s'emmagatzema d21 en un vector, llavors es selecciona la d21 que ocupa la posició llindar que garanteix que es compleix la restricció pactada entre les xarxes primària i secundària (prob). Finalment calcula la pt2 a partir d'aquesta distància. Aquesta funció s'executa en cada realització perquè pr12 és diferent en cadascuna d'elles.

3.4 Tractament de l'error de sensat.

Al TFM s'ha introduït l'error de sensat, a partir de l'estudi de l'error rebut, en cada realització, a la funció de sensat del canal li arriba pr12 amb error, el TX2, ja preveu que pr12 conté l'error i en conseqüència el simula a partir de la variància de l'error de mesura, que aquesta sí que pot ser previsible o coneguda $\text{var}=1.38\text{e-}23*290*4/\text{Tobs}$. S'ha considerat que el detector és un filtre adaptat al senyal pilot transmès pel transmissor primari.

La variància del soroll es calcula com $k*T^{\circ}*NF*BW$ on k és la constant de Boltzmann, T° és la temperatura de referència en Kelvin, NF és la xifra de soroll de 6dB=4 i $BW=1/100$ que és inversament proporcional a Tobs.

En l'escenari:

```
Tobs= 100; % temps de mesura/observació
error = sqrt(1.38e-23*290*4/Tobs)*randn; % error en la mesura de
la potència del primari si el temps de mesura és Tobs

pr12 = pt1 *(D12real*1000)^(-alpha)*F12 + error; % potència
mesurada pel TX secundari
```

En la funció de sensat de canal:

```
errorsim = sqrt(1.38e-23*290*4/Tobs)*randn;%simulem l'error
D12sim=((pt1sim/(pr12detec-errorsim))^(1/alpha))/1000;%simulem la
distància a partir
```

Aquest sistema s'ha inclòs a l'escenari 2 i l'escenari 3.

Es pot observar en els següents apartats de resultats, que a partir del temps d'observació es pot reduir l'error, aquest valor s'ha d'ajustar en els diferents escenaris.

4. Presentació de resultats

La presentació de resultats, es porta a terme a partir de l'anàlisi de les gràfiques dels paràmetres més rellevants. Primerament per cadascun dels escenaris s'han representat:

-R2: Com ja s'ha descrit, la velocitat màxima en bps de la transmissió.

-Pt2: La potència transmesa pel transmissor secundari en dBw.

-R1vsR2: Donat que la velocitat de l'enllaç primari és:

$$R1=W*\log2(1+psen/(pn+pmax))=62Mbps$$

s'ha comparat la mitjana d'R2 amb R1 per veure quin percentatge de velocitat aconsegueix R2 respecte R1.

- *Transport Capacity*: Aquesta mètrica fa referència a la capacitat de l'enllaç respecte la longitud de l'enllaç. El que interessa és moure molta informació (bps) a gran distància(m), les seves unitats són bps*m.

Les realitzacions prenen diferents resultats segons la distància entre el transmissor primari i el transmissor secundari (D12), que es troba en l'eix d'abscisses x. S'ha partit dels valors prob=0.1 i rho2=100 i posteriorment s'han obtingut les gràfiques modificant un paràmetre o altre. Els valors escollits han estat els següents: prob=[0.01 0.05 0.1 0.2] i rho2=[10 50 100 200]. Una vegada vist el comportament dels diferents escenaris, s'hi ha afegit el tractament de l'error de sensat i s'ha presentat els diferents resultats segons el temps d'observació (Tobs).

4.1 Escenari 1 (D12 conegut, sense sensat)

4.2.a Escenari 2 (pt1 conegut, amb sensat i sense error)

4.2.b Escenari 2b com el 2 però amb error de sensat

4.3.a Escenari 3 (D12 desconegut, pt1 desconegut, amb sensat i sense error)

4.3.b Escenari 3b com el 3 però amb error de sensat

L'objectiu és presentar els resultats per poder avaluar objectivament les característiques de les diferents solucions i poder estimar-ne els resultats mitjançant la simulació.

4.1 Escenari 1: D12 conegut, sense sensat

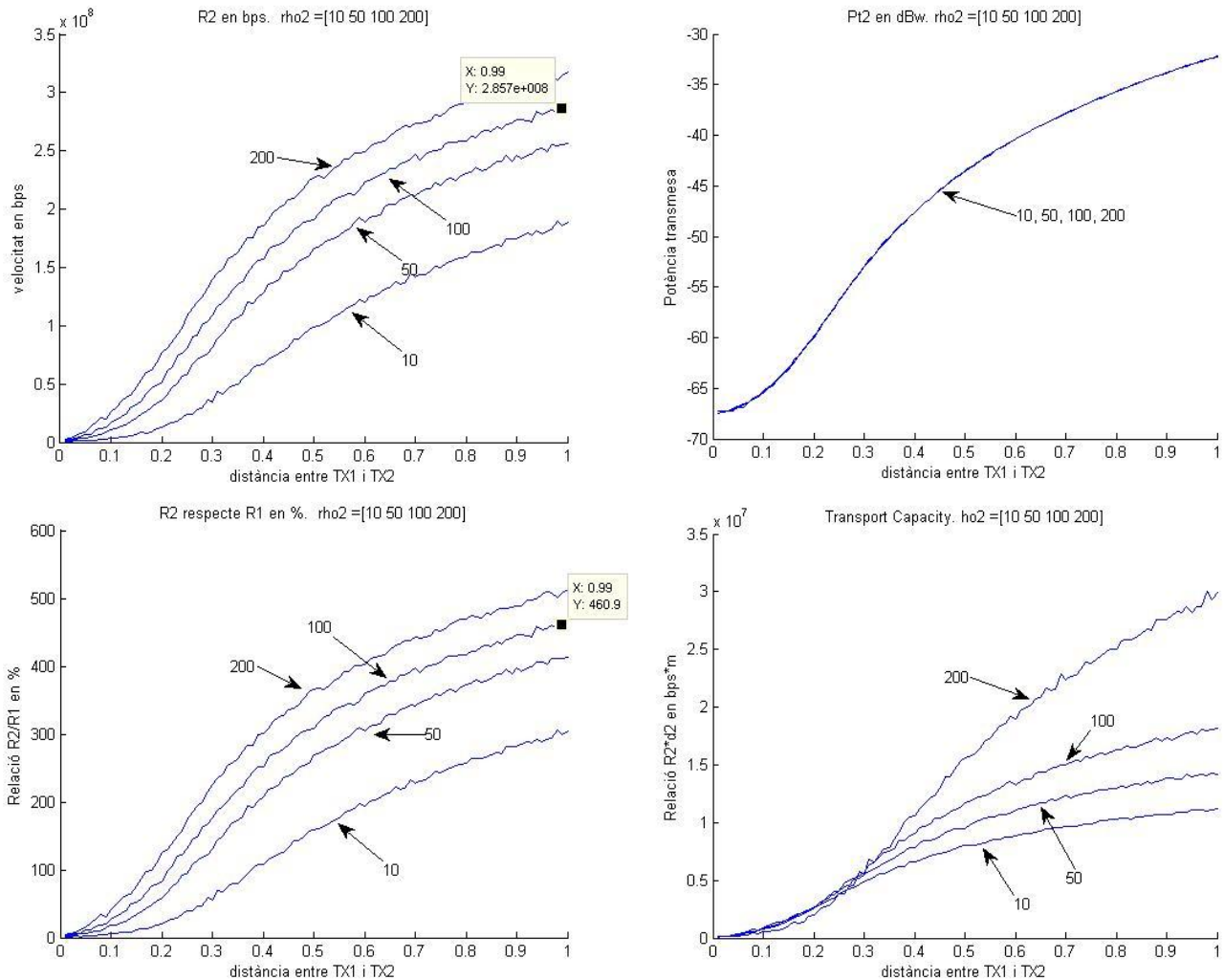


Figura 14: resultats escenari 1 modificant rho2

A les gràfiques superiors, s'observa el comportament de l'escenari 1 davant diferents densitats d'usuaris rho2. S'observa que en el nostre cas de partida prob 0,1 i rho2 100, la relació entre R1 i R2 se situa prop del 460% a un kilòmetre de distància i a partir de 200 metres ja ens proporciona una velocitat R2 superior a R1.

S'observa que la potència transmesa (pt2) dóna el mateix valor per cadascuna de les diferents densitats, això és degut a que varia la densitat del usuaris secundaris, però els usuaris primaris continuen estant a les mateixes distàncies d21, això explica que la potència sigui la mateixa i en canvi les R2 siguin més altes com més usuaris hi hagi, ja que les distàncies entre l'emissor i el receptor secundari, són més curtes.

Finalment el *transport capacity* ens demostra que per distàncies petites, les rho2 menys denses obtenen una capacitat de transport més elevada, cosa que s'inverteix cap als 250 metres aproximadament.

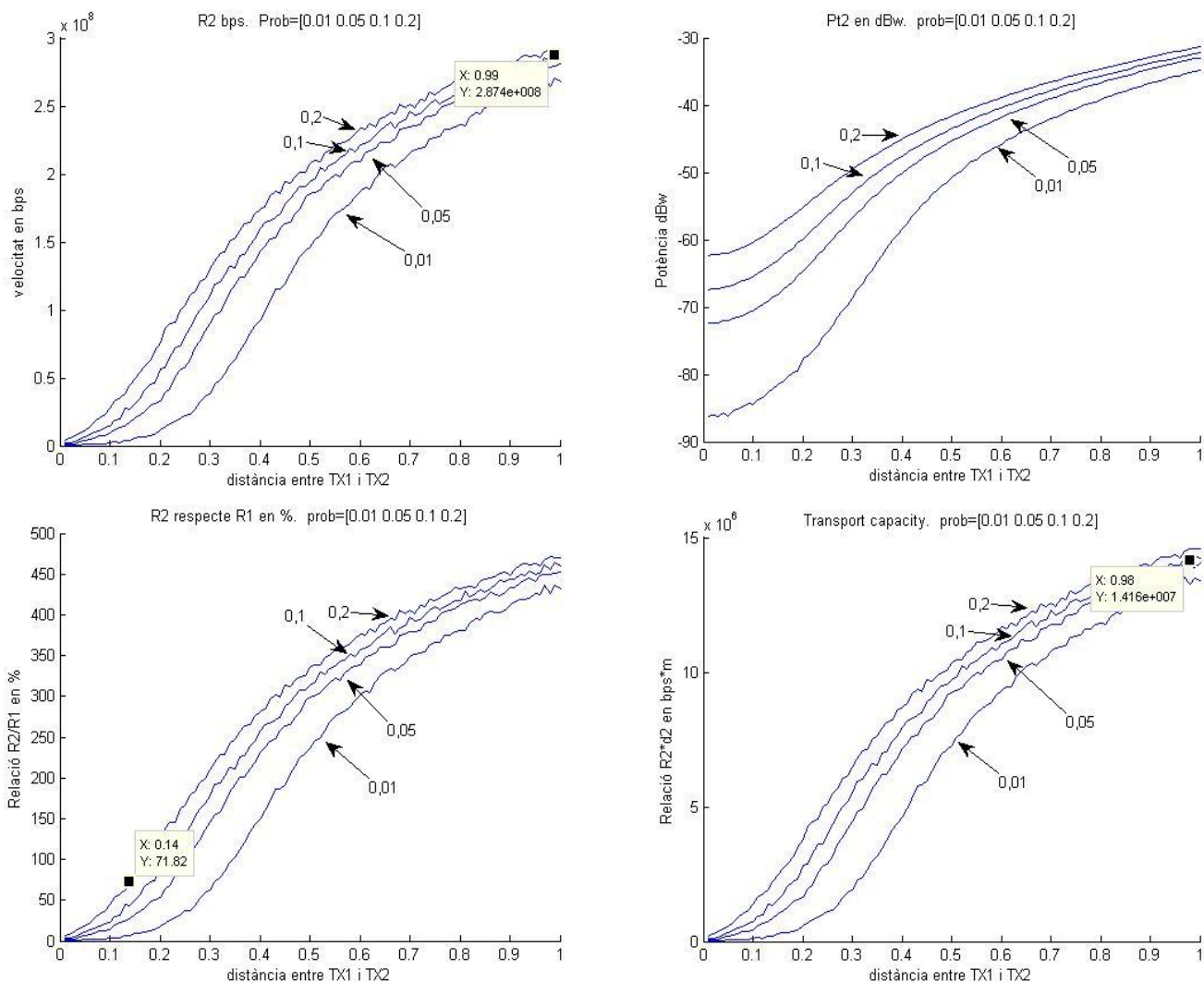


Figura 15: resultats escenari 1 modificant prob

Si enlloc de modificar les densitats, es modifica la probabilitat que la potència rebuda de TX2 pel receptor primari sigui superior a p_{max} , s'observa com les corbes decreixen i al km de distància la comparació amb R1 baixaria de gairebé el 460% amb prob 0,1 a 400% amb prob 0,01. En aquest cas sí que la potència s'ajusta per les diferents probabilitats. S'observa que quan el TX2 està prop de TX1, TX2 ha d'emetre lentament per tal de no interferir en la comunicació primària. A 1km de distància no es perd gaire velocitat essent més restrictiu, però a mitja distància (300 ò 400m) la caiguda de velocitat, és d'un 50%.

4.2.a Escenari 2: pt1 conegut, amb sensat i sense error

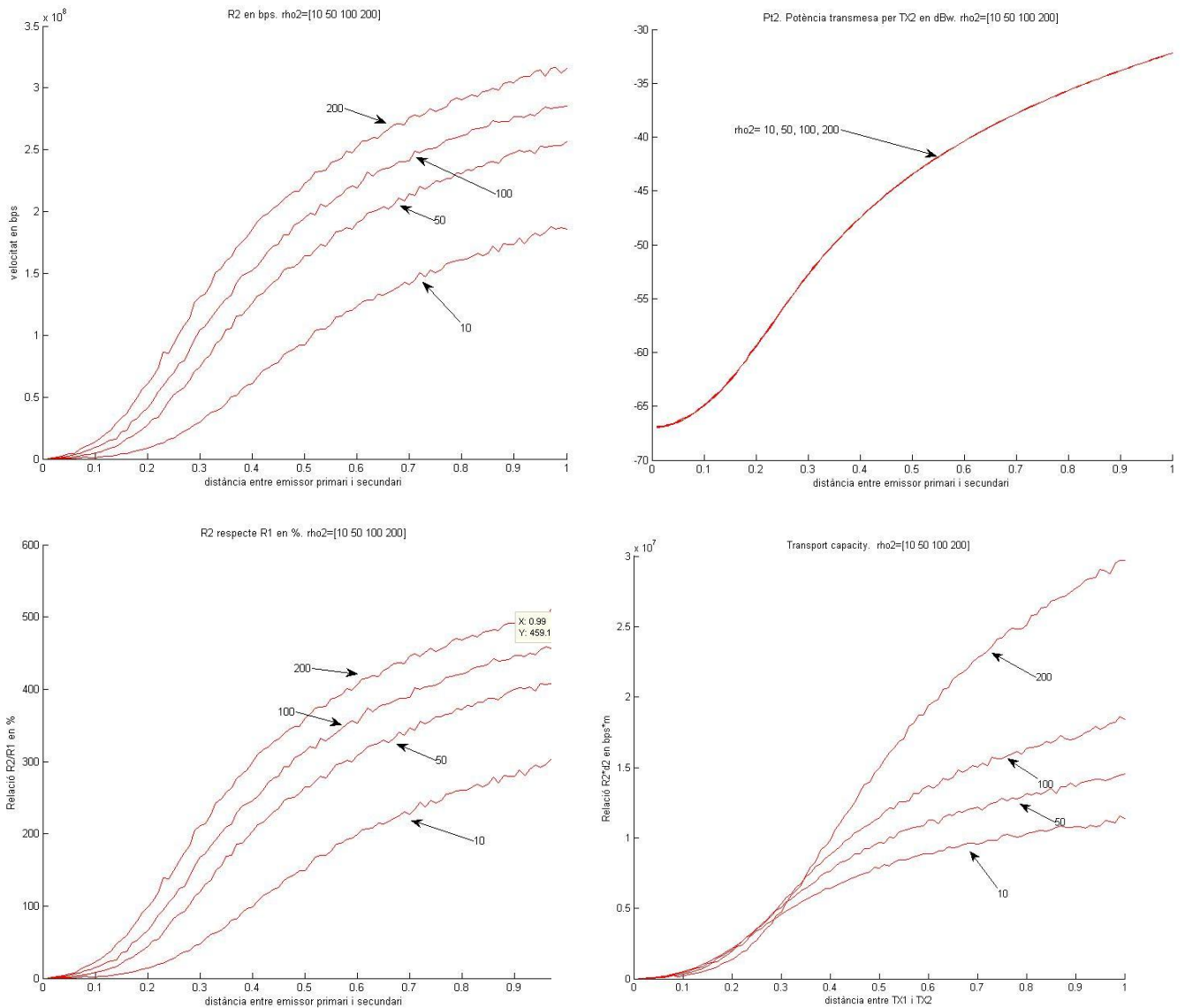


Figura 16: resultats escenari 2 modificant rho2

En aquest escenari la potència transmesa de tots els transmissors primaris s'ajusta al mateix valor pt_1 abans de fer el desplegament de la xarxa primària. Els resultats obtinguts per a les diferents densitats de la xarxa secundària són semblants a l'escenari anterior. S'observa que evoluciona donant més velocitat de connexió com més densitat hi ha, lògicament ja que la distància d_2 disminueix. S'observa al igual que l'escenari anterior que la capacitat de transport és més elevada com menys densitat hi ha en distàncies curtes, creuant-se les línies a partir de 300 ò 400 metres. Es torna a observar que la potència de transmissió no varia respecte ρ_2 , això és degut a que la ρ_1 és la

mateixa i per tant les distàncies entre el TX2 i el RX1 són les mateixes independentment de rho2, si es modifiqués rho1, llavors sí que es modificaria la corba de pt2.

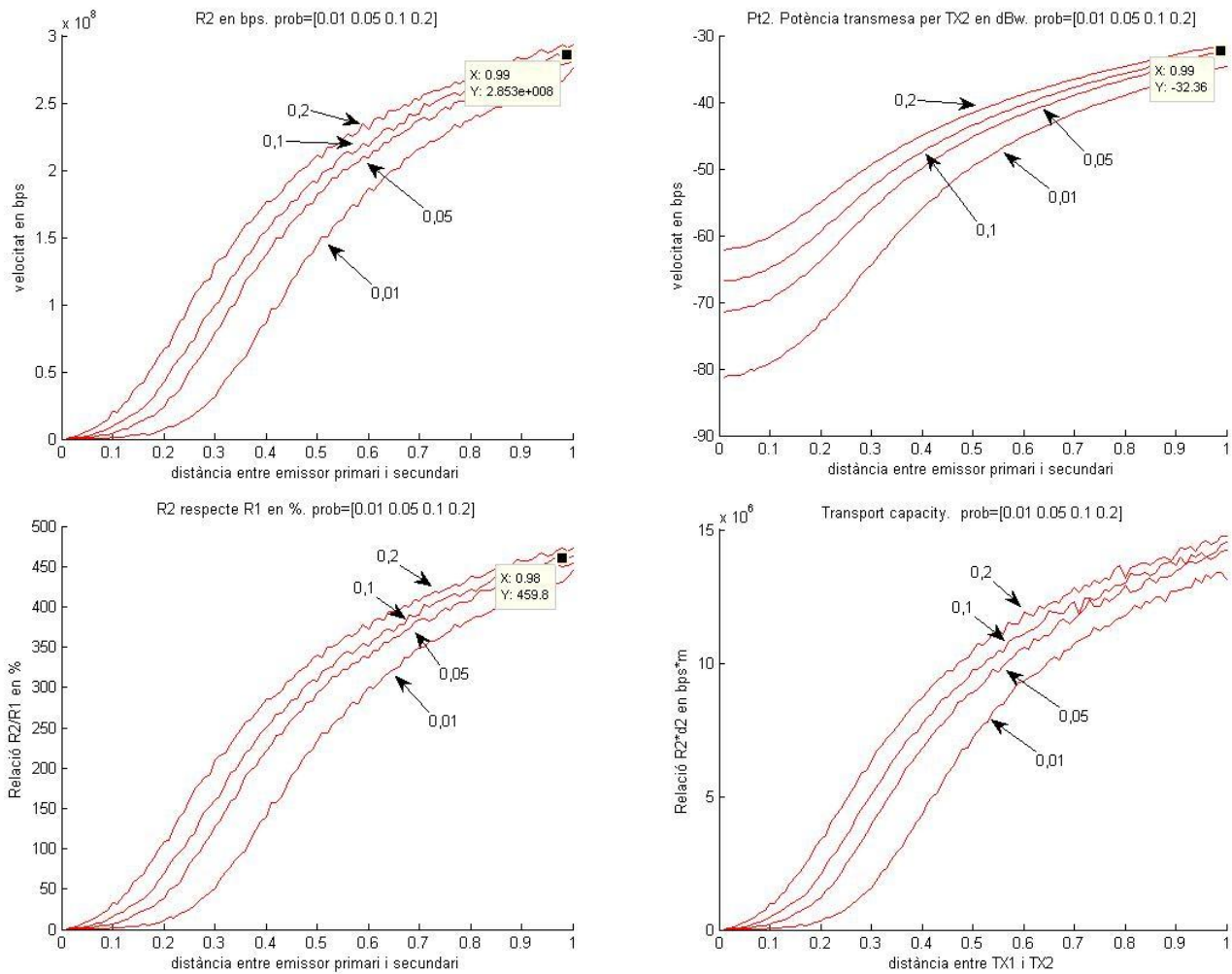


Figura 17: resultats escenari 2 modificant prob

S'observa que, respecte a les diferents probabilitats d'error, les velocitats disminueixen però tampoc ho fan de forma dràstica, la capacitat de transport es situa sobre els 10Mbps*m. La R2 es situa de l'ordre de 3×10^8 en tots els casos i en relació a la xarxa primària entre el 400 i 500%. El fet de conèixer la pt1, fa que es pugui optimitzar i oferir uns òptims resultats. Al igual que en l'escenari 1, l'ajustament de la restricció pactada entre la xarxa primària i secundària (prob), comporta salts més importants a curtes i mitjanes distàncies que a llargues distàncies.

4.2.b Tractament de l'error de sensat escenari 2b.

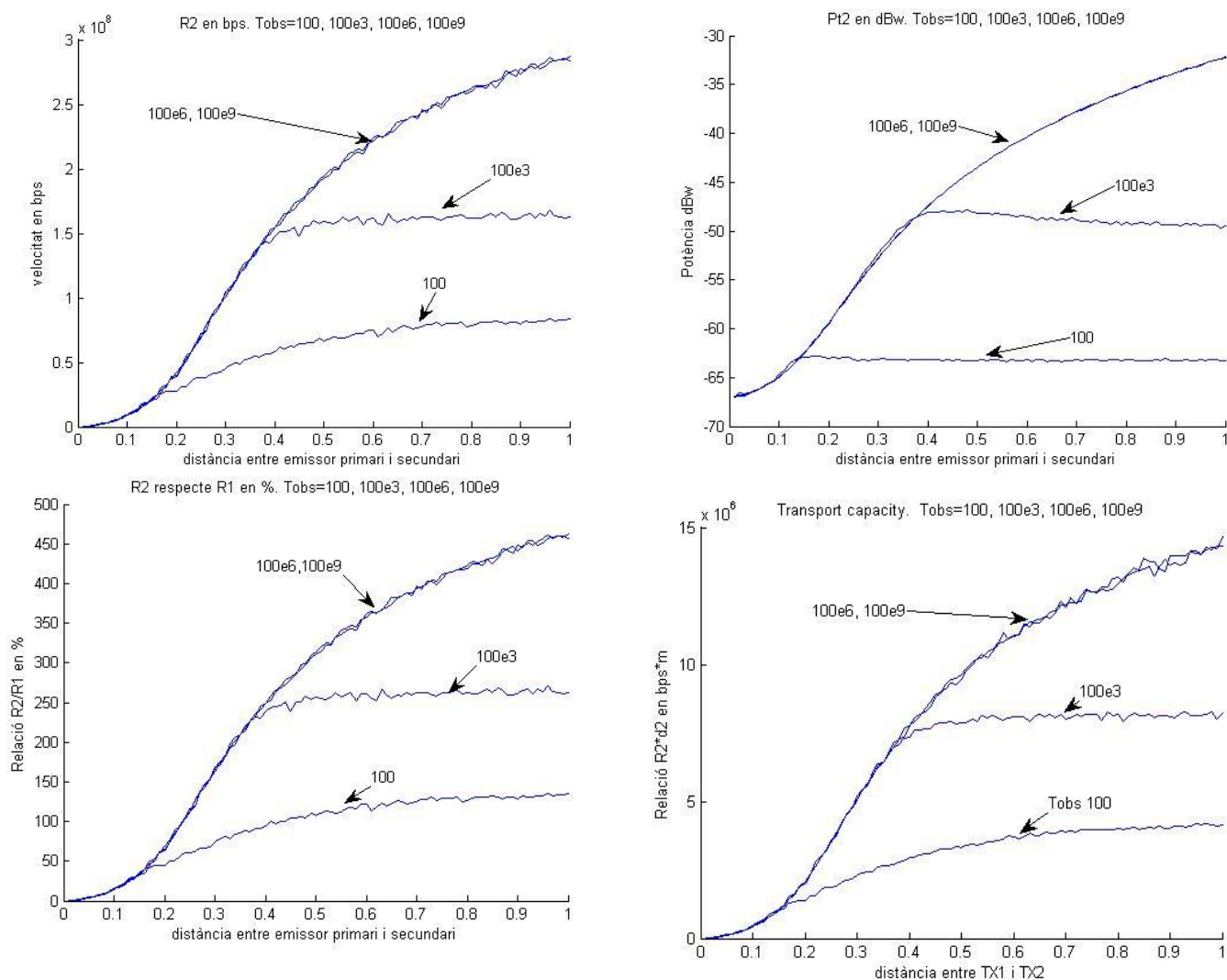


Figura 18: resultats escenari 2 modificant Tobs

En l'apartat anterior, s'ha mostrat els valors obtinguts en l'escenari en condicions òptimes, per tant podem establir que els resultats anteriors són l'objectiu a assolir. En aquest apartat s'ha inclòs l'error de sensat i s'ha treballat amb ell, els resultats obtinguts són fruit d'aplicar diferents valors al Tobs (100, 100e3, 100e6, 100e9). S'observa doncs que els Tobs 100 i 100e3 són insuficients per treure el màxim partit a la xarxa, en contrapartida es 100e9 és excessiu. Com a resultat òptim amb Tobs=100e6 s'obtenen els mateixos valors que l'apartat anterior i hi ha un aprofitament òptim dels recursos. L'inconvenient és que estaríem necessitant uns 3 anys de sensat, amb 100e3 necessitaríem 1,2 dies aquests Tobs no són gaire realistes. Així doncs amb Tobs=100 que són 1 minut 40 segons s'arribaria a transmetre 50Mbps pel cas D12=300m.

4.3 Escenari 3: D21 i pt1 desconegut, amb sensat i sense error

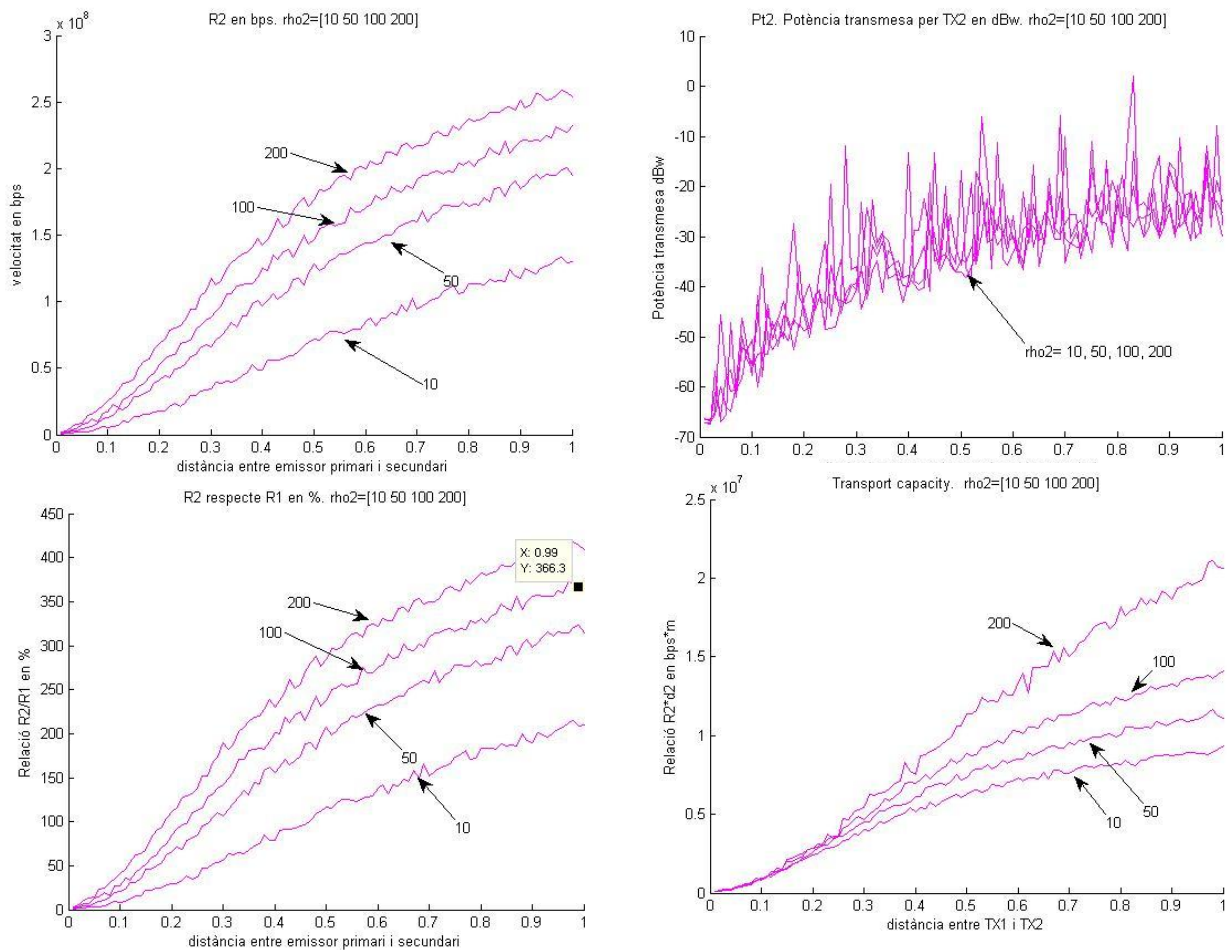


Figura 19: resultats escenari 3 amb variis rho2

Els resultats de l'escenari 3, presenten un rissat superior als dels altres escenaris, per un mateix nombre de realitzacions i promitjos, això és degut a la variabilitat dels resultats, ja que no es coneix ni la potència transmesa pel transmissor primari (pt1) ni la distància a la que es troba, tot i aquesta variabilitat, s'aconsegueix una velocitat (R2) sobre els 230Mbps al kilòmetre de distància. En relació a la velocitat de transmissió del transmissor 1 (R1), s'arriba al 366% al kilòmetre de distància. En aquest cas el *Transport Capacity*, també inverteix les corbes en distàncies curtes, però molt abans que els escenaris anteriors, entre 100 i 200 m. En quan la pt2, segueix la mateixa corba ja que rho1 és constant encara que variï rho2.

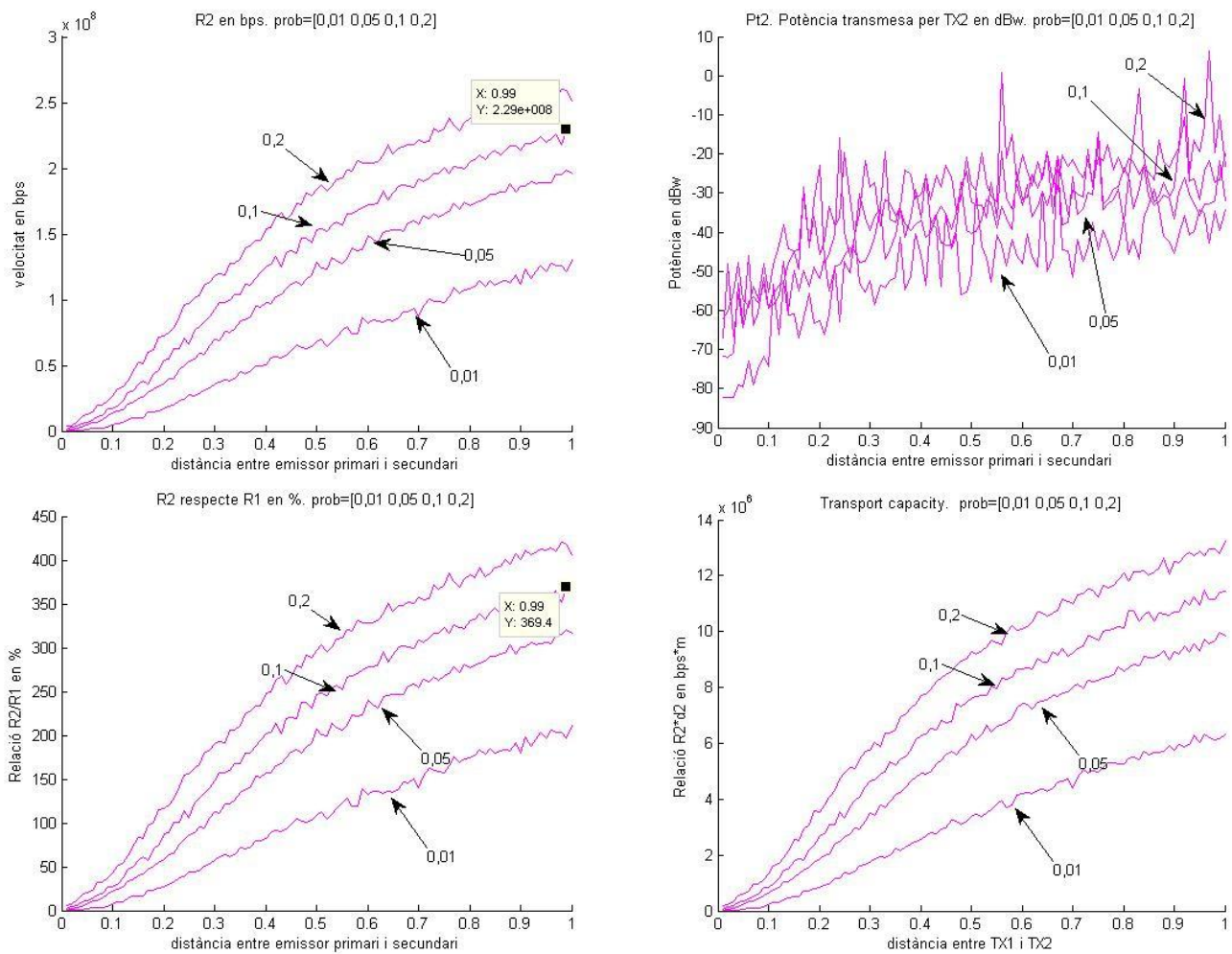


Figura 20: resultats escenari 3 variant la limitació de restricció

S'observa com en aquest escenari més restrictiu, al aplicar una limitació més restrictiva, la caiguda de velocitat (R2) és més pronunciada que en els altres escenaris, amb la limitació a 0,01 (prob=0,01) fins als 500m no tenim la mateixa velocitat a R2 que a R1. Mentre que amb prob=0,1 als 200m s'assoleix. La potència transmesa (pt2) tot i que amb bastant rissat, segueix corbes més restrictives com més baixa limitació (prob), aquest rissat és degut a que es simula totes les condicions de la xarxa a partir únicament de la potència (pr12) que rep el transmissor secundari (TX2) del transmissor primari (TX1).

4.3.b Escenari 3b: el 3 però amb error de sensat

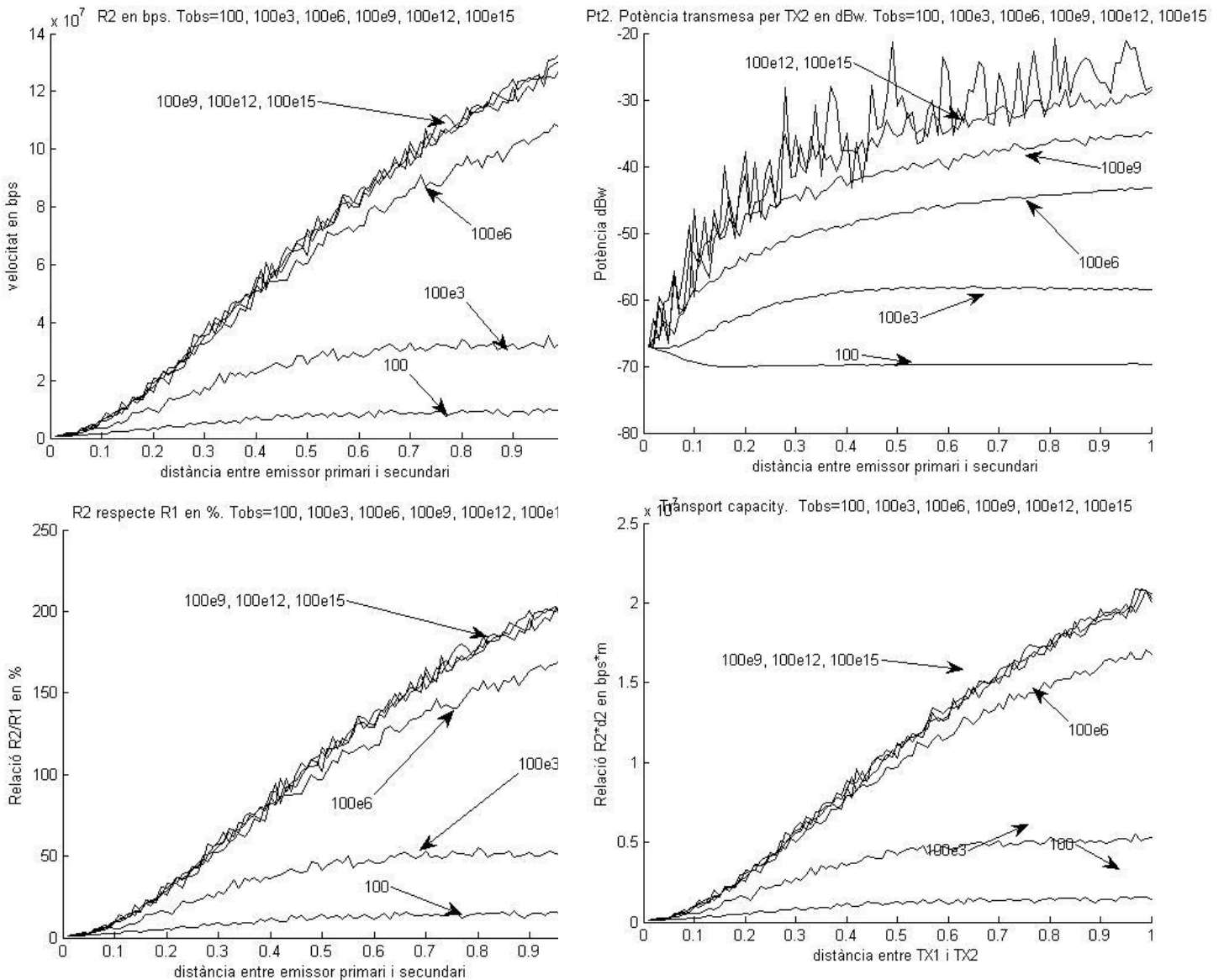


Figura 21: resultats escenari 3 modificant Tobs

En aquest apartat s'ha inclòs l'error de sensat i s'ha treballat amb la variància del senyal. S'observa doncs que per a $T_{obs}=100$ que correspon a 1 minut 40 segons, s'obté 5Mbps a 200m. Així doncs el fet de només conèixer pr21, implica uns resultats molt inferiors als dels altres escenaris.

4.4. Comparació dels escenaris descrits

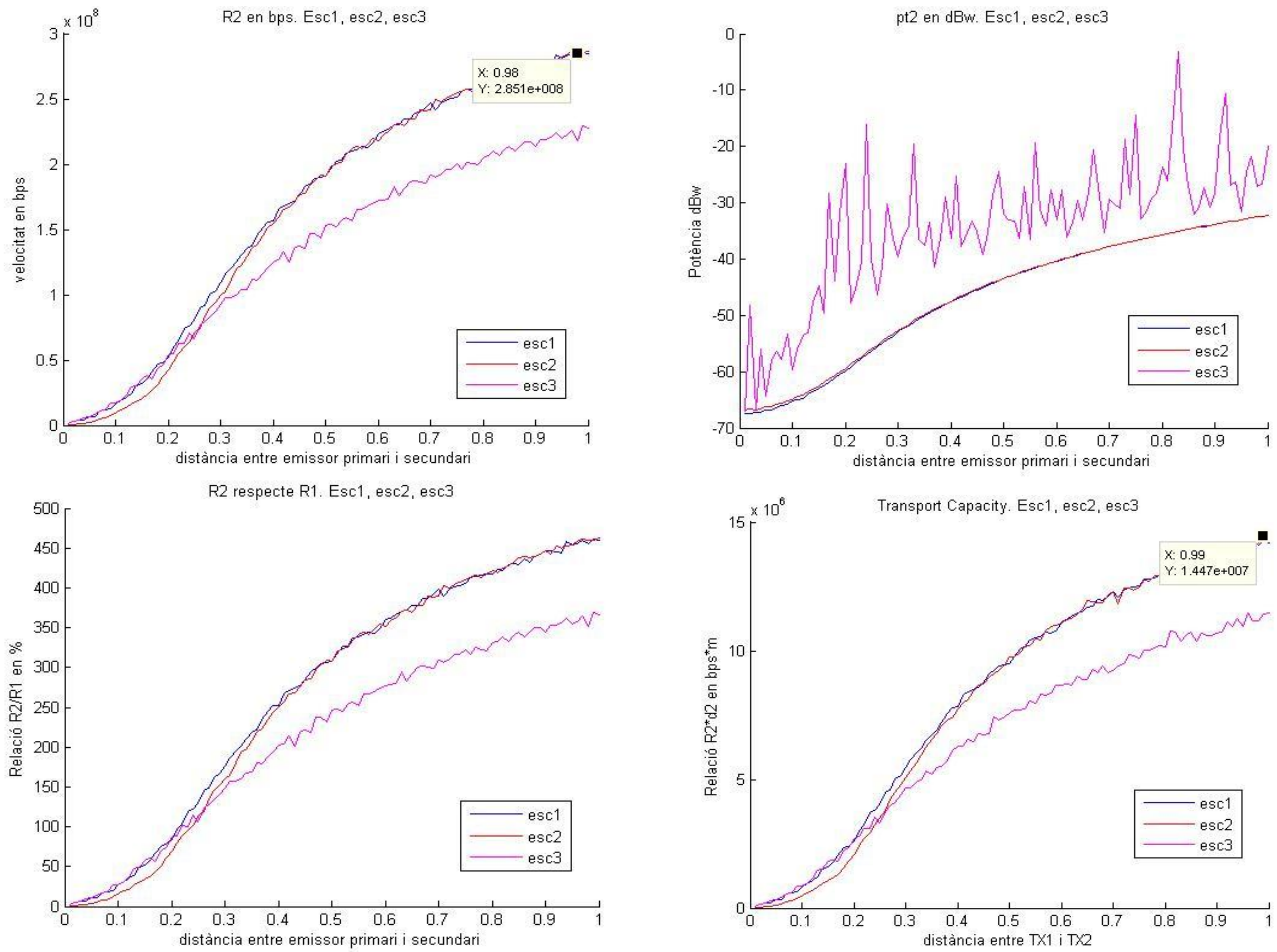


Figura 22: comparació dels diferents escenaris

Si ens fixem en els 3 escenaris, els escenaris 1 i 2 donen uns resultats semblants, recordem que el fet de conèixer la pt_1 , permet estimar la distància a la que es troba el TX1 a partir de la potència rebuda (pr_{12}) per TX2. Això explica que en distàncies curtes l'escenari 2 es situï lleugerament sota la corba de l'escenari 1 que coneix exactament la distància entre els transmissors (D_{12}), l'escenari 3 queda per sota dels dos primers escenaris. En quant a la potència transmesa, els dos primers escenaris són capaços d'ajustar la potència necessària amb molta més exactitud.

5. Conclusions

En aquest TFM s'ha fet un retrat de com s'està actuant a l'actualitat per aconseguir unes majors velocitats de connexió al mateix temps que es té en compte que l'espectre radio elèctric és un bé escàs i moltes vegades mal utilitzat. S'ha introduït el concepte de ràdio cognitiva i s'ha exposat quins són els diferents camins iniciats per aquesta. Tot i que aquest TFM se centra en la detecció de l'espectre i l'aprofitament dels forats radioelèctrics, s'ha incidit en les diferents arquitectures de Ràdio Cognitiva, s'ha explicat com es pot dur a terme un aprenentatge de la xarxa i s'ha introduït quins són els principals problemes de seguretat.

L'estudi presenta uns resultats clars que situen la velocitat de connexió de la xarxa secundària entre un 300% i 500% respecte de la primària a distància d'1km, s'ha de tenir en compte que s'ha considerat que únicament hi ha un transmissor primari, si n'hi hagués més d'un la velocitat del secundari R2 seria molt més moderada.

Si ens fixem en les distàncies a la qual ha d'estar el TX2 del TX1 per tal de tenir el doble de velocitat, aquestes se situen en els 350m aproximadament en els escenaris 1 i 2. Amb una separació d'uns 200m, ja hi ha una transmissió de la xarxa secundària que iguala la primària, garantint les condicions de transmissió de la xarxa primària. Per aconseguir aquests resultats és indispensable conèixer els principals paràmetres com la potència a la qual transmet el TX1 o la distància entre els transmissors, així com una correcta gestió de la variància del senyal, garantint que el temps d'observació sigui suficient per assolir els màxims resultats, però que no sigui més del necessari.

Val a dir també que els resultats comentats es refereixen a uns valors concrets, dins dels escenaris definits, però marquen uns patrons de comportament que són vàlids i permeten intuir el comportament de la xarxa secundària en d'altres escenaris. Així les diferents empreses primàries i secundàries de telecomunicació poden interpretar els resultats del projecte i preveure el comportament que poden esperar en les seves pròpies xarxes a partir dels patrons que s'estableixen en aquest TFM, a partir d'aquests també poden establir quines prioritats marquen segons els seus interessos, com per exemple invertir recursos en la necessitat de conèixer les posicions dels usuaris primaris o no.

Les xarxes primàries saben que no seran interferides en cap cas per les secundàries, les secundàries que velocitat poden aconseguir, ambdues coneixeran quina informació han de compartir perquè sigui profitós per a elles.

En quant als objectius plantejats inicialment en aquest treball: inicialment els objectius es van definir des d'una visió més general de la Ràdio Cognitiva i no entraven dins del projecte en profunditat, donat l'ampli camp que inclou la CR i els diferents camins d'actuació definits a l'estat de l'art, els objectius han evolucionat centrant-se més en el problema concret del nostre TFM i no en la ràdio cognitiva en general. A l'inici també es va definir un objectiu per definir un escenari simplificat i alhora realista, aquest s'ha vist incrementat amb modificacions de l'escenari inicial generant-ne d'altres igualment interessants.

Al meu parer, els objectius plantejats inicialment han estat assolits, es van definir de manera simplificada, realista i concreta, tot i això, no significa que hagin estat fàcils.

En quant al seguiment de la planificació: s'ha seguit la planificació inicial amb bastant rigor, tot i això, en un tema tant extens com el que s'ha tractat sempre s'ha anat just de temps per tal d'incloure el màxim d'informació o de resultats.

En quant a la metodologia: al meu parer en aquest TFM he pogut experimentar el avantatges i els inconvenients de l'ensenyament a distància en parts iguals. Per una banda he pogut planificar-me les sessions de treball i he après al meu ritme, per una altra el meu ritme no ha estat gaire normal, he tingut la sensació de perdre el temps massa sovint, sobretot en les primeres dues pacs, també he pogut experimentar la frustració de no progressar adequadament, els raonaments complexos o abstractes se m'han perfilat com massa complexos per resoldre'ls en la distància i per mi sol, les definicions dels escenaris, el sensat del canal o el detector d'energia m'han portat maldecaps, tot i això també m'han aportat satisfacció quan ho he assolit. Això sí, s'ha garantit un aprenentatge significatiu i constructivista. S'entén que la metodologia prevista i la distribució de les pacs, ha estat adequada, primer introduint el tema, després investigant-lo i finalment presentant els resultats i les conclusions, però m'he perdut massa sovint. Els articles en anglès, tampoc han ajudat gaire. No ha calgut introduir canvis gràcies a l'ajut, guia i ànims del consultor.

Per realitzar el TFM s'ha anat just de maquinari, o dit d'una altra manera, s'han de preveure recursos informàtics superiors als que s'havien previst.

En quan a les línies de futur a explorar: en quan a les línies de futur per explorar, faltaria explorar escenaris concrets, per exemple, on es coneix la distribució dels usuaris primaris o diferents variacions dels valors dels paràmetres.

Tenint en compte la limitació que suposa la potència rebuda per RX1 del TX2, es recomana centrar els esforços en conèixer les posicions dels usuaris primaris. No sembla exagerat pensar que la xarxa primària pot informar de la posició dels usuaris a la xarxa secundària en el cas de usuaris fixes. Si no es coneix anticipadament la posició, els usuaris primaris haurien de poder emetre algun tipus de senyal i els usuaris secundaris en col·laboració entre ells, establir-ne la posició i informar al transmissor secundari per tal que adapti la potència transmesa (p_{t2}) i es garanteixi que no supera la potència d'interferència (p_{max}). Si aquest TFM durés més temps, es proposaria desenvolupar aquest escenari, la qual cosa portaria cap a resultats semblants als de l'escenari 1, per fer-ho es proposa que els usuaris primaris es comprometen a enviar un senyal que els permeti ser detectats en el cas de ser una xarxa mòbil (si és fixa notificar les posicions a la xarxa secundària) llavors els usuaris secundaris que en reben millor el senyal, triangulen el senyal per establir-ne la posició, es proposaria amb 4 usuaris, de la mateixa manera també es podria trobar la posició del transmissor primari i informar al TX2 de quina posició ocupa, llavors a partir del senyal que rep el secundari pr_{12} , podrà calcular la p_{t1} a la qual transmet realment, d'aquesta manera calcular la p_{t2} òptima. En quant als resultats que s'obtidrien es podria pensar que serien superiors a l'escenari 1, però no ho serien, serien els mateixos pel que fa als valors mitjans, l'avantatge que aportarien seria un control absolut de la connexió i es podria garantir que no es supera mai la potència màxima d'interferència del transmissor secundari (TX2) al receptor primari (RX1), aquest seria el gran avantatge del sistema.

També s'haurien d'invertir esforços en trobar una fórmula que relacioni els diferents paràmetres i permetés trobar una p_{t2} òptima ràpidament.

6. Glossari

ad hoc: Locució que significa 'per a això', 'expressament', 'a propòsit'.

CR: Ràdio Cognitiva, en anglès *cognitive radio*

d2: distància entre el TX i el RX secundaris

d21: distància entre el TX secundari i receptor primari

D12: distància entre el TX primari i el TX secundari

pmax: interferència màxima que admet el RX primari

prob: probabilitat que la interferència sobre el RX primari sigui més gran que pmax

pr12: potència mesurada pel TX secundari

psen: sensibilitat dels receptors.

pt1: potència que ha de transmetre TX primari perquè la potència que rep el RX primari sigui psen

pt2: potència òptima transmissor secundari

pr21: potència rebuda per RX1 de TX2

R1: velocitat en bps de l'enllaç de la xarxa primària.

R2: màxima velocitat de connexió entre TX i RX secundari (bps)

rho1: densitat d'usuaris primaris per km²

rho2: densitat d'usuaris secundaris per km²

TFM: Treball de fi de màster

Tobs: temps de mesura/observació

7. Bibliografia

- [1] Luis Fernando Pedraza¹ Felipe Forero¹ Ingrid Patricia Páez²,
“Spectrum sensing for cognitive radio.”
Ingeniare.Revista chilena de ingeniería, vol. 20 N° 2, 2012, pp. 197-210
- [2] Hong, Xuemin; Wang, Jing; Wang, Cheng-Xiang; Shi, Jianghong,
“Cognitive Radio in 5G: A Perspective on Energy-Spectral Efficiency Trade-off”
IEEE Communications Magazine, ISSN 0163-6804, 2014,
Volum 52, Número 7, pàgs. 46 - 53
- [3] Qing Zhao; Sadler, B.M.,
"A Survey of Dynamic Spectrum Access,"
Signal Processing Magazine, IEEE , vol.24, no.3, pp.79,89, May 2007
- [4] Jun Ma; Li, G.Y.; Bing-Hwang Juang,
"Signal Processing in Cognitive Radio,"
Proceedings of the IEEE , vol.97, no.5, pp.805,823, May 2009
- [5] Axell, E.; Leus, G.; Larsson, E.G.; Poor, H.V.,
"Spectrum Sensing for Cognitive Radio : State-of-the-Art and Recent Advances"
Signal Processing Magazine, IEEE , vol.29, no.3, pp.101,116, May 2012.
- [6] Nicola Baldo and Michele Zorzi, University of Padova
“Fuzzy Logic for Cross-layer Optimization in Cognitive Radio Networks”
2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2007, ISBN
9781424406678, pàgs. 1128 – 1133
- [7] K. Tsagkaris *, A. Katidiotis, P. Demestichas.
“Neural network-based learning schemes for cognitive radio systems.”
Computer Communications, ISSN 0140-3664, 2008, Vol 31, Núm14, pàgs. 3394 - 3404

- [8] Aimilia Bantouna^{1*}, Vera Stavroulaki¹, Yiouli Kritikou¹, Kostas Tsagkaris¹, Panagiotis Demestichas¹ and Klaus Moessner
“ An overview of learning mechanisms for cognitive systems.”
EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, ISSN 1687-1472, 12/2012, Volum2012, Número 1, pàgs. 1 - 6
- [9] Araujo, Alvaro; Blesa, Javier; Romero, Elena; Villanueva, Daniel
” Security in cognitive wireless sensor networks. Challenges and open problems”
EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, ISSN 1687-1472, 12/2012, Volum 2012, Número 1, pàgs. 1 – 8
- [10] Zhang, Yan i Lazos, Loukas
”Vulnerabilities of Cognitive Radio MAC Protocols and Countermeasures.”
IEEE Network, ISSN 0890-8044, 2013, Volum 27, Número 3, pàg. 1
- [11] Barbarossa, S i Bucciarelli, F
“On the connectivity of cooperative and non cooperative wireless communication networks”
IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2005, 2005, ISBN 9780780388673, pàgs. 905 - 909

<http://www.diccionari.cat/> 4/1/2015

6. Annexos

S'adjunta el codi de Matlab per tal que es pugui observar com s'ha procedit.

```
% -----  
%  
% Plantilla TFM Simó López  
% Data: 20-oct-2014 rev: 16-dec-2014  
% ESCENARI 3: pt1 desconegut, amb detector d'energia  
% -----  
%  
% XARXA PRIMÀRIA  
% Treballarem en un àrea de 1 km x 1 km (a=1 km2)  
% El TX primari estarà al centre de l'àrea  
% Hi haurà uns altres n1-1 usuaris primaris que estaran repartits aleatòriament dins  
% d'aquesta àrea  
% La densitat d'usuaris primaris serà de n1 usuaris per km2  
% El RX primari serà l'usuari que estigui més a prop del TX primari: coordenades  
% (xr1,yr1)  
% L'enllaç primari està actiu tota l'estona  
% La potència rebuda pel RX primari és: pr1=pt1*d1^(-alpha)*f1  
% on "d1" és la distància entre el TX i el RX primaris  
% "alpha" és l'exponent del path-loss  
% "f1" és el fàding d'aquest canal.  
% El TX primari transmetrà la potència necessària (pt1 watts) perquè el RX primari rebi  
% pr1=psen=1e-11 (sensibilitat RX)  
%  
% XARXA SECUNDÀRIA  
% El TX secundari el col·loquem a les coordenades (x2t,y2t)  
% Repartim n2-1 usuaris secundaris de forma aleatòria en la mateixa àrea  
% La densitat dels usuaris secundaris és de n2 usuaris per km2.  
% El RX secundari serà l'usuari que es trobi més a prop del TX secundari: coordeandes  
% (x2r,y2r)  
% Es considera que els RX secundaris són igual de bons que els primaris  
%  
% SENSAT DEL CANAL  
% El TX secundari mesurarà la potència que rep del TX primari: pr12=pt1*r12^(-alpha)*f12  
% + error mesura  
% on "r12" és la distància entre el TX primari i el TX secundari  
% "f12" és el fàding d'aquest canal.  
%  
% TRANSMISSIÓ SECUNDARI  
% A partir de pr12, el TX secundari decidirà quina és la potència màxima que pot  
% transmetre (pt2) sense interferir "gaire" sobre l'enllaç primari.  
% El CRITERI escollit és el següent: prob( pt2*d21^(-alpha)*f21>pmax ) < prob  
% on "d21" és la distància entre el TX secundari i el RX primari  
% "f21" és el fàding d'aquest canal  
% pmax=psen/10 : interferència màxima tolerada sobre RX primari  
% prob=0.1 : probabilitat que es superi interferència pmax  
% La velocitat màxima a la que pot transmetre el TX secundari és: W*log2(1+pt2*d2^(-  
% alpha)*f2/(pn+pint)) (fòrmula de Shannon)  
% on "W" és l'amplada de banda utilitzada  
% "d2" és la distància entre el TX i el RX secundaris  
% "f2" és el fàding d'aquest canal  
% "pn" la potència de soroll a tots el receptors (primaris i secundaris)  
% "pint" la interferència del TX primari sobre el RX secundari  
clear  
clc  
% PARÀMETRES SIMULACIÓ  
a = 9; % àrea de simulació és un quadrat de sqrt(a) x sqrt(a) km2  
rho1 = 10; % densitat d'usuaris primaris (per km2)  
rho2 = 10; % densitat d'usuaris secundaris (per km2)  
n1 = rho1*a; % nombre d'usuaris primaris  
n2= rho2*a; % nombre d'usuaris secundaris  
alpha = 3; % exponent de propagació ("path-loss exponent")  
psen = 1e-11; % sensibilitat dels RX primaris (sensibilitat típica WiFi)  
canal = 0; % 0: canal AWGN, canal sense fàding (només soroll tèrmic)  
% 1: canal amb multipath (fàding Rayleigh)  
% 2: canal amb shadowing (fàding log-normal)
```

```

mu=-3; sigma = 3; % mitjana i desviació típica del shadowing
pmax = psen/10; % interferència màxima que admet RX primari
probabilitat=0.1;
prob = probabilitat*5; % probabilitat que la interferència sobre el RX primari sigui
més gran que pmax
W=20e6; % amplada de banda en Hz (WiFi)
Rl=62*10^6;%Rl=W*log2(1+psen/(pn+pmax))=62Mbps
repetir=1;

for j=1:1:100;
j
for i=1:1:repetir;

% SIMULACIÓ XARXA PRIMÀRIA REAL
x1=(rand(1,n1-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada horitzontal dels n1-1 usuaris primaris (TX
primari es troba al centre)
y1=(rand(1,n1-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada vertical dels n1-1 usuaris primaris (TX
primari es troba al centre)
dlvec=sqrt(x1.^2+y1.^2); % distància dels n1-1 usuaris primaris al TX primari (que es
troba al centre)
[dl, ind1] = min(dlvec); % dl és la distància entre TX i RX primaris
xr1=x1(ind1); yr1=y1(ind1); % coordenades del RX primari
if canal==0 %fàding entre TX i RX primari
f1 =1; % no hi ha fàding
elseif canal==1
f1=(randn^2 + randn^2)/2; % sqrt(f1) té distribució Rayleigh => f1 té distribució
exponencial de mitja igual a 1
elseif canal==2
f1=10^(-mu+sigma*randn)/10; % f1 té distribució log-normal => 10*log10(f1) té
distribució normal
end
pt1=psen*((dl*1000)^alpha)/f1; % potència que ha de transmetre TX primari perquè la
potència que rep el RX primari sigui prl=psen
% Nota: es considera que el control de
potència és perfecte i es rep exactament prl=psen

% SIMULACIÓ XARXA SECUNDÀRIA REAL
x2=(rand(1,n2-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada horitzontal dels n2 usuaris secundaris
y2=(rand(1,n2-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada vertical dels n2 usuaris secundaris
% ----- FIXAR POSICIÓ TX SECUNDARI -----
D12real=0.01*j; % distància entre el TX primari i el TX secundari
xt2=D12real; yt2=0; % coordenades del TX secundari
% -----
d2vec=sqrt((x2-xt2).^2+(y2-yt2).^2); % distància dels n2-1 usuaris secundaris al TX
secundari
[d2, ind2] = min(d2vec); % d2 és la distància entre el TX i el RX secundari
xr2=x2(ind2); yr2=y2(ind2); % coordenades del RX secundari

% SIMULACIÓ SENSAT CANAL
% Nota: sensat el fa el TX secundari
if canal==0 % fàding entre el TX primari i el TX secundari
F12 =1;
elseif canal==1
F12=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
F12=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
%for d=1:1:300;
Tobs= 100000000000000; % temps de mesura/observació
error = sqrt(1.38e-23*290*4/Tobs)*randn; % error en la mesura de la potència del
primari si el temps de mesura és Tobs
prl2 = pt1 *(D12real*1000)^(-alpha)*F12 + error; % potència mesurada pel TX
secundari
%
pn = 1.38e-23*290*4*W; % potència de soroll
prl2detec=prl2;%matprl2detec(i,j);
% TRANSMISSIÓ SECUNDARI REAL
if canal==0 % fàding entre el TX secundari i el RX primari
f21 =1;
elseif canal==1
f21=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
f21=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
d21=sqrt((xt2-xr1)^2+(yt2-yr1)^2); % distància entre el TX secundari i el RX primari
d2=sqrt((xt2-xr2)^2+(yt2-yr2)^2); %per conservar les dades

```

```

d12=sqrt(xr2^2+yr2^2); % distància entre el TX primari i el RX secundari. Nota: no
confondre amb D12

% ----- DECIDIR POTÈNCIA TX SECUNDARI -----
-----
pt2sim=sensat_canal(pr12detec,rho1,rho2,prob,psen,pmax,a);
pr21=pt2sim*(d21*1000)^(-alpha)*f21; % potència rebuda per RX primari quan TX secundari
transmet pt2 watts

% -----
-----
if canal==0 % fàding entre el TX i el RX secundaris
    f2 =1;
elseif canal==1
    f2=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
    f2=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
pr2=pt2sim*(d2*1000)^(-alpha)*f2; % potència útil rebuda per RX secundari
pn = 1.38e-23*290*4*W; % potència de soroll al RX secundari
if canal==0 % fàding entre el TX primari i el RX secundari. Nota: no confondre amb F12
    f12 =1;
elseif canal==1
    f12=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
    f12=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
pint = pt1*(d12*1000)^(-alpha)*f12; % potència interferència TX primari sobre RX
secundari
R2=W*log2(1+pr2/(pn+pint)); % màxima velocitat de connexió entre TX i RX secundari
(bps) segons límit de Shannon
% -----
-----
if canal==0 % fàding entre el TX i el RX secundaris
    f2 =1;
elseif canal==1
    f2=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
    f2=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
vectorR2(i)=R2;
vectorpr21(i)=pr21;
matriupr21(i,j)=pr21;
vectorpt2sim(i)=pt2sim;
end
mitjanaR2=mean (vectorR2);
mitjanapr21=mean (vectorpr21);
mitjanapt2sim=mean (vectorpt2sim);
vectordesplacamentR2(j)=mitjanaR2;
vectordesplacamentpt2sim(j)=mitjanapt2sim;
vectordesplacamentpt2simdBw(j)=10*log10(mitjanapt2sim);
end

errorpr21=0;%calcula quantes vegades es supera pmax
for z=1:100
for j=1:repetir

    if matriupr21(j,z)>pmax
        errorpr21=errorpr21+1;
end
end
end
Percentatge_error=errorpr21*100/(z*j)%ha d'estar per sota de prob

```

La funció que fa que TX2 decideixi pt2:

```

%% ESCENARI 3: pt1 desconegut, amb detector d'energia
function pt2sim=sensat_canal(pr12detec, rho1, rho2, prob, psen, pmax, a)

simxarxa=1000;
n1 = rho1*a; % nombre d'usuaris primaris
n2= rho2*a; % nombre d'usuaris secundaris
canal = 0;
alpha = 3; % exponent de propagació ("path-loss exponent")
for z=1:1:simxarxa;
x1sim=(rand(1,n1-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada horitzontal dels n1-1 usuaris primaris
(TX primari es troba al centre)
y1sim=(rand(1,n1-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada vertical dels n1-1 usuaris primaris (TX
primari es troba al centre)
dlvecsim=sqrt(x1sim.^2+y1sim.^2); % distància dels n1-1 usuaris primaris al TX primari
(que es troba al centre)
[d1sim, insimd1] = min(dlvecsim); % d1 és la distància entre TX i RX primaris
xrlsim=x1sim(insimd1); yrlsim=y1sim(insimd1); % coordenades del RX primari
if canal==0 %fàding entre TX i RX primari
    f1 =1; % no hi ha fàding
elseif canal==1
    f1=(randn^2 + randn^2)/2; % sqrt(f1) té distribució Rayleigh => f1 té distribució
exponencial de mitja igual a 1
elseif canal==2
    f1=10^(-mu+sigma*randn)/10; % f1 té distribució log-normal => 10*log10(f1) té
distribució normal
end
pt1sim=psen*((d1sim*1000)^alpha)/f1;

% SIMULACIÓ XARXA SECUNDÀRIA
x2sim=(rand(1,n2-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada horitzontal dels n2 usuaris secundaris
y2sim=(rand(1,n2-1)-0.5)*sqrt(a); % coordenada vertical dels n2 usuaris secundaris
% ----- FIXAR POSICIÓ TX SECUNDARI -----
%%
Tobs= 1000000000000000;
errorsim = sqrt(1.38e-23*290*4/Tobs)*randn;%simulem l'error
D12sim=((pt1sim/(pr12detec-errorsim))^(1/alpha))/1000;%simulem la distancia a partir

xt2sim=real(D12sim);%abs(D12sim);
yt2sim=0; % coordenades del TX secundari
% -----
d2vecsim=sqrt((x2sim-xt2sim).^2+(y2sim-yt2sim).^2); % distància dels n2-1 usuaris
secundaris al TX secundari
[d2sim, ind2sim] = min(d2vecsim); % d2 és la distància entre el TX i el RX secundari
xr2sim=x2sim(ind2sim); yr2sim=y2sim(ind2sim); % coordenades del RX secundari

% SIMULACIÓ SENSAT CANAL
% Nota: sensat el fa el TX secundari
if canal==0 % fàding entre el TX primari i el TX secundari
    F12 =1;
elseif canal==1
    F12=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
    F12=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
d21sim=sqrt((xt2sim-xrlsim)^2+(yt2sim-yrlsim)^2); % distància entre el TX secundari i
el RX primari
vector_d21sim(z)=d21sim;
end
vector_d21ordsim=sort(vector_d21sim);
d21Tallsim=vector_d21ordsim(simxarxa*prob);%Aquí tinc la distància de TALL per cada
distància a partir del .
% TRANSMISSIÓ SECUNDARI
if canal==0 % fàding entre el TX secundari i el RX primari
    f21 =1;
elseif canal==1
    f21=(randn^2 + randn^2)/2;
elseif canal==2
    f21=10^(-mu+sigma*randn)/10;
end
% ----- DECIDIR POTÈNCIA TX SECUNDARI -----
pt2sim=(pmax)*(d21Tallsim*1000)^(alpha)/f21;%potència transmissor secundari

```