

Figura 6.41: *Skewness* i *Curtosis* de les matrius de cost FF_i , en funció del tipus de normalització i i per a cada grup de seqüències generades (GA1 i GA2)

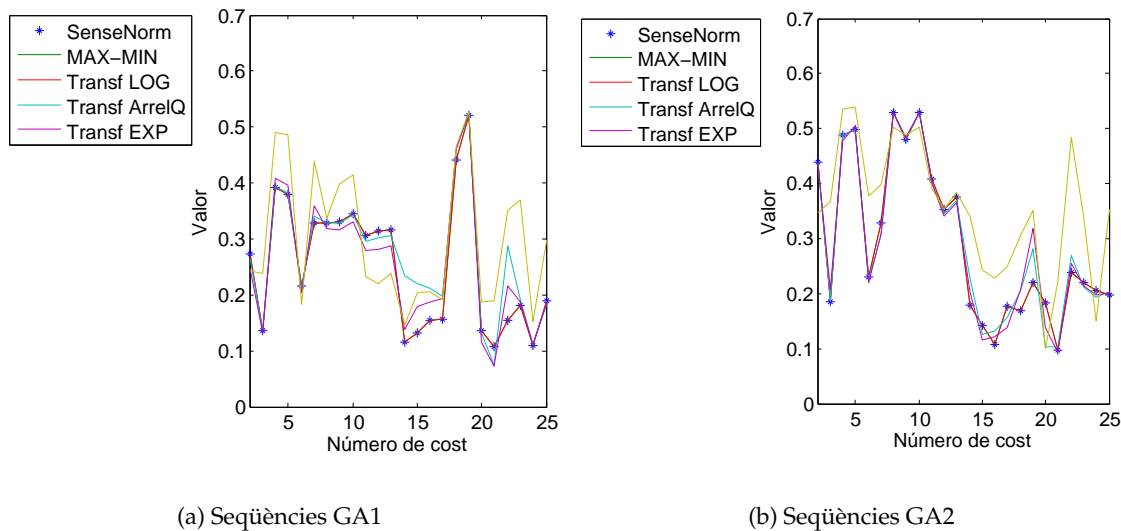


Figura 6.42: Resultat del test de Lilliefors per a les matrius de cost FF_i , en funció del tipus de normalització i i per a cada grup de seqüències generades (GA1 i GA2)

Algorismes de regressió

Els dos mètodes usats per a aconseguir el vector de pesos (partint de la matriu de costos i del vector de resultats) estan implementats pel Matlab dins del seu *Statistics Toolbox* [The07]. El primer és una regressió lineal múltiple, i es pot trobar el detall del seu funcionament en [CH86]. Una regressió lineal múltiple és un mètode estadístic, i necessita d'un vector de resultats i una matriu de costos, i retorna un vector de pesos amb les dependències de cada un dels pesos al resultat final. Una regressió lineal múltiple pren la forma de l'equació següent:

$$y_i = \gamma_0 + \gamma_1 x_{1i} + \gamma_2 x_{2i} + \gamma_3 x_{3i} + \dots + \gamma_p x_{pi} + e_i \quad (6.22)$$

on γ_0 és el terme constant i de γ_1 a γ_p són els coeficients relatius als p pesos que generaran el resultat. Es tracta d'una anàlisi que ens permet cercar com un conjunt de resultats s'associen amb una variable d'interès i donarà de resultat un conjunt γ de pesos que parlen de la implicació de cada un dels pesos al vector objectiu.

El segon mètode per a aconseguir una regressió lineal múltiple es detalla en [LH74], i resol la regressió lineal múltiple a través dels mínims quadrats basant-se en el criteri següent:

$$\min_x \|C \cdot x - d\|_2^2 \quad (6.23)$$

imposant que el vector de x que contingui valors no negatius. Per tant, per la naturalesa del mètode, la implicació dels pesos no serà mai considerada negativa en aquest cas.

La diferència fonamental entre els dos mètodes descrits ([CH86] i [LH74]) és que el primer considera que la implicació dels pesos pot ésser negativa i el segon no. Per tant, de les conclusions del primer se'n pot obtenir alguna que consideri que l'aportació d'un cost està relacionat de forma inversa amb el rendiment sobre el funcionament de l'estructura; en canvi, del segon anàlisi només se'n poden considerar contribucions positives de cada un dels pesos. Observarem més endavant que això garanteix que els resultats siguin força diferents.

Vectors de pesos resultants A continuació es detallen els vectors de pesos resultants W_i obtinguts a l'executar aquests dos algorismes per a obtenir els resultats ([CH86] i [LH74]) segons la regressió definida en l'equació 6.21. Els resultats per a cada un dels FE (definitos a l'apartat 6.6.3) es detallen a la figura 6.43. S'hi fa una revisió de tots els FE per a

cada gràfica, alhora que també es fa la prova per la matriu de costos sense normalitzar, amb l'escalatge Max-Min, amb la transformació logarítmica, amb la transformació d'arrel quadrada i finalment, amb la transformació d'exponencial. D'altra banda, els càlculs dels resultats es realitza tant amb l'algorisme de [CH86] - REG d'ara en endavant - com amb el [LH74] - NNLS d'ara en endavant.

Els resultats per a cada un dels sis *FE* s'assemblen força com es pot observar a la figura 6.43, però no és així per a cada normalització diferent, alhora que tampoc no s'assemblen si han estat calculats usant REG o usant NNLS. D'altra banda, es tracta d'una conclusió evident, puix que l'algorisme REG contempla la possibilitat que els pesos siguin negatius, i l'algorisme NNLS no ho contempla. Per tal d'avaluar-ne la bondat de les regressions lineals, es presenten els gràfics de les regressions lineals en funció de la mesura del valor y real (els sis *FE* calculats sobre els resultats de l'estructura multiresolutiva) i el resultat del producte de la matriu de costos *FF* per el vector de pesos resultants W_i . Si l'error fos zero, la correlació hauria de ser unitària, i a la figura 6.44 hi figurarien tan sols rectes de pendent unitari. Però el resultat no és aquest, i les correlacions de la figura 6.44 són núvols de punts que caldrà avaluar.

Per tal d'avaluar si hi ha hagut un sobreentrenament a l'hora de calcular les regressions que pot haver influït en la qualitat de les mateixes s'ha realitzat una validació creuada del càlcul usant *10-fold cross-validation* [Koh95].

Validació dels resultats amb el *10-fold cross-validation*

A continuació es mostren els resultats de la validació *10-fold cross-validation* que s'ha realitzat per a garantir que el sistema no estava sobreaprenent amb les dades que se li proporcionaven per tal de calcular la regressió lineal múltiple. Per tal de determinar la validesa dels resultats, s'analitza la correlació i la distància euclidiana (l'error MSE - *Mean Square Error*) del valor y calculat amb les sis funcions *FE* i l'aproximació obtinguda mitjançant $FF \cdot W$ per a les 10 combinacions possibles del test.

Avaluació de la correlació dels resultats Els boxplots de la correlació entre y i $FF \cdot W$ es mostra a la figura 6.45. En cada subfigura apareixen sis gràfiques, una per a cada *FE* dissenyat. En cada gràfica es mostren 6 boxplots per a cadascun dels 2 mètodes de regressió, desglossant els resultats per a cada normalització aplicada en els subcostos analitzats.

Cada *boxplot* mostra, doncs, l'estadística dels valors resultants de la correlació per a cada cost (dels 24 originals) així com aquests mateixos resultats per a cada una de les pos-

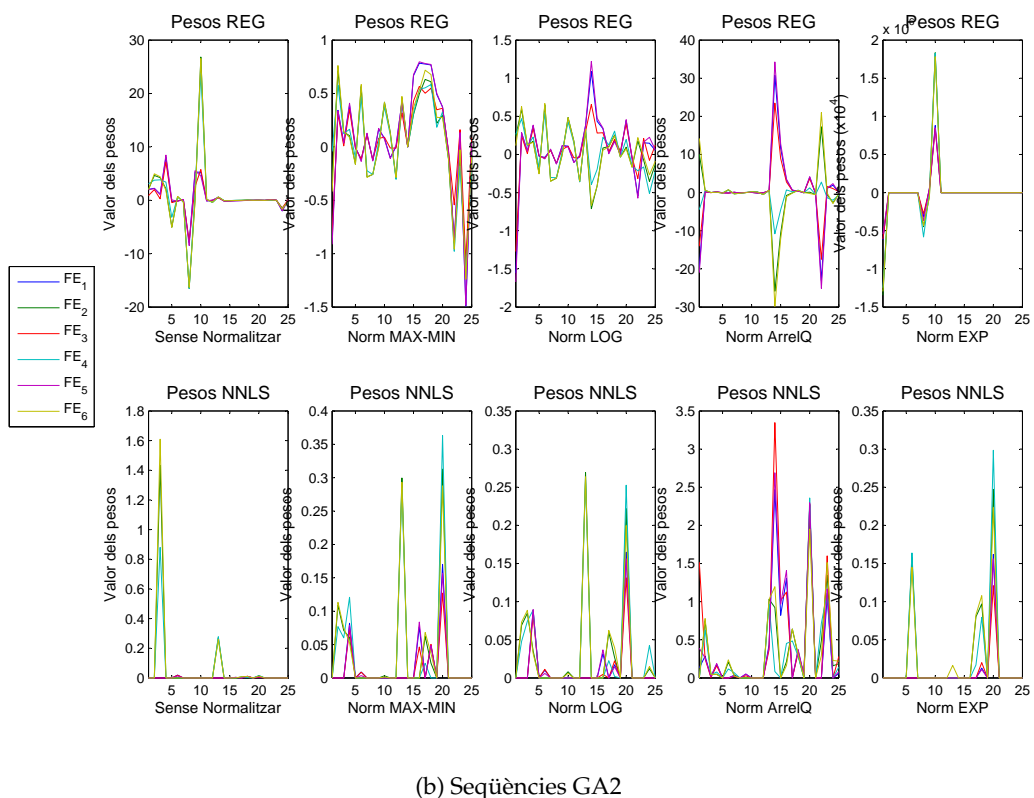
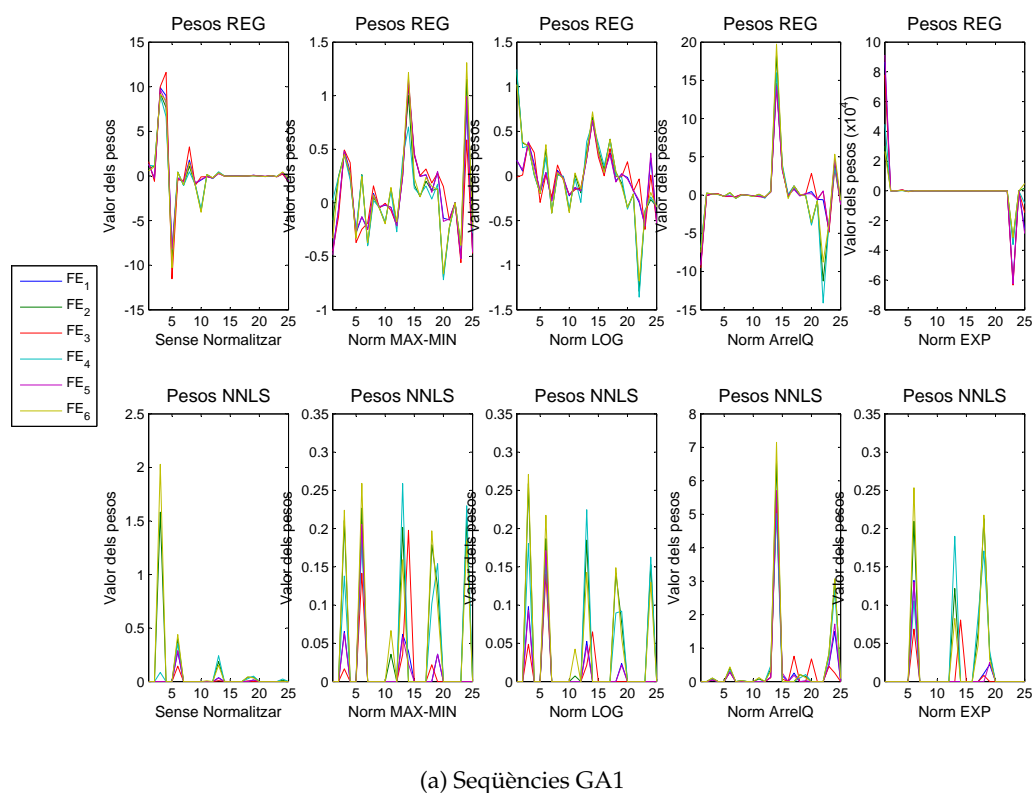
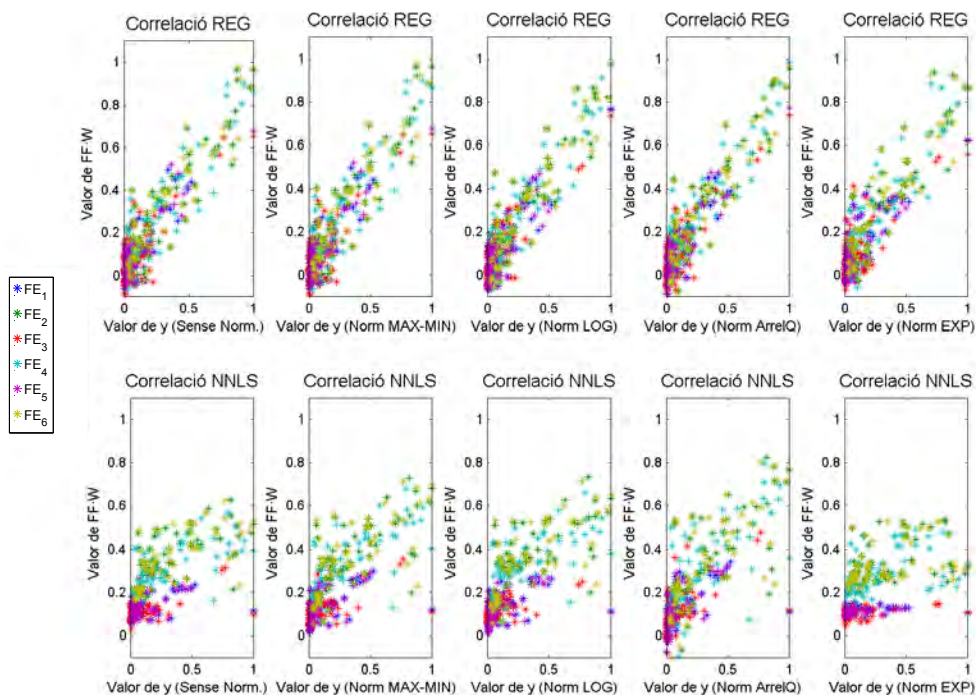
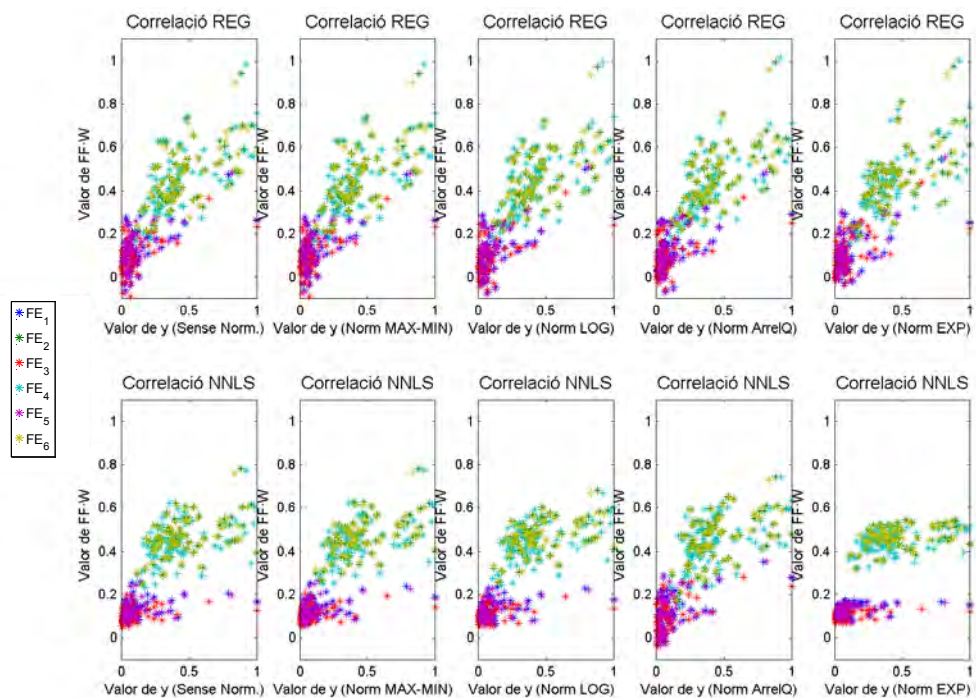


Figura 6.43: Resultats dels pesos obtinguts en les regressions lineals usant REG i NNLS per als 6 FE prèviament proposats (veure apartat 6.6.3) i per a cada conjunt de seqüències dissenyades (GA1 i GA2). Es mostra en les gràfiques el valor dels pesos en l'eix OY i els costos en l'eix OX.



(a) Seqüències GA1



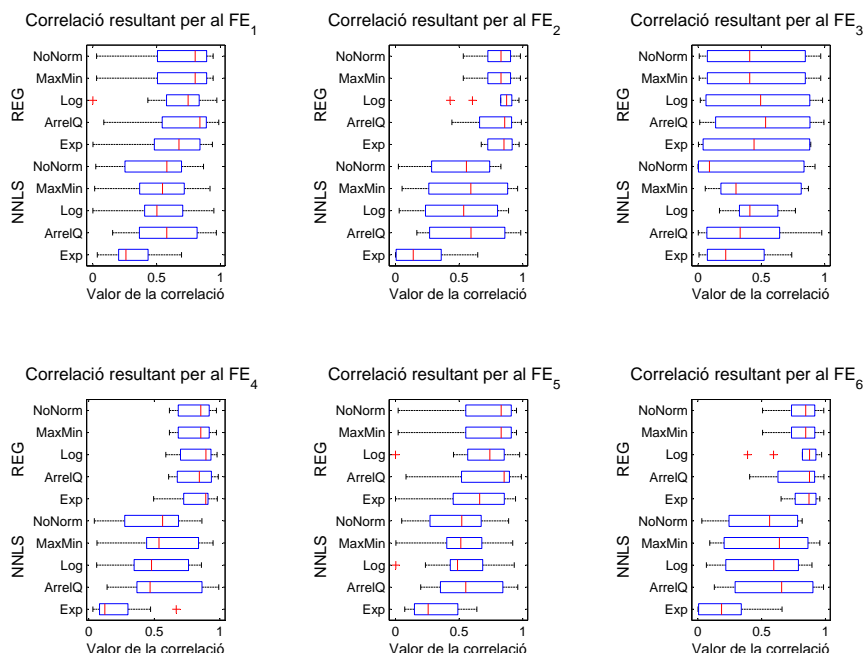
(b) Seqüències GA2

Figura 6.44: Resultats de les correlacions dels pesos calculats usant REG i NNLS amb els valors objectiu y per als 6 FE prèviament proposats per a cada conjunt de seqüències dissenyades (GA1 i GA2). En les gràfiques es mostra en l'eix OX el valor objectiu de y i en l'eix OY es mostra l'aproximació obtinguda per $FF \cdot W$, on FF és la matriu de costos i W és el vector de pesos obtingut.

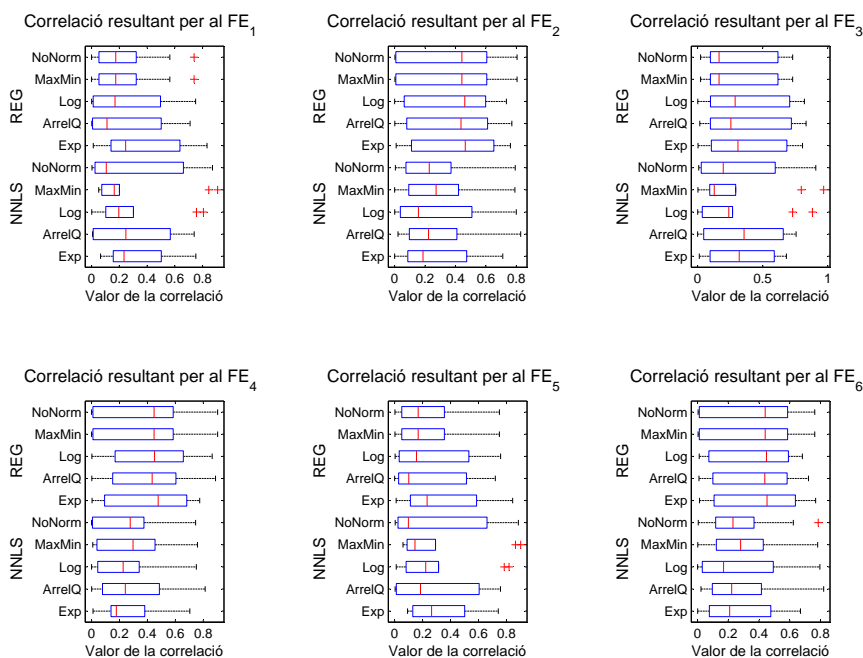
sibles 10 proves del test estadístic. Els resultats referents a la correlació permeten veure quina de les proves donarà més validesa als resultats, quin dels mètodes usats té més estabilitat en les dades i quina normalització presenta millors afinitats a la sortida, llevat d'algun *outlier* que es pot trobar a les gràfiques de la figura 6.46. En la figura 6.46.a s'observa que la correlació per a la regressió REG és substancialment millor que la que correspon a la regressió NNLS, especialment en els FE_2 , FE_4 i FE_6 . Dins d'aquest grup, es pot afirmar que la normalització LOG destaca en qualitat per sobre les altres. Caldrà veure si aquestes dades són corroborades per la distància euclidiana.

Avaluació de la distància euclídia Quelcom similar succeeix amb l'avaluació de la distància euclídia per al *10-fold*. Els resultats es presenten a la figura 6.46. L'estructura de presentació dels resultats és similar a la figura 6.45, la comentada anteriorment, tenint en compte els mateixos paràmetres. També en aquest cas, es comencen a apreciar tendències bones en algun algorisme de regressió i també en alguna normalització. Les distàncies euclidianes especialment en la figura 6.46.a per als FE_1 , FE_3 i FE_5 , especialment en les normalitzacions Max-Min i ArrelQ, presenten uns valors substancialment millors que la resta.

Vectors de pesos resultants per al *10-fold cross-validation* Finalment, resta només mostrar les diferents combinacions de pesos resultants de les proves *10-fold*, per a presentar gràficament les elevades similituds dels vectors de pesos resultants. De moment, les gràfiques 6.45 i 6.46 han mostrat que hi ha regressions i normalitzacions que presenten bons resultats de correlació i de distància euclídia. Ara caldrà veure sobre gràfica si els pesos obtinguts usant el *10-fold* s'assemblen entre ells, i per tant, es pot considerar que el sistema no està sobreaprenent. Els resultats dels valors dels pesos per a les 10 proves es poden observar a la figura 6.47 per a les seqüències GA1 i a la figura 6.48 per a les seqüències GA2. A les figures es mostren només els pesos calculats per al FE_2 i per al FE_4 a tall d'exemple, però han estat avaluats els sis FE . La totalitat dels vectors de pesos resultants i la seva comparativa dins de l'anàlisi del *10-fold* es troben a l'apèndix F. Tot seguit, a l'apèndix G es fa un estudi al detall de la millor funció FE , de la millor normalització i de la millor regressió. Això permet definir amb més precisió aquells costos que tenen més influència en el resultat de les funcions FE i que per tant, caldria tenir en compte en una futura definició d'un nou *fitness* per a generar una família de seqüències GA noves.

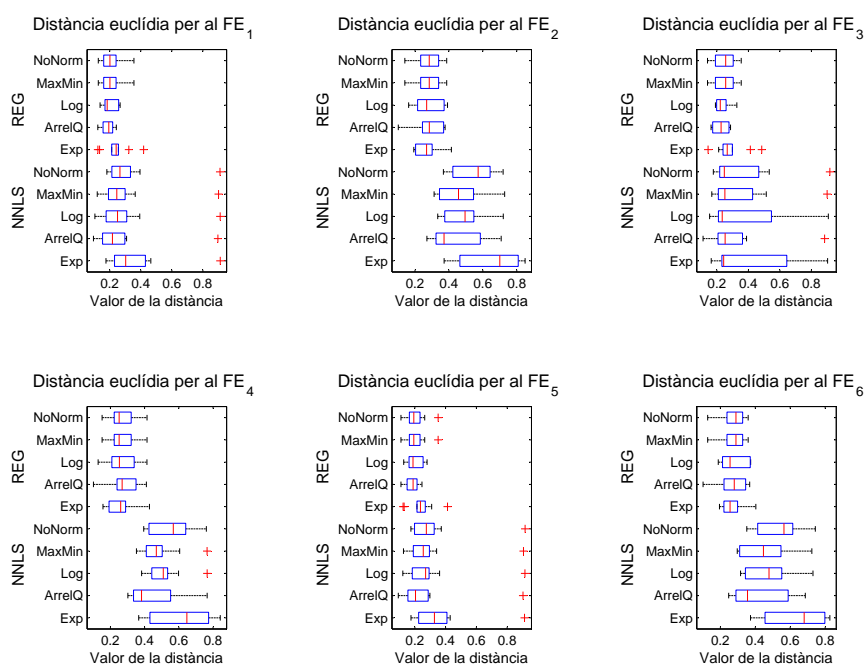


(a) Seqüències GA1

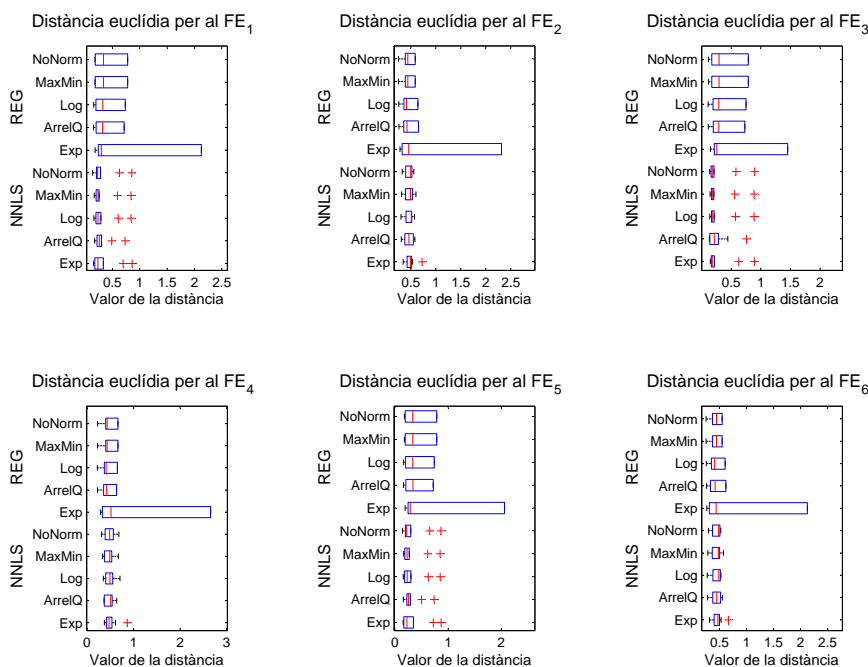


(b) Seqüències GA2

Figura 6.45: **Validació amb el 10 fold cross validation:** Correlació resultant per a cada un dels FE dissenyats, i amb els resultats separats per la transformació aplicada i per l'algorisme de regressió (REG o NNLS), i per a cada conjunt de seqüències dissenyades (GA1 i GA2). Els boxplots mostren la correlació entre les dades originals contingudes en els vectors y (provinents de les sis definicions de FE) i l'aproximació realitzada amb el vector de pesos W obtingut ($FF \cdot W$). Les correlacions màximes són les que ha aproximat millor els resultats amb el vector de pesos W obtingut.



(a) Seqüències GA1



(b) Seqüències GA2

Figura 6.46: **Validació amb el 10 fold cross validation:** Distància euclidiana resultant per a cada un dels FE dissenyats, i amb els resultats separats per la transformació aplicada i per l'algorisme de regressió (REG o NNLS), i per a cada conjunt de seqüències dissenyades (GA1 i GA2). Els boxplots mostren la distància euclídia entre les dades originals obtingudes en els vectors y (provinents de les sis definicions de FE) i l'aproximació realitzada amb el vector de pesos W obtingut ($FF \cdot W$). El vector W amb distància euclídia mínima és la que ha aconseguit aproximar millor el vector y original.

6.6 Validació de la hipòtesi inicial i funcionament de l'estructura multiresolutiva per les seqüències GA dissenyades

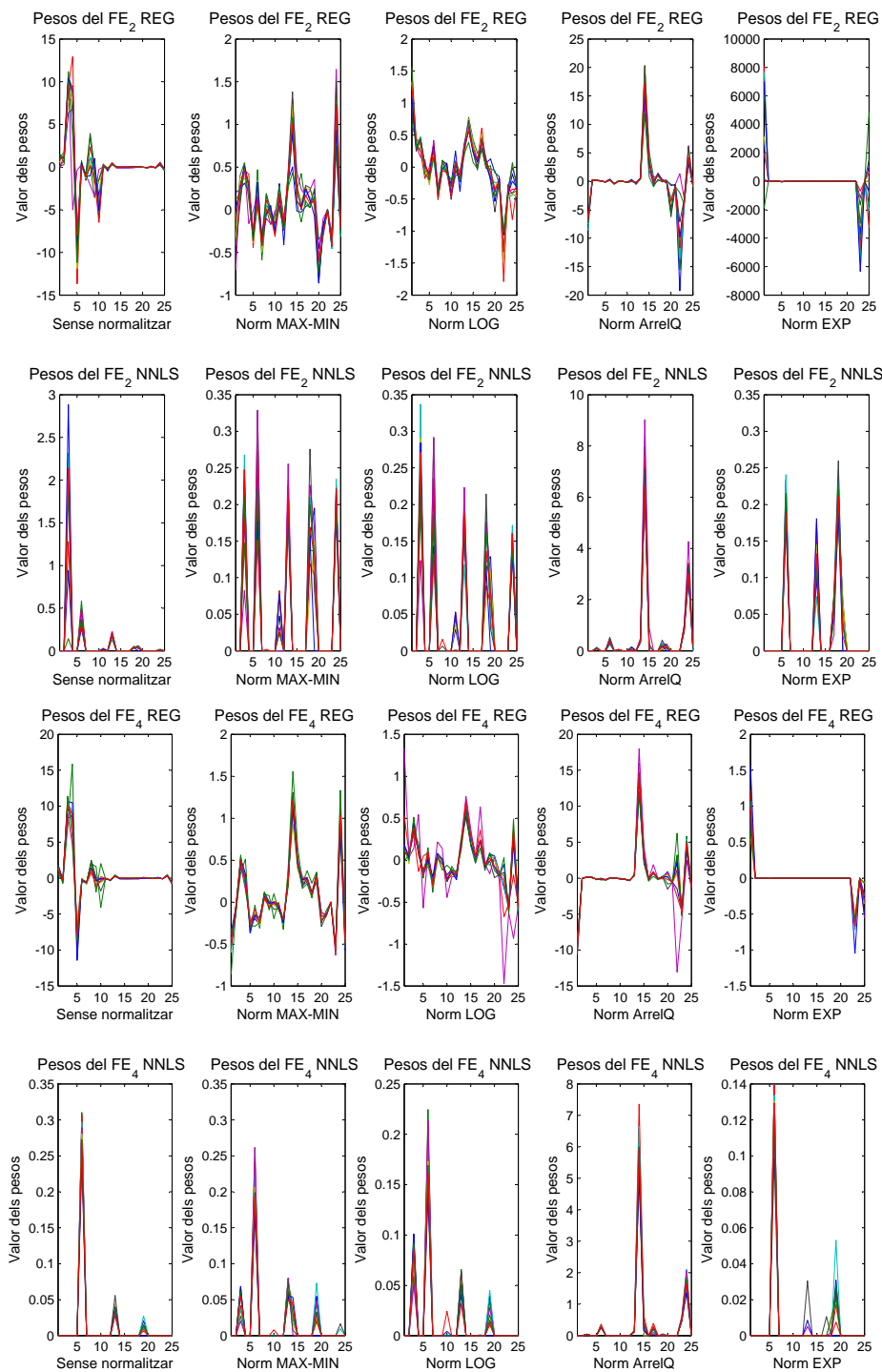


Figura 6.47: **Validació pel 10 fold cross validation:** Vectors de pesos resultants per a les proves del FE_2 i del FE_4 per a tots els vectors W del 10-fold per a les seqüències GA1. En l'eix OX es presenten els distints costos, i en l'eix OY el seu valor per a cada de les normalitzacions.

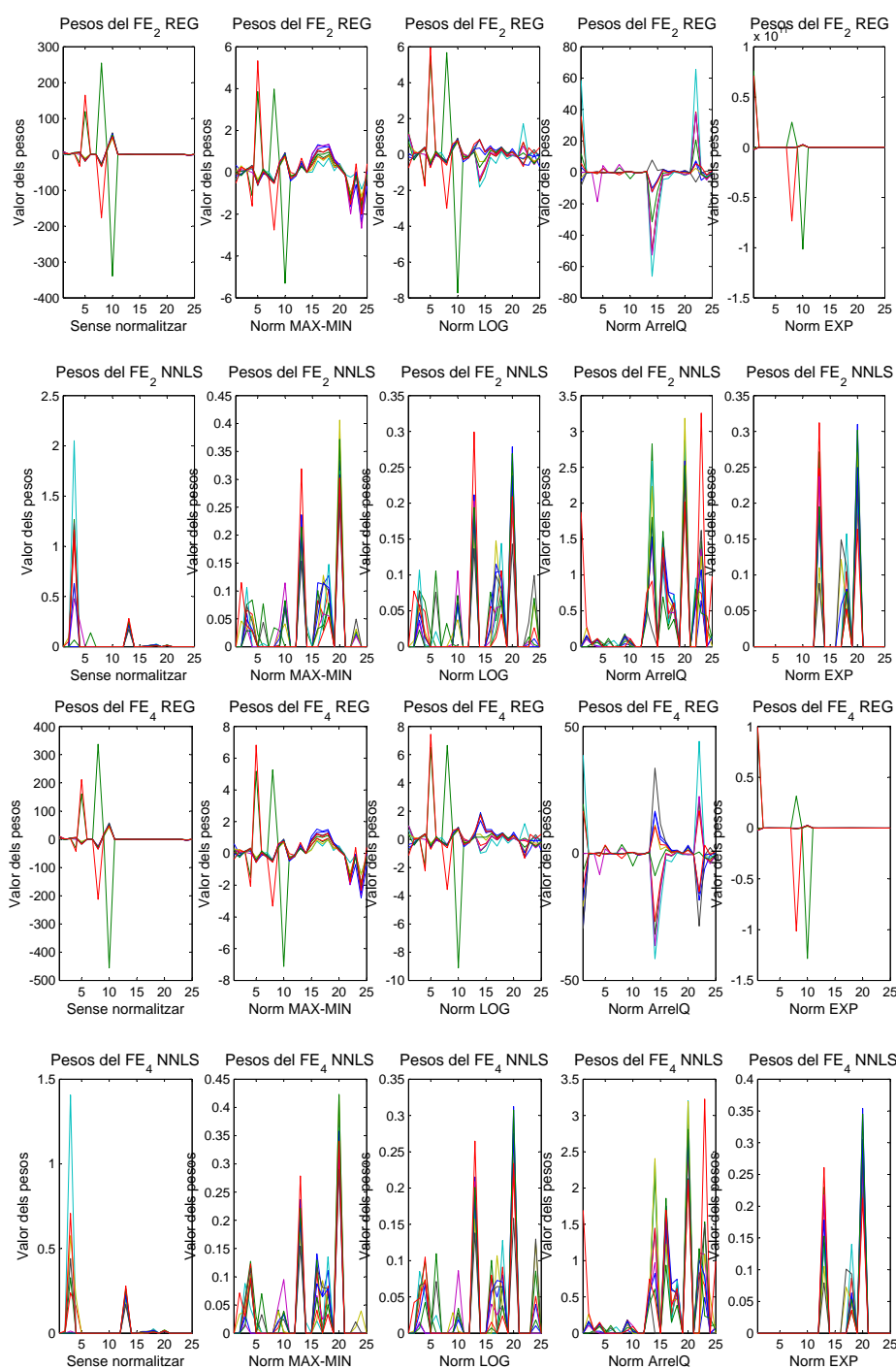


Figura 6.48: **Validació pel 10 fold cross validation:** Vectors de pesos resultants per a les proves del FE_2 i del FE_4 per a tots els vectors W del 10-fold per a les seqüències GA2. En l'eix OX es presenten els distints costos, i en l'eix OY el seu valor per a cada de les normalitzacions.

Conclusions per a futurs *fitness*

Les conclusions per al disseny de futurs *fitness* s'obtenen de l'anàlisi dels *features* corresponents al disseny de les seqüències GA1 (veure l'annex G per a més detalls); això no nega que puguin ser vàlids també per al disseny de les seqüències GA2, però els valors avaluats de correlació i de distància euclídia no ens confirmen la seva dependència en aquest estudi.

Com a conclusions per al disseny dels futurs *fitness*, caldrà tenir en compte un conjunt de pesos que en el *FE* usat per a dissenyar les seqüències GA no hi eren presents. D'una forma o altra, amb més o menys pes, han aparegut en les anàlisis la importància de la distribució de *runs*, especialment els d'ordre més baix, que són més abundants, però sense deixar de tenir en compte els d'ordre més elevat, que també tenen la seva contribució. Aquest paràmetre ha aparegut com a important en tots quatre estudis realitzats. Aquests *runs*, però ponderats pel seu ordre, també han aparegut en tots quatre estudis. En el fons s'està donant una informació molt similar en aquestes dues contribucions.

D'altra banda, s'ha observat que la correlació creuada màxima entre subseqüències és un paràmetre a tenir en compte; tan sols s'havia tingut en compte el valor de la correlació mitjana fins ara. Aquest factor apareix sobretot en les regressions usant NNLS. I finalment, un altre paràmetre que caldrà tenir present de cara a futurs dissenys és l'autocorrelació màxima (valor de pic) tant de la seqüència sencera com de la subseqüència A. Aquest detall apareix també d'una forma o altra en tots quatre estudis.

Els valors dels pesos obtinguts ens permeten dir que, a grans trets, les quatre últimes proves escollides aporten valors nous força similars a l'estudi en curs. En el cas de la regressió NNLS [LH74], aporta més claredat en la definició dels pesos importants. En el cas de la regressió REG [CH86] aporta més completitud en els resultats, hi ha molt pocs paràmetres amb contribució zero. Són aquests segons que, segons les correlacions i les distàncies euclidianes, aconseguen generar una regressió més bona, però a costa de proporcionar pesos negatius, de valor reduït i al voltant del zero. En el fons, el que succeeix amb REG és que aporta certa inestabilitat en els valors dels pesos no centrals en la discussió. En tot cas, tant si ens decantem per un mètode o l'altre, la futura funció de *fitness* per a la generació de noves seqüències GA haurà de tenir en compte els mateixos pesos avaluats: valors màxims d'autocorrelació i de correlació creuada, tant per la seqüència original com per la subseqüència A, i també la distribució de *runs*.

D'altra banda, però, ens permet afirmar que hi ha valors computats en la funció de *fitness* del GA actual que no caldrà tenir en compte. Per exemple, els valors mitjans de

l'autocorrelació de les subseqüències que no sigui la subseqüència A. Ja està clar que per a adquirir, sempre s'usarà la primera de les subseqüències, per tant, la minimització dels altres paràmetres no serà necessària. D'altra banda, en els quatre estudis anteriors s'ha pogut comprovar que no tenia cap efecte sobre el resultat. Caldria canviar, doncs, alguns pesos que no afecten el bon funcionament de les seqüències per d'altres que sí que l'afecten.

6.7 SeqGA vs. Seqüències tradicionals: comparativa de funcionament de l'estructura multiresolutiva

En aquest apartat s'estudien, per una banda, les tres millors seqüències en termes de les noves funcions d'error *FE* definides 6.6.3 (p.ex. la seqüència 18 o la seqüència 19 de les seqüències GA1, o la seqüència 1000 o 1500 de les seqüències GA2), i per altra banda, es farà un estudi del funcionament de les seqüències que en el seu moment (veure apartat 6.6.2) s'han anomenat de bon funcionament però d'empitjorament ràpid⁶.

En aquest sentit, és la última de les proves necessàries per a verificar la hipòtesi que s'ha presentat en origen (veure apartat 6.6.1). Si les noves seqüències funcionen millor de forma clara que les famílies de seqüències existents, s'hauran trobat un conjunt de seqüències més adequades per al problema que cal solucionar. Si no és així, els *features* avaluats sobre les seqüències GA1 (veure apartat 6.6.2) es plantejaran com a hipòtesi de millora en les línies de futur, però existeix la possibilitat que el funcionament sobre l'estructura de les seqüències GA2 sigui igual de bo que les seves homòlogues, o en algun cas fins i tot millor.

Els resultats de les simulacions han estat mesurats tal i com s'ha definit en el capítol 5 en l'apartat 5.10.1.

Estudi comparatiu de les millors seqüències GA

En aquest moment, es realitzarà una comparativa de funcionament de les 6 millors seqüències GA (tres per a GA1 i tres per a GA2) en termes de funcionament, i per tant, de les sis *FE* avaluades a l'apartat 6.6.3. S'ha realitzat una avaluació per a valors de SNR de -50dB fins a 0dB, i usant altra vegada els quatre escenaris definits (veure apartat 2.5.2), i amb una longitud de 600 símbols cada una de les simulacions i amb 10 repeticions per a cada prova. Dels resultats obtinguts se n'observarà especialment el % de temps que el sistema roman

⁶Cal recordar que es tractava d'unes seqüències que presentaven un bon comportament però que la probabilitat d'adquisició empitjorava per a una relació SNR més elevada, per tant, podia suportar menys SNR adverses.

adquirit correctament, el temps mig que roman adquirit, i finalment, el nombre de vegades que s'adquireix en una simulació. Les seqüències preses han estat la seqüència 5, la seqüència 18 i la seqüència 19, que pertanyien al grup de les seqüències que tenien una *evolució adequada* (veure apartat 6.6.2) en el cas de les seqüències GA1 i les seqüències 7, 1000 i 1500 en el cas de les seqüències GA2.

Comparació en termes de % d'adquisició correcte En la comparació del % de temps que el sistema roman adquirit es realitza una mesura de la posició d'adquisició que dona el sistema per a la convergència de cada un dels símbols. En funció de si la posició d'adquisició és correcta o no, s'incrementa el percentatge o es manté igual.

A la figura 6.49 s'observen els resultats per a les tres millors seqüències GA1 obtingudes (en ordre original, la seqüència 5, la seqüència 18 i la seqüència 19) i les tres millors seqüències GA2 (seqüència 7, seqüència 1000 i seqüència 1500), i les seqüències Gold [Gol68], les seqüències Walsh-Hadamard [And70, Wel74] i finalment les seqüències m [Gol67]. Cal aclarir com s'ha escollit i provat les seqüències de les famílies Gold, Walsh-Hadamard i m . S'han realitzat 10 proves per a cada figura de mèrit que es pretén mostrar, i també per a cada escenari i per a cada valor de SNR. En el cas de les seqüències Gold, Walsh-Hadamard i m , aquestes 10 proves s'han realitzat sobre seqüències diferents de la mateixa família, per tal de proporcionar més diversitat en els resultats, alhora que tenir en compte un conjunt més gran de seqüències. Després d'analitzar els 10 resultats per separat s'ha comprovat que la diferència de qualitat en les simulacions és mínima, per tant, l'avitjanament dels resultats no té una desviació gran respecte a la mitjana.

Els millors resultats en % d'adquisició els presenten les seqüències GA1-18 respectivament, seguides de la seqüència la GA2-1000, i la GA1-5 i la GA2-7, i finalment també de la seqüència m . Aquests resultats fan evident que l'autocorrelació de la seqüència és un element important.

Les pitjors seqüències en termes de % de temps d'adquisició són les seqüències Walsh-Hadamard, tal i com ja era de preveure a causa de les seves males propietats en termes d'autocorrelació. Si s'observa l'apartat 6.5.2, els valors de l'autocorrelació de les seqüències Walsh-Hadamard són molt grans, per tant, el que vol dir és que hi ha molts altres punts de l'autocorrelació que presenten màxims comparables al màxim centrat de l'autocorrelació. El que ens diu la figura 6.49 és que les seqüències Walsh-Hadamard gairebé mai s'adquireixen en el punt correcte usant l'estructura multiresolutiva, i per tant, ho fan quasi sempre en altres punts on l'autocorrelació és gran. Les penúltimes seqüències en termes de bon funcionament són les Gold, que presenten una bona adquisició especialment en els

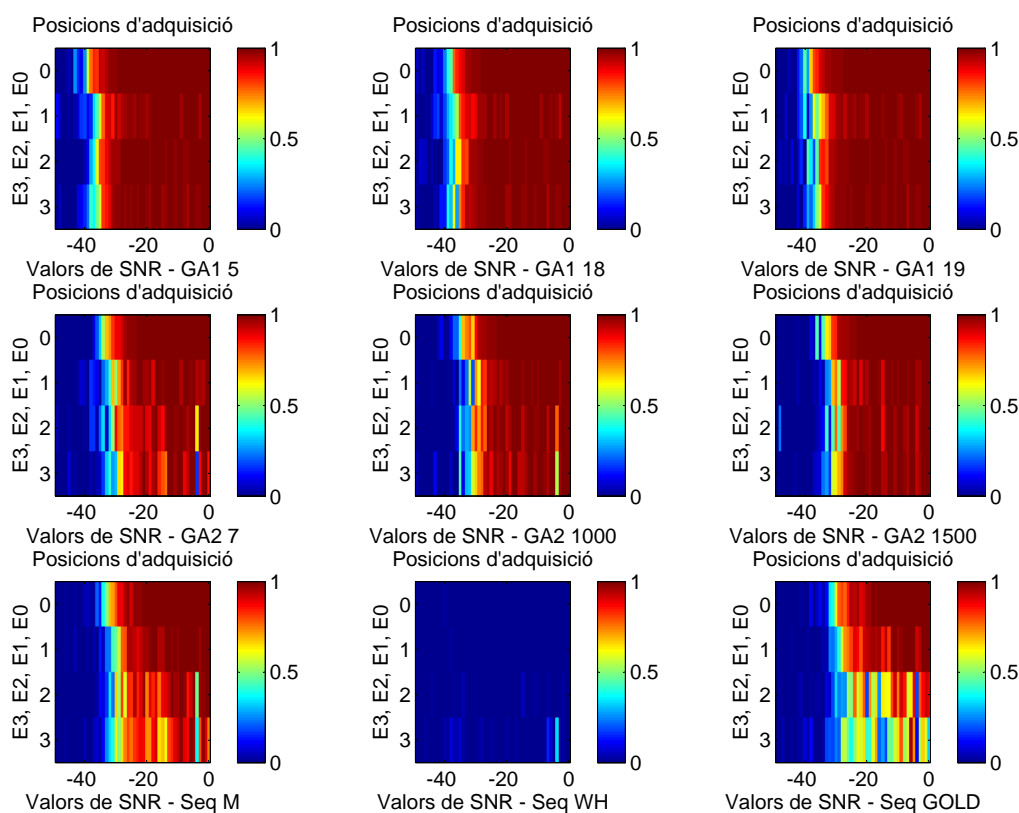


Figura 6.49: Comparació en termes de la probabilitat d'adquisició correcta de les tres millors seqüències GA1 i les tres millors GA2 en termes de *FE* (dels 6 nous *FE* - veure l'apartat 6.6.3) amb les seqüències Gold, Walsh i *m* seleccionades. En l'eix OX hi ha la SNR i a l'eix OY els escenaris.

escenaris 0 i 1. En els escenaris 2 i 3, que ja presenten unes condicions de propagació més complexes, no obtenen tant bons resultats. Cal recordar que les seqüències Gold presenten un bon l'equilibri entre la els valors de l'autocorrelació i de la correlació creuada.

Les seqüències GA, tant les GA1 com les GA2, tenen un comportament molt estable fins al voltant dels -35dB de SNR en el cas de l'escenari 0, i fins al voltant dels -30dB en els altres tres escenaris, malgrat que les GA1 tenen un comportament lleugerament millor que les GA2, probablement per la redundància que proporciona la correlació creuada de les seqüències delmades. No només es mantenen amb bon % d'adquisició fins a relacions SNR pitjors, sinó que aconseguixen estabilitzar els tres escenaris multicamí a valors similars de resultats.

Comparació en termes de temps mig que el sistema roman adquirit En el cas de la comparació dels temps mitjos que el sistema roman adquirit, els resultats són molt fidels als que s'han vist a la secció anterior (veure figura 6.50). Les pitjors seqüències en termes de temps mig d'adquisició són les Walsh-Hadamard [And70, Wel74], pel mateix motiu que ho eren en el % d'adquisició.

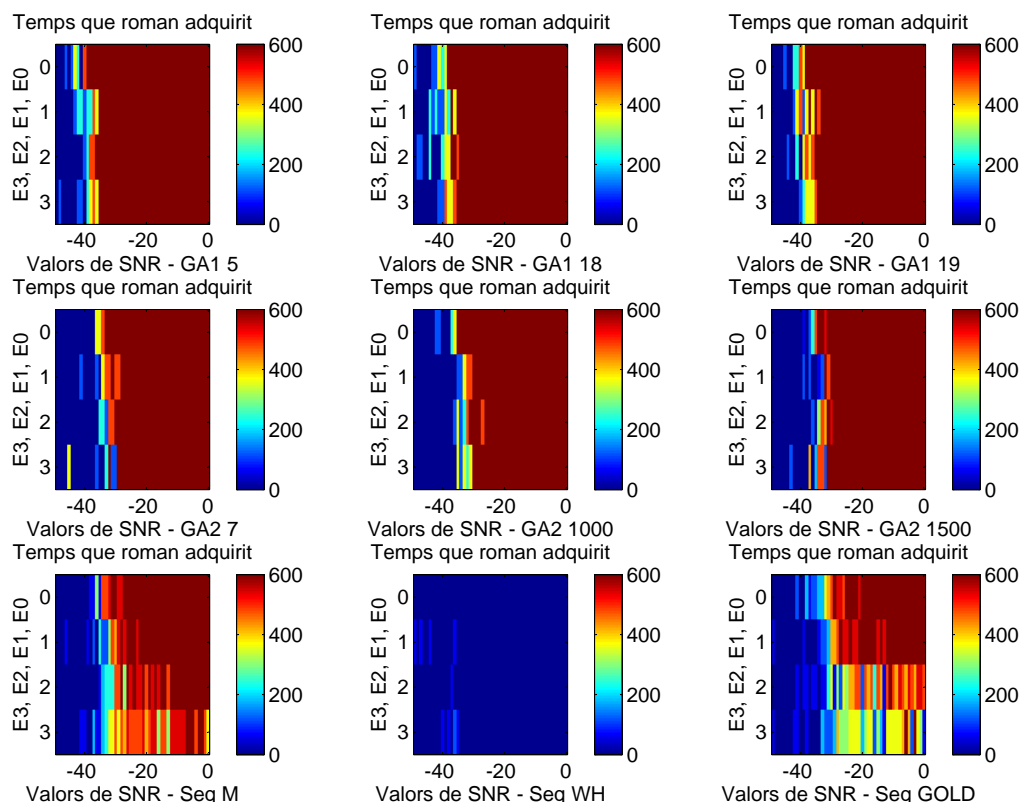


Figura 6.50: Comparació en termes de temps mig que el sistema roman adquirit de les 6 millors seqüències GA (3 seqüències de GA1 i 3 seqüències de GA2) en termes de *FE* (definit a l'apartat 6.6.3) amb les seqüències Gold, Walsh i *m* seleccionades. En l'eix OX hi ha la SNR i a l'eix OY els escenaris. El marge dinàmic de valors és de 0 a 600, i són els símbols.

Les següents seqüències en termes de temps mig són les seqüències Gold [Gol68], amb un empitjorament molt clar en l'escenari 3. Tot seguit, i mantenint millors nombres, les seqüències *m* [Gol67], també amb un lleuger decreixement dels valors màxims en l'escenari 2 i especialment en l'escenari 3. Les seqüències GA, tant les GA1 com les GA2, mantenen uns valors de temps mig que s'acosten molt al temps màxim possible fins al voltant dels -35dB, i fins als -37dB mantenen valors de temps d'adquisició bons. Malgrat això, es manté la tendència que les seqüències GA1 mantenen uns temps millors que les GA2, encara que

només lleugerament, tal i com ja s'havia destacat en el % d'adquisició correcta.

Comparació en termes d'estabilitat Finalment, es pot observar a la figura 6.51 el nombre mig de vegades que s'adquireix l'estructura multiresolutiva promitjant per totes les simulacions realitzades (cal recordar que tenen una longitud de 600 símbols cadascuna). Els pitjors resultats són per les seqüències Walsh-Hadamard [And70, Wel74], igual que amb els resultats anteriors. Les següents són les Gold [Gol68], on s'observa que a mesura que el sistema funciona de forma menys estable, hi ha vegades en què no s'adquireix i per tant, baixa la mitjana del nombre de vegades que s'adquireix.

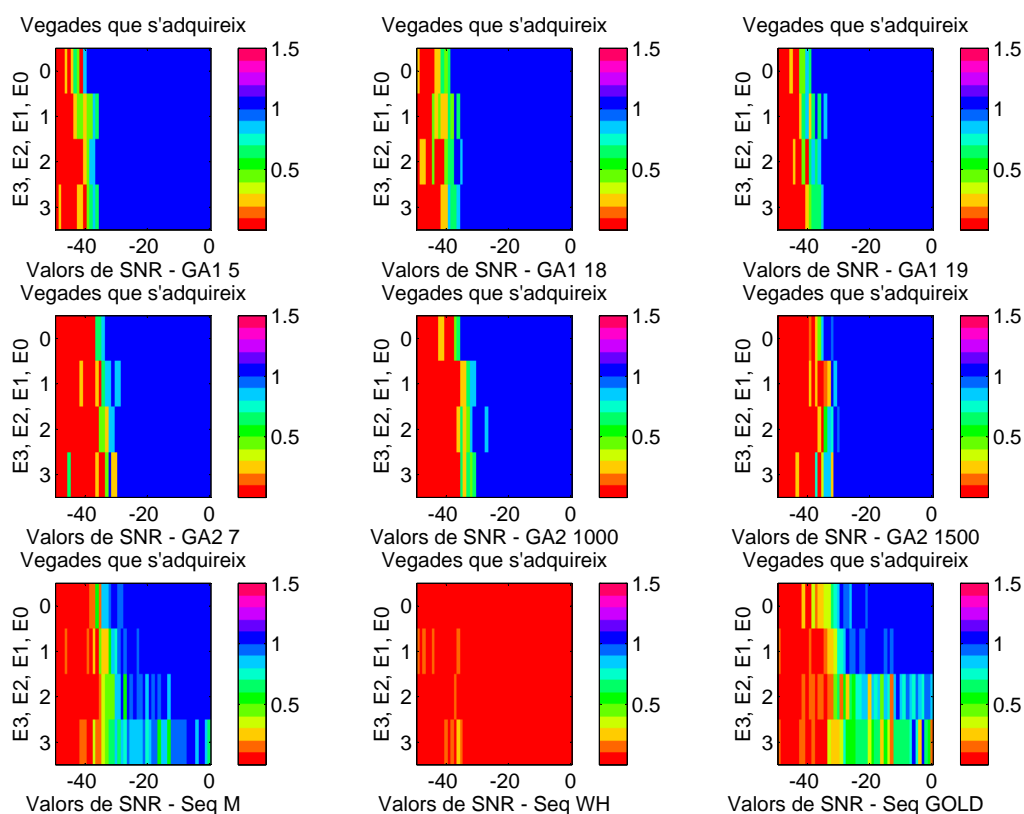


Figura 6.51: Comparació en termes de nombre mig de vegades que el sistema s'adquireix de les 6 millors seqüències GA (3 corresponents a les seqüències GA1 i 3 corresponents a les seqüències GA2) en termes de FE (definides a l'apartat 6.6.3) amb les seqüències Gold, Walsh i m . En l'eix OX hi ha la SNR i a l'eix OY els escenaris. El marge dinàmic dels valors que pot prendre està entre 0 i 1.5, i correspon al valor mig de vegades que s'adquireix en cada prova.

Les seqüències m [Gol67] funcionen millor, i els nombres es mantenen estables fins a

relacions SNR pitjors, així com també en escenaris pitjors. Altra vegada, però, les millors són les seqüències GA1, que mantenen una adquisició (una sola adquisició) fins ben bé els -37dB. Des d'aquest punt fins a -40dB aproximadament mantenen certa inestabilitat d'adquisició, malgrat tot, majoritàriament el sistema s'hi adquireix. Les seqüències GA2 presenten uns resultats similars, lleugerament empitjorats (uns -2dB). Els resultats mostrats són molt més estables que les altres famílies de seqüències en el seu comportament amb l'estructura multiresolutiva.

Estudi de les seqüències d'empitjorament ràpid (casos particulars de les seqüències GA1)

En aquest punt s'estudiaran les seqüències que s'anomenaren en el seu moment de bon comportament però d'empitjorament ràpid (definides a l'apartat 6.6.2). Evidentment, aquestes seqüències han estat objecte d'estudi també en tota la secció estadística d'aquest mateix capítol de tesi; malgrat això, el gran objectiu d'aquest estudi era veure perquè algunes seqüències presentaven mals comportaments en entorns a priori favorables; no tant veure què succeïa amb les seqüències que presentaven un comportament normal, però amb un empitjorament ràpid de les condicions. Es veurà a continuació que aquest estudi només cal realitzar-lo sobre les seqüències GA1, puix que són les úniques que presenten aquestes característiques.

Malgrat això, amb l'estudi realitzat a l'apartat 6.6.4, s'ha pogut observar que hi ha seqüències GA1 dissenyades que presenten una distribució de *runs* anormal (veure figura 6.38). Hi ha seqüències que tenen un nombre de *runs* més elevat del normal (del demanat en les condicions de les seqüències PN), que implica que amb tota probabilitat tenen més *runs* de duració més baixa. En canvi, n'hi ha d'altres que tenen un nombre de *runs* molt baix; amb tota seguretat no tenen el nombre de *runs* mínim necessari de petita longitud.

El cas més clar es pot observar a la figura 6.33. Allí s'hi pot observar que hi ha seqüències GA1 (com la seqüència 3, la seqüència 4, la seqüència 22 i d'altres), que simplement no tenen *runs* d'ordre 1; això no succeeix en cap cas amb les seqüències GA2 estudiades. Si s'observa detingudament aquestes seqüències, es pot veure que en realitat es tracta de seqüències de longitud 64, amb un nombre de mostres per xip d'inici de 2 (no disposa de cap *run* de longitud 1). És per això que en les gràfiques resultants s'observa que el seu comportament és correcte, però el seu empitjorament és ràpid. La longitud de la seqüència PN influeix en la possibilitat de minimitzar l'efecte de la SNR, i en aquest cas la possibilitat queda reduïda a la meitat. Està clar, doncs, que en el disseny dels futurs *fitness* per a la generació de seqüències PN caldrà tenir en compte la restricció del nombre de *runs* per al

bon disseny de les seqüències.

A continuació podrem observar el comportament de quatre d'aquestes seqüències amb 2 mostres per xip en el seu disseny, per a corroborar el seu bon funcionament malgrat que els % d'adquisició baixen ràpidament amb la SNR. La longitud de les proves és de 600 símbols, el marge de valors de SNR provat és de $[-50,0]$ dB de 600 símbols, i s'han realitzat 10 proves per a cada valor de SNR i escenari.

Comparació en termes de % d'adquisició correcte A la figura 6.52 s'observa el % de temps el sistema que roman adquirit. Els resultats que es presenten mostren un comportament bo en l'escenari catalogat com a més senzill, que és l'escenari 0, i un lleuger empitjorament en els escenaris més complicats, l'escenari 1, 2 i 3.

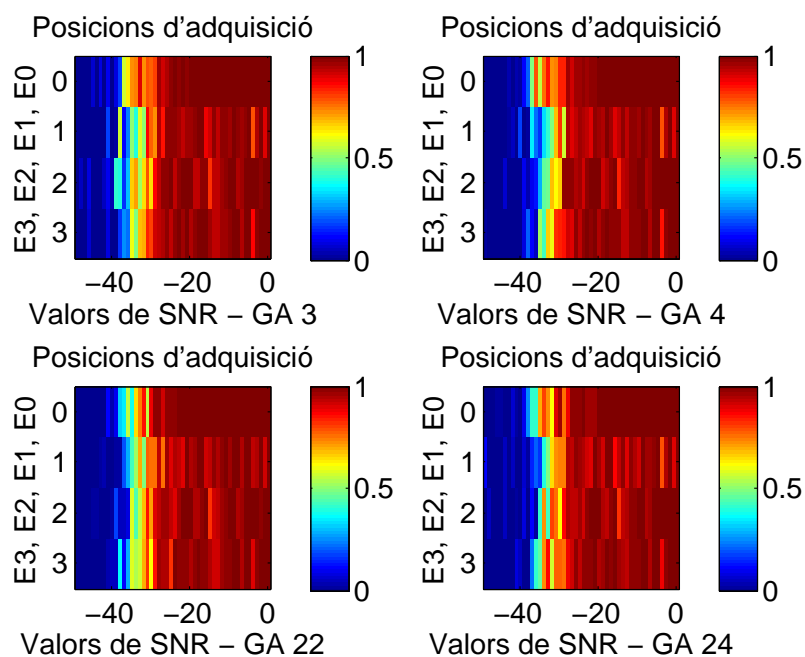


Figura 6.52: Comparació en termes de la probabilitat d'adquisició correcte de quatre seqüències GA1 amb 2 mostres per xip, seqüències definides com a *empitjorament ràpid* en l'apartat 6.6.2.

El funcionament correcte arriba fins al voltant dels -35dB en el cas de l'escenari 0 i es queda una mica abans per als escenaris 1, 2 i 3. Malgrat això, en la seqüència 4 i 22 especialment, l'escenari 1 no funciona tant be com els escenaris 2 i 3 - que és el seu comportament habitual -. Malgrat això, i comparant la figura 6.52 amb la seva homòloga 6.49 (on s'han analitzat les millors seqüències GA1 i GA2, juntament amb les seqüències

Gold, Walsh-Hadamard i m) s'observa que el davallament del bon funcionament és més gradual i comença abans en la figura 6.52. Està clar que el fet de tenir menys variabilitat en la seqüència afecta en la bondat dels resultats; una seqüència de longitud 64 té menys eixamplament que una de 128, i per tant, la recuperació en recepció és lleugerament pitjor.

Comparació en termes de temps mig que el sistema roman adquirit A la figura 6.53 s'observa el temps mig que roman adquirit el sistema amb les seqüències GA1-3, GA1-4, GA1-22 i GA1-24. S'observa que presenta un bon temps mig que roman adquirit fins al voltant de -30dB. Per sota d'aquest valor de SNR, el temps mig que es manté adquirit presenta resultats més variables, que implica certa dificultat d'adquisició alhora com menys estabilitat d'aquesta. Això és molt clar si es compara la figura actual (6.53) amb la seva homòloga (on s'han analitzat les millors seqüències GA1 i GA2, juntament amb les seqüències Gold, Walsh-Hadamard i m), la figura 6.50. Per a les seqüències de la figura 6.50 es manté amb bons temps d'adquisició fins condicions més dolentes de SNR.

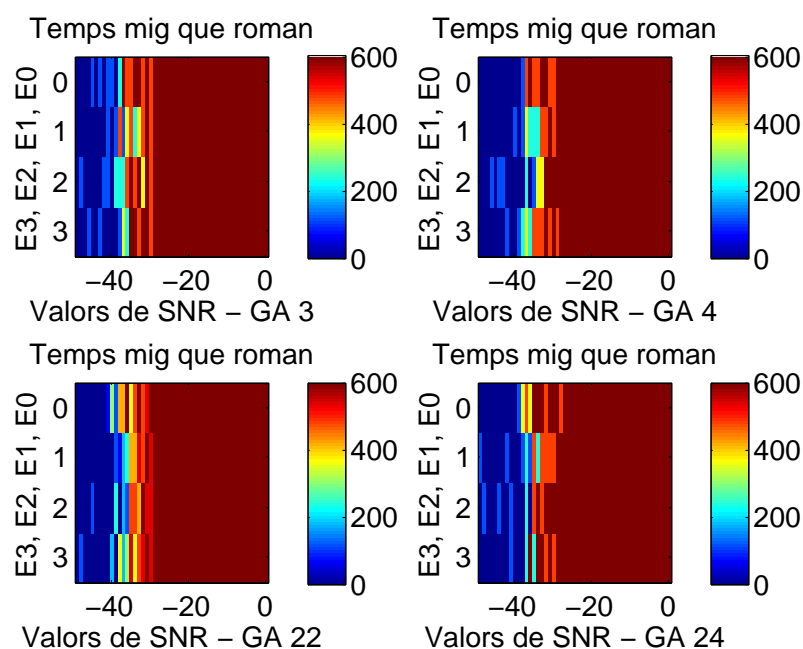


Figura 6.53: Comparació en termes de temps mig que el sistema roman adquirit per a quatre seqüències GA1 amb 2 mostres per xip seqüències definides com a *empitjorament ràpid* en l'apartat 6.6.2.

Comparació en termes d'estabilitat del sistema A la figura 6.54 es presenta la gràfica del nombre mig de vegades que el sistema s'adquireix al llarg d'una simulació de 600 símbols transmesos. S'hi observa estabilitat en una sola adquisició fins al voltant de -30dB. A partir d'aquest moment el nombre de vegades que s'adquireix baixa, i s'assumeix que per sota de SNR=-40dB de les proves llançades el sistema no ha aconseguit adquirir-se mai. Tal i com s'havia analitzat quan es parlava del % de símbols que el sistema està adquirit correctament, l'escenari 0 és privilegiat en funcionament en totes quatre seqüències, i la resta d'escenaris funcionen pitjor. La diferència és clara si comparem amb la figura 6.51 (les seqüències GA1 - 5, 18 i 19), que manté l'estabilitat fins condicions pitjors de SNR.

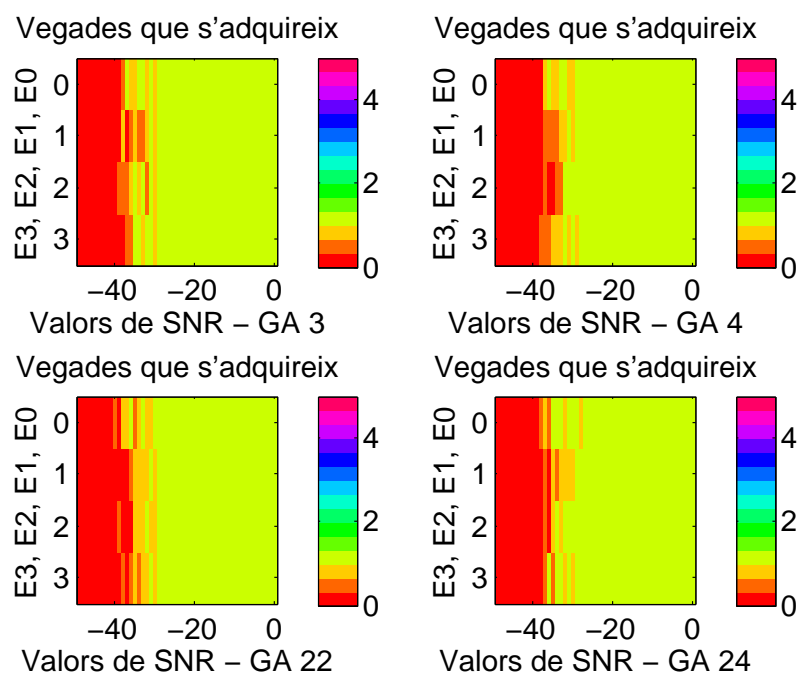


Figura 6.54: Comparació en termes de nombre mig de vegades que el sistema s'adquireix per les quatre seqüències GA1 amb 2 mostres per xip, seqüències definides com a *empitjorament ràpid* en l'apartat 6.6.2. El marge de valors que pot prendre va entre 0 i 4 adquisicions.

6.8 Conclusions

En aquest capítol s'han exposat els passos realitzats per al disseny de les seqüències GA, amb les característiques definides a l'apartat 6.2 per satisfer les particularitats de l'estructura multiresolutiva. Cal recordar que malgrat l'estudi realitzat en aquest capítol respon a una longitud de seqüència N_c i un factor de delmació M concret, l'anàlisi de paràmetres i el

disseny de l'algorisme adaptatiu per a obtenir una població de seqüències PN és aplicable a qualsevol valor de N_c i de M , sempre i quan N_c sigui múltiple de M .

En l'apartat 6.3.1 s'ha descrit la primera de les aproximacions, usant estratègies evolutives (ES), que usés només mutació, i que ja aconseguia millorar les prestacions de les seqüències en termes de *fitness*, però per seqüències més curtes i amb un factor de delmació menor. S'usà com a prova de validació, i es decidí continuar amb la recerca en aquest sentit. En l'apartat 6.3.2 es presenta la segona de les aproximacions, també amb estratègies evolutives però en aquest cas multiobjectiu, usant només mutació com en el cas anterior. En aquest cas, però, la longitud de les seqüències ja era la necessària i també el seu factor de delmació (128 la longitud de les seqüències i el factor de delmació $M = 4$). Els resultats de les seqüències dissenyades milloraven la literatura (seqüències Gold, Walsh-Hadamard i m) en termes de correlació creuada i d'autocorrelació en les seqüències delmades. D'altra banda, és normal que sigui així, perquè el disseny de les seqüències PN clàssiques no contempla la necessitat d'acomplir condicions en per a les seves versions delmades.

A l'apartat 6.4 es presenta la darrera de les propostes, amb dues funció de *fitness* millorada (GA1 i GA2), i més ajustada a les necessitats de l'estructura multiresolutiva per a tornar a aplicar en aquest cas un algorisme genètic clàssic per a generar famílies de 2, 4 o 8 seqüències o bé, simplement per generar seqüències aïllades amb bones prestacions. Les famílies de 2, 4 o 8 seqüències seran útils de cara a implementar les tècniques de *signalling* en el projecte antàrtic tal i com es detallaven en l'apartat 3.1.3. Aquestes proves queden relegades a treball futur d'aquesta tesi.

Es prengué la decisió de canviar de les estratègies evolutives als algorismes genètics perquè es comprovà que els resultats eren molt dependents de la inicialització. A més, s'havien incrementat el nombre d'objectius a assolir, i això dificultava la convergència de l'algorisme multiobjectiu. D'aquesta manera, es podia llançar l'algorisme genètic multitud de vegades, i ordenar els resultats de les seqüències obtingudes de millor a pitjor *fitness* per a la seva posterior selecció. En el cas de dissenyar una família de seqüències i no una sola seqüència, l'evolució de la família s'ha dissenyat a través d'una estratègia evolutiva, però la generació de nous membres per a la família es segueix realitzant amb el mateix algorisme genètic que si fos una sola seqüència. A més, s'han inicialitzat les famílies de seqüències GA amb els millors individus del disseny de la seqüència única.

S'ha dissenyat dos famílies de seqüències GA usant la mateixa tècnica però diferent funció de *fitness*. La funció de *fitness* per a ambdues famílies contemplava l'autocorrelació de la seqüència sencera, l'autocorrelació de les seqüències delmades, i la correlació creuada entre les seqüències delmades (en dues versions diferents). La primera de les famílies,

les seqüències GA1, seguint l'equació 6.11, deixava un grau de llibertat en $\tau = 0$ per a la correlació creuada de les versions delmades de cada seqüència, de tal manera que si l'algorisme genètic usava aquesta restricció de menys, les diferents subseqüències podien ésser molt semblants o fins i tot iguals o canviades de signe, maximitzant el valor d'aquest grau de llibertat. La segona de les famílies, les seqüències GA2, seguint l'equació 6.6 forçava una correlació creuada amb tots els seus valors, per tant, la semblança entre subseqüències no podia ésser alta en cap moment. És per això que al llarg de l'anàlisi dels resultats s'ha tingut en compte tota l'estona les dues famílies de seqüències amb els dos *fitness*, fent l'estudi comparatiu amb els dos casos.

En l'apartat 6.7 es presenten els resultats d'aquesta última proposta a nivell comparatiu amb les altres seqüències més usades de la literatura (les Gold [Gol68], les Walsh-Hadamard [And70, Wel74] i les seqüències *m* [Gol67]), i els resultats són molt bons, tant en termes de *fitness*, com si s'analiza cada una de les parts d'aquest. La comparativa de cada un dels elements del *fitness* permet corroborar els punts forts de les seqüències dissenyada respecte de la literatura. L'autocorrelació de la seqüència sencera és comparable a la de les seqüències *m*, tal i com hauria de ser per disseny. La correlació creuada entre seqüències senceres és comparable a les seqüències Gold. Com que s'està calculant la correlació (creuada i autocorrelació) mitjana i sense considerar sincronització, aquests paràmetres apareixen amb els pitjors resultats de tota la comparativa. Les seqüències GA obtenen els millors resultats en totes les anàlisis dels termes que formen la funció de *fitness*, tant les GA1 com les GA2. El que cal comprovar és si la funció de *fitness* ha estat definida d'una forma acurada; es sabrà en funció de si els resultats del funcionament de l'estructura multiresolutiva amb les noves seqüències són millors.

El primer estudi que es realitza internament a les famílies de seqüències GA és la validació de la hipòtesi inicial. És veritat que el grau de llibertat deixat a les seqüències GA1 convergeix a seqüències tals que les seves versions delmades tenen una elevada correlació creuada (quan $\tau = 0$). Després de realitzar un anàlisi seqüència per seqüència, la conclusió és que sí. Força de les seqüències analitzades tenien subseqüències exactament iguals, en algun cas amb la polaritat invertida. Aquest estudi ens permet arribar a la conclusió que el grau de llibertat s'ha aprofitat per part de l'algorisme genètic i ha portat fins a l'extrem la possibilitat de maximitzar la correlació creuada en $\tau = 0$ per a les versions delmades. Això no treu, però, que aquestes seqüències, igual que les seqüències GA2, s'hagin d'estudiar en els escenaris de simulació per tal de veure el seu comportament.

S'ha realitzat a continuació (veure apartat 6.6.2) un estudi exhaustiu de funcionament amb els escenaris definits (veure apartat 2.5.2), amb un rang de relació senyal a soroll

prou ampli, de $[-40,0]$ dB, tot avaluant el funcionament de l'estructura multiresolutiva en dos casos. En primer lloc, per les millors seqüències GA en termes de *fitness*, prenent les 48 millors seqüències. En el segon dels casos, s'ha realitzat el mateix estudi prenent un mostratge uniforme de seqüències dins del rang de valors que ha pres el *fitness*.

S'han dissenyat sis funcions d'error noves (*FE*) per tal de descriure el funcionament de l'estructura multiresolutiva amb les noves seqüències GA generades. En el disseny d'aquestes funcions s'ha tingut en compte que el seu valor sigui menor amb la SNR, o també que quan major sigui el valor de SNR i pitjor el funcionament, més alt sigui el nou valor a la funció *FE*, alhora que també depengui de en quin escenari es produeixi el funcionament. Els escenaris estan ordenats de més senzill a més complicat en termes d'adquisició, per tant, la *FE* pren valors ponderats de forma inversa amb el número d'escenari. Els resultats d'aquests 6 nous indicadors presenten una visió més fidel tant del funcionament real de l'estructura com de les seqüències, per tant, cal veure-ho com un complement a la funció de *fitness* definida en l'algorisme genètic per a la generació de seqüències.

Les dades obtingudes amb les sis funcions *FE* es tracten per tal d'obtenir-ne informació de dependència amb un llistat de costos prèviament calculats i dissenyats. La matriu de costos s'ha dissenyat tenint en compte alguns costos ja avaluats dins de la funció de *fitness* original, així com alguns de nous. Els de nova incorporació són, principalment, valors de pic de les autocorrelacions i de les correlacions creuades. En la funció de *fitness* es tenia en compte només el valor mitjà de les autocorrelacions i de les correlacions creuades i no el màxim en valor absolut. En segon lloc, els costos també avaluats són la distribució de *runs* i per tal de fer-ho fàcilment computable, el nombre de *runs* de cada longitud. Tots aquests valors s'han avaluat i introduït en una matriu de costos (*FF*, *Feature Function*). Tot seguit, i seguint el procediment d'anàlisi de regressió [CH06], s'han normalitzat les dades d'aquesta matriu *FF*. S'han usat diverses normalitzacions amb l'objectiu d'acostar la distribució de sortida a una normal per a tots els costos, tot analitzant-ne els resultats a posteriori per avaluar-ne la validesa. S'ha usat l'escalatge Max-Min, i les funcions de transformació logarítmica, d'arrel quadrada i exponencial. D'entrada i gràcies al test de Lilliefors [Lil67] se'ns diu que les millors normalitzacions són la logarítmica i la de l'arrel quadrada, però en qualsevol cas s'han realitzat validacions posteriors.

Tot seguit, s'ha realitzat una regressió amb les dades originals de les sis funcions de *FE* i la matriu de costos -usant les cinc normalitzacions-, per tal d'obtenir el vector de pesos resultant. La regressió s'ha realitzat usant dos algorismes; el de regressió multilinear [CH86] i el de *nonnegative least squares* [LH74], amb la diferència fonamental que el primer accepta les contribucions negatives dels pesos i el segon no les accepta.

Els resultats de les regressions s'han validat amb usant el procediment de validació creuada amb 10 iteracions *10-fold cross-validation* [Koh95], que ha corroborat que no hi havia sobreaprenentatge de les dades. Vist el bon funcionament de les regressions, i analitzant els resultats usant l'error quadràtic mig mínim (o distància euclídia) i el valor de la correlació, es conclou que els resultats obtinguts per a les proves realitzades sobre les seqüències GA1 són força significatives (distància euclídia petita i correlació elevada), alhora que els obtinguts en les seqüències GA2 no són gaire significatius (distància euclídia més gran i correlació petita). Cal tenir en compte que en les seqüències GA2 s'incrementa la complexitat del sistema, perquè es minva un grau de llibertat important. És possible que una regressió lineal no sigui la millor operació per tal d'extreure'n característiques (per exemple, perquè les dependències no siguin lineals, tot i que siguin dependents de forma rellevant), però en tot cas, aquesta possibilitat es deixa dins de les línies de futur.

D'altra banda a l'apèndix G s'ha observat que, per a les seqüències GA1 s'ha observat que les millors normalitzacions per a l'algorisme de regressió multilineal són la Max-Min i la logarítmica, alhora, que per el NNLS són la Max-Min i l'arrel quadrada. El millor dels algorismes de regressió en termes de distància euclídia i en termes de correlació és la regressió, però malgrat tot, el NNLS té uns bons resultats i obté uns pesos que s'han tingut en compte. Finalment, en el moment d'escollir el millor de les funcions d'error *FE* en termes de resultats, s'ha observat que tres són millors en termes de minimització de l'error quadràtic mig i els altres tres són millors en termes de correlació. Malgrat tot, les diferències que presenten en qüestió de pesos no són gaire grans.

Els pesos més importants assumint la validesa de les assumpcions del paràgraf anterior són els que els pesos ens mostren un valor més elevat, sobretot si es compara amb la resta dels pesos. L'autocorrelació mitjana, tant de la seqüència sencera com de les subseqüències, així com la correlació creuada mínima entre subseqüències, apareixen com a pesos no despreciables en la regressió, i han d'ésser tinguts en compte per a la funció de *fitness* futura. Per tant, les assumpcions realitzades per a la funció de *fitness* usada per al disseny de les seqüències GA actuals són bones (veure equacions 6.12 i 6.13), però no completes. Perquè en els pesos obtinguts en les regressions es mostra que també la distribució de *runs*, especialment mesurada amb la distància euclídia entre el nombre de *runs* de cada longitud amb el nombre de *runs* teòrics de cada longitud, mostren que és un factor important. Alhora, també mostren la seva presència els valors d'autocorrelació màxima, tant per la seqüència sencera com per les subseqüències, i de correlació creuada màxima entre subseqüències, també tenen la seva contribució, especialment en l'algorisme NNLS i per l'autocorrelació màxima de la seqüència sencera.

És per això que, com a resultat d'aquest treball de tesi, es deixa oberta la porta a la implementació, en un futur, d'un algorisme genètic amb una nova funció de *fitness*, tenint en compte els costos ja usats però també els nous que s'han obtingut com a resultat d'aquest estudi estadístic. A més, cal tenir en compte que la impossibilitat de trobar una caracterització del comportament de les seqüències GA2 no implica directament en el seu funcionament; si s'observa bé el comportament d'aquestes, es veurà que hi ha seqüències que funcionen molt correctament sobre l'estructura multiresolutiva, i que, per tant, seran usades per tal de realitzar les proves següents.

Per a concloure, s'ha realitzat una comparativa de les millors seqüències GA1 i GA2 amb una versió de seqüències Gold [Gol68], Walsh-Hadamard [And70, Wel74] i m [Gol67], i s'ha pogut comprovar que la millora de funcionament de l'estructura multiresolutiva amb les noves seqüències respecte a les escollides per comparar és molt gran. Amb les millors seqüències GA s'aconsegueix un funcionament bo per a un marge de SNR de -6 a -8dB major, i tant en termes de temps d'adquisició com d'estabilitat - nombre de vegades que s'adquireix -. Aquestes millores en termes de BER i de robustesa del sistema són molt significatives respecte a les altres famílies de seqüències, però també s'ha estudiat la seva comparativa entre les dues famílies de seqüències GA generades.

Les seqüències GA que presenten millors resultats en els tres paràmetres mesurats han estat les GA1, precisament les que plantejava la hipòtesi inicial del capítol. Les millores respecte a GA2 no són tant diferenciades com ho han estat en comparació amb les seqüències de la bibliografia, però malgrat tot, presenten resultats més favorables. La hipòtesi originàriament plantejada, sobre la diferència de funcionament de les dues funcions de *fitness* de les seqüències GA1 i GA2 (veure apartat 6.6.1) ha estat validada; el que no s'ha pogut validar encara és si aquesta hipòtesi és també certa en el cas de voler tenir en compte els diversos camins que arriben al receptor. Aquest punt de diversitat espacial es validarà al capítol 7, quan es provi l'estructura RAKE. Mentrestant, es pot afirmar que l'adquisició basada en detecció del camí de més energia, les seqüències GA1 són millors que les GA2.

Finalment, s'ha realitzat un estudi de les seqüències que havien estat anomenades d'*empitjorament ràpid*; aquestes seqüències corresponien al cas de les seqüències GA1, però quan no disposava de *runs* d'ordre 1, per tant, al cas de tenir una seqüència de longitud 64 amb un nombre de mostres per xip de 2, es perd la meitat de la resolució i de l'ample de banda. En aquestes s'ha observat que el seu comportament en l'estructura multiresolutiva donava bons resultats, però no excel·lents com és el cas de les millors seqüències. Després de realitzar-ne un estudi amb les mateixes característiques que la comparativa anterior, es pot concloure que les seqüències tenen un funcionament millor que les altres famílies

de seqüències, però que la probabilitat d'adquisició correcta de l'estructura amb aquestes seqüències empitjora al voltant de 4 dB de SNR abans que les millors seqüències. El motiu d'aquest empitjorament és que l'algorisme genètic ha trobat seqüències de longitud 128 que en realitat són seqüències de longitud 64 amb un nombre de mostres per xip de dues - amb pèrdua de resolució. En realitat, doncs, s'està perdent resolució en l'adquisició ja que la seva funció d'autocorrelació és més oberta, i és per aquest motiu que el funcionament empitjora.

7.1 Introducció

En aquest darrer capítol de contribucions es dissenya el sistema decisonal de l'estructura multiresolutiva presentada al capítol 5, usant les millors seqüències GA dissenyades en el capítol 6 i tenint en compte la diversitat de multicamí que presenten les dades obtingudes del canal.

El primer dels objectius que es persegueix és millorar el sistema de control de l'estructura multiresolutiva, que parteix d'un control per estabilitat de la proposta original de Moran [Mor01]. La lògica difusa s'ha vist com una bona solució, puix que permet dissenyar un control ajustat a partir de l'experiència del funcionament de l'estructura multiresolutiva, i per tant, el primer dels objectius d'aquest capítol és modelar amb una variable anomenada *Acquisition* el comportament del sistema. Amb un marge de valors en l'interval $[0, 1]$ proporcionarà informació sobre la validesa de l'adquisició en el sistema i també sobre la robustesa de la mateixa, quan aquesta variable serà associada a cada un dels conjunts difusos de sortida. Aquesta informació s'usarà per a reduir el cost computacional de l'algorisme d'adquisició, i alhora a proporcionar una variable que doni informació sobre la fiabilitat de la recepció.

Es provarà també la necessitat del disseny de conjunts difusos que tinguin en compte altres camins del canal en recepció, per tal de tenir una estimació més clara de quin és el comportament d'aquests altres *paths*; el cost computacional associat a l'ampliació dels blocs de lògica difusa per a que tinguin en compte el multicamí és molt gran, caldrà dis-

cutir fins a quin punt surt a compte en el sistema global. S'haurà de validar la necessitat d'ampliar el control difús en el cas de multicamí, o per contra és més eficient fer un control tenint en compte un sol camí, el principal.

Finalment en aquest capítol es realitzarà una comparació de la desmodulació amb l'estructura multiresolutiva original proposat per Moran [Mor01] (amb el seu control d'estabilitat), i també una comparativa de funcionament amb dos dels sistemes d'adquisició de referència, el proposat per Mohamed El-Tarhuni [ET97] i el proposat per Takki Yu [HYKH06].

7.2 Aproximacions prèvies a la solució en un canal amb soroll blanc gaussià

El disseny del control difús per a l'estructura multiresolutiva ha anat des de la prova de concepte en [AMS05] aplicant-ho a un sistema sèrie, fins a la seva aplicació sobre l'estructura multiresolutiva [AMS07, AMS09] on es tracta només el problema com a una estimació de l'adquisició¹. Finalment, s'ha realitzat ja una aplicació del sistema difús en un entorn variant de canal Rayleigh, usant els escenaris de simulació dissenyats a l'apartat 2.5.2, i obtenint resultats de les estimacions realitzades per al camí de màxima energia [APMSB12].

El primer dels dissenys realitzats per a obtenir una fase de control ha estat un bloc d'estimació d'adquisició en cas de tenir un canal amb relació SNR variant, assumint que és soroll blanc gaussià [AMS07, AMS09]. S'ha escollit aquest canal per tal d'imitar les fortes variacions de senyals interferents i d'esvaïments que es produeixen en el canal ionosfèric. Fou, doncs, el primer acostament a la possible solució per a canvis ràpids de SNR, que tal i com s'ha mostrat en els exemples de matriu de canal (veure apartat 2.5.4), poden esdevenir en el canal d'interès d'aquest treball.

7.2.1 L'estimador d'adquisició usant lògica difusa

L'estimador de la variable d'adquisició (*Acquisition*) usant lògica difusa [Zad65, Zad88] s'ha dissenyat usant informació de la resposta impulsional dels filtres LMS de l'estructura multiresolutiva [ABSD09, Mor01]. La sortida de l'estimador d'adquisició proporciona informació sobre la probabilitat d'estar correctament adquirits, i alhora, també proporciona

¹Cal aclarir que els resultats que es presenten d'aquestes proves prèvies no han estat realitzats sobre les seqüències GA presentades al capítol 6, puix que no estaven dissenyades encara. Han estat realitzades majoritàriament sobre seqüències Gold [Gol68], tal i com també han estat realitzades les proves reals presentades al capítol 5.

una estimació del valor de la relació SNR que hi ha al canal.

Definició de les variables d'entrada

S'han definit quatre paràmetres diferents com a entrades en l'estimador difús; tres d'ells fan referència als valors amytjanats dels quatre filtres adaptatius (anomenats $W_i^{av}[n]$) especialment del filtre que ha convergit a la seqüència delmada c_{dec} (anomenat $W_{con}^{av}[n]$) i la posició convergida s'anomena n_{max}^{adq} , i l'altre fa referència al filtre de *tracking* ($W_{tr}^{av}[n]$).

- $Ratio_1$: es calcula com el quocient entre el valor de pic del filtre LMS que ha convergit ($W_{con}^{av}[n_{max}^{adq}]$) entre la mitjana dels valors d'aquest filtre sense el valor màxim (assumint que n_{max}^{adq} és la posició del màxim en el filtre LMS):

$$Ratio_1 = \frac{W_{con}^{av}[n_{max}^{adq}]}{\frac{1}{H} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq n_{max}^{adq}}}^H W_{con}^{av}[n]} \quad (7.1)$$

on H és el nombre total de mostres dels coeficients del filtre W_{con}^{av} (veure apartat 5.3).

- $Ratio_2$: s'avalua com el quocient del valor de pic del filtre LMS que ha convergit ($W_{con}^{av}[n_{max}^{adq}]$) dividit per la mitjana del valor de la mateixa posició en els altres tres filtres que no han convergit ($W_i^{av}[n]$):

$$Ratio_2 = \frac{W_{con}^{av}[n_{max}^{adq}]}{\frac{1}{M-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq con}}^M W_i^{av}[n_{max}^{adq}]} \quad (7.2)$$

- $Ratio_3$: s'obté amb el quocient del valor de pic del filtre LMS ($W_{con}^{av}[n_{max}^{adq}]$) entre el valor mig dels tres altres filtres que no han convergit ($W_i^{av}[n]$):

$$Ratio_3 = \frac{W_{con}^{av}[n_{max}^{adq}]}{\frac{1}{M-1} \frac{1}{H-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq con}}^M \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq n_{max}^{adq}}}^H W_i^{av}[n]} \quad (7.3)$$

- $Ratio_{1trac}$: s'avalua com el quocient del valor de pic del filtre LMS de *tracking* ($W_{tr}^{av}[n_{max}^{trac}]$), assumint que n_{max}^{trac} és l'estimació més precisa del punt correcte d'adquisició, dividit pel valor mig del mateix filtre menys el màxim (considerant que n_{max}^{trac} és el màxim

del filtre de *tracking* amitjanat en mòdul $W_{tr}^{av}[n]$).

$$Ratio_{1trac} = \frac{W_{tr}^{av}[n_{max}^{trac}]}{\frac{1}{H} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq n_{max}^{trac}}}^H W_{tr}^{av}[n]} \quad (7.4)$$

Aquests paràmetres s'han escollit per la informació que contenen sobre la probabilitat de que el sistema estigui adquirit, i també perquè proporcionen informació sobre el nivell de SNR del canal i les seves variacions.

Definició de les variables de sortida

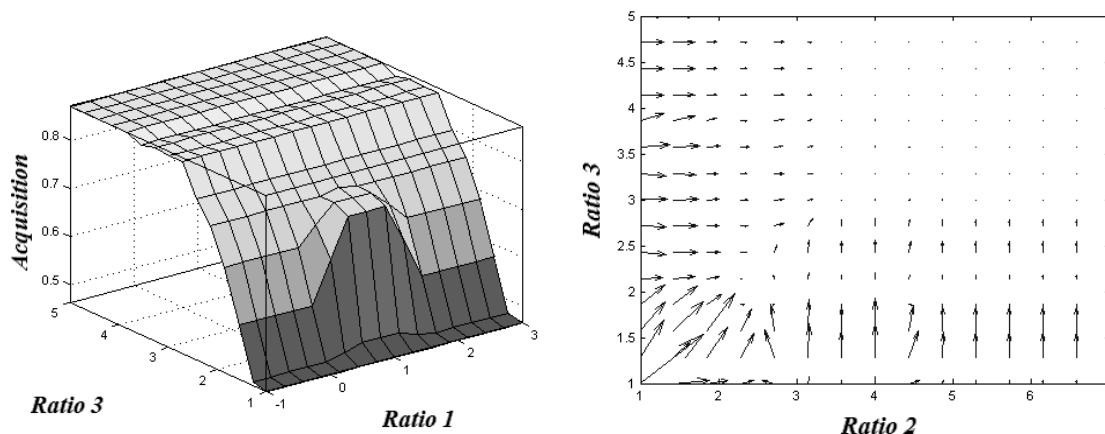
Els resultats s'obtenen usant un mètode de defuzzificació basat en el centroide [LK99]. S'avaluaran dues variables de sortida:

- *Acquisition*: dóna un valor entre [0,1], essent zero quan el sistema de sincronització està *Not Acquired* i la unitat quan està *Acquired*. S'han definit tres conjunts difusos més entre aquests dos valors; *Probably Not Acquired*, *Not Determined* i *Probably Acquired*.
- *SNR Estimation*: dóna un valor (en el marge de [-30,0]dBs en aquesta prova concreta) de l'estimació del valor de SNR del canal.

Acquisition dóna un valor de confiança de cara a la correcta desmodulació i detecció de les dades enviades. L'estructura multiresolutiva només dóna una estimació del punt d'adquisició, i el valor de la variable *Acquisition* valora la probabilitat d'estar adquirits de debò. *SNR Estimation* ens donarà informació sobre les condicions de canal; i això potencialment podrà ajudar l'adquisició i el *tracking*. Per exemple, casos com el del detector òptim [Ver98] necessiten d'una estimació de la SNR en el receptor per tal d'aproximar al màxim les condicions del senyal arribat. Disposar de l'estimació de la SNR dóna més graus de llibertat per a escollir el detector.

If-Then Rules

S'han dissenyat un total de seixanta-cinc regles per a definir els valors de les dues sortides. Aquestes regles han estat definides basant-se en l'experiència, la simulació de situacions objectiu (variacions ràpides de SNR per a emular comportaments ionosfèrics) i com es mouen els quatre ràtios que donen informació. Un cop observat els valors que prenen els diversos ràtios en les diferents situacions, especialment en aquelles que són crítiques

(a) *Acquisition* per al $Ratio_1$ i el $Ratio_3$ (b) Gràfica del gradient per a *SNR Estimation* per al $Ratio_2$ i el $Ratio_3$ Figura 7.1: Gràfiques del comportament d'*Acquisition* i de *SNR Estimation*

perquè no tots els ràtios prenen valors similars d'adquisició, caldrà discriminar quines són les regles lingüístiques que millor descriuen el comportament necessari. Les regles difuses es poden trobar a l'annex I.

A la figura 7.1.a es mostra la superfície de la variable *Acquisition* per a les entrades $Ratio_1$ i $Ratio_3$, i la figura 7.1.b es mostra el gradient per a la variable *SNR Estimation* per a les entrades $Ratio_2$ i $Ratio_3$. Es podrien mostrar les gràfiques homòlogues amb la comparació de la resta de ràtios, però bona part de la informació que s'hi mostraria és redundant respecte a la que s'ha mostrat a la figura 7.1. Les regles lingüístiques mostrades en l'annex I.2 maximitzen la relació entre el valor que prenen els ràtios, i la probabilitat d'estar correctament adquirits. Es tenen en compte les coincidències entre ràtios, però també les no coincidències entre els diversos factors dels ràtios, minimitzant la probabilitat de falsa alarma respecte a la variable *Acquisition*.

L'estimació més crítica per al paràmetre de sortida *Acquisition* és la correspondència amb l'estat *Not Determined*; això vol dir que els paràmetres d'entrada no indiquen cap evidència d'estar adquirits o no (*Acquisition* o de *Not Acquisition*). Per tal d'obtenir un valor de sortida precís, l'estimador difús avalua el grau d'implicació de cada un dels paràmetres d'entrada a les funcions de pertinença i projecta aquesta implicació als conjunts difusos de la variable de sortida *Acquisition*, per tal d'obtenir el seu valor usant defuzzificació [LK99]. El $Ratio_1$ i el $Ratio_{1\ track}$ són els millors paràmetres d'entrada per tal

d'estimar la variable *Acquisition* quan les condicions de canal són bones ja que són els que presenten una probabilitat de falsa alarma respecte a la correcta adquisició més baixa; aquests dos paràmetres reben el suport del *Ratio*₂ i del *Ratio*₃ quan les condicions empitjoren donat que aquests dos ràtios són més fiables que els dos anteriors en el cas que les condicions de canal siguin molt adverses, amb relacions SNR baixes. D'altra banda, per a la variable *SNR Estimation* les estimacions més robustes les realitzen el *Ratio*₂ i el *Ratio*₃, i es millora amb el *Ratio*_{1 track} quan la relació SNR és bona, i amb el *Ratio*₁ quan la SNR és dolenta. Aquestes dependències es mostren amb claredat en l'annex I.2, on es mostren les regles lingüístiques que mostren més claredat amb l'adquisició.

7.2.2 Resultats

En aquest apartat es presenten els resultats amb l'estimador difús presentat a l'apartat 7.2.1 [AMS07, AMS09]. S'han realitzat diverses simulacions usant un canal amb soroll blanc gaussià (AWGN), amb canvis de SNR instantanis, i s'ha analitzat la qualitat de les estimacions realitzades per part de l'estimador difús, la confiança que donen, l'estabilitat i el temps de convergència. L'estructura multiresolutiva simulada usa seqüències PN de longitud 127 (en concret, seqüències Gold [Gol68]), amb $M = 4$ branques usades per a l'adquisició i un nombre de mostres per xip de 4 també. Al no tractar-se d'un canal Rayleigh, sinó d'un canal AWGN, es fixaren els paràmetres d'ajust dels filtres adaptatius als valors inicials proposats per Moran [Mor01], de $\mu = 0.3$ i $\beta = 0.05$.

Estabilitat d'*Acquisition* vs. Control per estabilitat

L'estimador d'adquisició previ que s'usava a l'estructura multiresolutiva en el seu origen [Mor01] era el control per estabilitat (*stability control*), i tenia en compte el nombre de vegades que es repetia el mateix punt d'adquisició per part de l'estructura multiresolutiva. Aquest control per estabilitat proporcionava una resposta binària respecte al comportament del sistema: o bé la informació desmodulada era fiable (perquè el receptor estava adquirit), o bé la informació no era fiable (perquè el receptor no estava adquirit).

Tot i el seu bon comportament, que es mostra a la figura 7.2, la nova aproximació d'estimació difusa millora els resultats per un marge de valors de SNR més ampli. La qualitat de l'estimació de l'adquisició difusa és molt millor per a valors de SNR baixos en comparació amb l'*stability control*, i el seu comportament global per tot el marge de valors de SNR en el total de proves millora clarament, mai és inferior. El control per estabilitat no és un bon estimador en el cas de la relació SNR crítica (al voltant dels -15dB), i comença a degradar

la seva fiabilitat per SNR_i -15dB aproximadament. Tot i que mostra un comportament similar per els valors de SNR crítics, l'estimador de lògica difusa per a la variable *Acquisition* millora el seu comportament per a valors pitjors de SNR. La figura 7.2 s'ha avaluat tenint en compte que el control per estabilitat proporciona una sortida binària (adquirit o no adquirit) i en canvi l'estimador difús proporciona una sortida analògica, un valor del conjunt $[0, 1]$. En aquest sentit, s'ha considerat que si l'estimador difús obtenia un valor superior o igual a 0.5, estava adquirit. Aquesta decisió és coherent amb els conjunts difusos de sortida definits.

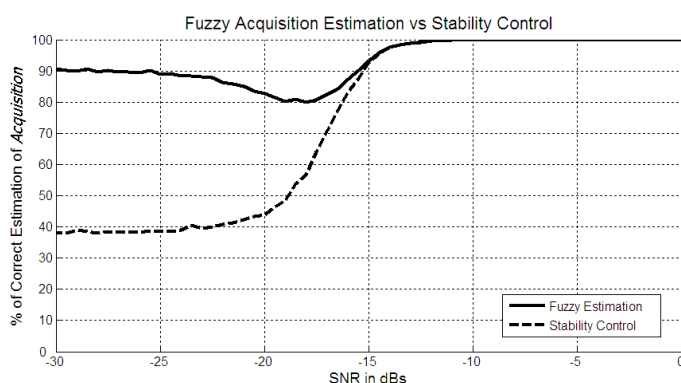


Figura 7.2: % d'estimació correcta d'*Acquisition* usant l'estimador difús i l'*Stability Control* en funció del valor de la $\text{SNR} \in [0, 30] \text{dB}$

SNR Estimation per a canals variants en el temps

A la figura 7.3.a el sistema d'adquisició s'ha simulat sobre un canal AWGN, tot forçant grans canvis ràpids de SNR. El valor mig de *SNR Estimation*, que s'obté usant un filtre *exponential smoothing*², es compara amb el valor real de SNR que existeix al canal. Com es pot observar a la figura 7.3, la SNR del canal s'estima d'una forma força acurada fins a relacions SNR molt baixes, al voltant dels -20dB, i en aquest punt els paràmetres d'entrada no són suficientment estables per a fer una bona estimació per a valors tant baixos. Per tal d'observar la capacitat de seguiment que presenta l'estimador difús en el cas que el canvi de SNR sigui molt ràpid, una ampliació del valor de la variable *SNR Estimation* es mostra a la figura 7.3.b.

²Aquest filtrat *exponential smoothing* s'hi aplica per a minimitzar l'efecte del soroll en les dades d'entrada, i així també evitar les variacions brusques del valor de SNR de sortida que responguin només a falses alarmes. D'aquesta manera, la seva fiabilitat és molt més gran. El seu valor de la β es fixa al mateix que els filtres adaptatius, $\beta = 0.05$.

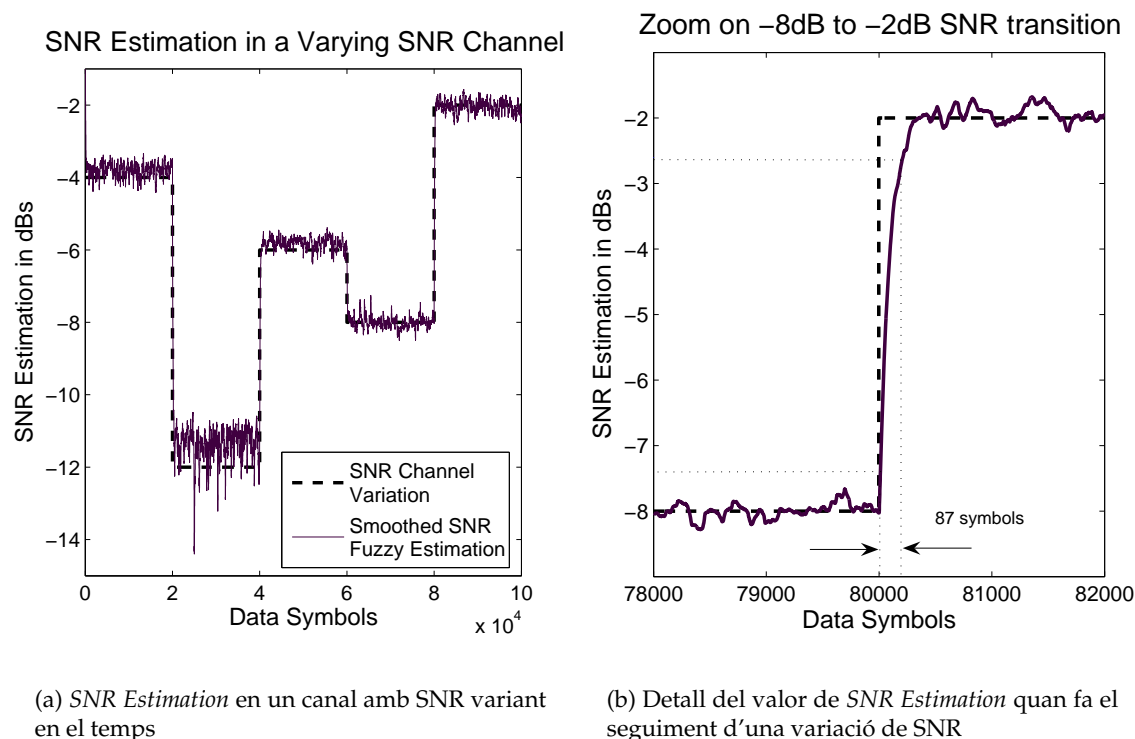


Figura 7.3: Comportament de la sortida del sistema de control difús (*SNR Estimation*) i del valor real SNR en una simulació amb 10000 símbols

7.2.3 Conclusions

Es pot concloure que el gran avantatge de l'estimador difús en l'estructura multiresolutiva en comparació amb el control per estabilitat és la seva fiabilitat quan avalua la probabilitat d'adquisició amb la variable de sortida *Acquisition*, la seva estabilitat, i el fet que convergeix tant ràpid com ho fan els filtres adaptatius després de l'*exponential smoothing* quan hi ha variacions ràpides en el canal.

El cost computacional de l'estimador és més elevat que el control per estabilitat que hi havia implementat prèviament, i això caldrà tenir-ho en compte si s'ha d'implementar en algun sistema a temps real, per tal de decidir si la seva implementació és realista en un entorn concret. Les línies de futur d'aquest treball es centren en l'ajust del sistema difús en els escenaris de simulació presentats a l'apartat 2.5.2 contemplant la necessitat de tenir en compte el multicamí. Aquesta primera proposta ha servit tan sols de prova de concepte per a validar la idoneïtat de la lògica difusa per a estimar l'adquisició de l'estructura multiresolutiva.

7.3 Ajust de l'estimador difús en un canal dispersiu en el temps

A continuació es detalla el treball realitzat per a adaptar el sistema de control difús pel control de l'estructura multiresolutiva a un entorn dispersiu en temps com el descrit per a la transmissió antàrtica (veure apartat 2.5.2). Pel disseny del control es defineixen uns ràtios semblants als descrits a l'apartat 7.2.1, per tal de saber si l'adquisició ja s'ha donat i la desmodulació pot activar-se sense problemes, així com si cal tenir en compte més d'un camí de senyal per a realitzar la desmodulació de les dades rebudes. Aquesta informació es donarà usant una variable *Acquisition*, que proporcionarà informació a la detecció sobre la qualitat de l'adquisició, de la confiança que dóna. Avaluarà, doncs, al possibilitat que l'adquisició sigui certa.

En primer lloc es realitza el disseny per al cas de tenir en compte només el camí principal [APMSB12]. Cal aclarir que aquests ajustos presentats han estat realitzats amb les millors seqüències GA presentades al capítol 6, concretament s'han pres per a exposar-ne els resultats les seqüències GA1 (concretament la seqüència GA1-18), que era una de les que presentaven millors resultats en l'estructura multiresolutiva (veure apartat 6.7). Malgrat això, les mateixes proves i ajustos han estat realitzats també per a les seqüències GA2, per tal de poder realitzar proves comparatives amb les dues famílies de seqüències en l'apartat 7.5.

7.3.1 Variables d'entrada

En aquest punt es detallen les variables d'entrada i el seu ús. S'han definit quatre paràmetres d'entrada que mesuren les mateixes dades ja vistes a l'apartat 7.2.1; tres d'ells fan referència als valors dels filtres LMS d'adquisició amittjanats en valor absolut ($W_i^{av}[n]$), en especial al filtre LMS que s'ha adquirit al punt de sincronització amb la seqüència delmatada c_{dec} (anomenat $W_{con}^{av}[n]$), i el quart fa referència al filtre de *tracking* ($W_{tr}^{av}[n]$). Els ràtios ja prèviament definits són també vàlids per a aquesta aproximació. Els ràtios defineixen el comportament dels filtres adaptatius, i la relació entre els màxims (en el cas que el filtre hagi convergit) dels filtres adaptatius esmorteïts amb l'*exponential smoothing* i el valor mitjà. És per aquest motiu que també seran útils per a mesurar el comportament en el cas del canal dispersiu i variant en temps, perquè les variacions que provoqui un canal d'aquestes característiques també s'hi veuran reflectides.

El $Ratio_1$ dóna la informació sobre la relació senyal a soroll del canal ja delmat, perquè fa un quocient entre el valor màxim i el valor mig del filtre, que ve caracteritzat per el soroll en recepció; en segon terme, també reflecteix l'autocorrelació mitjana del senyal delmat

que s'usa com a referència. Si els valors mitjos dels coeficients del filtre adaptatiu que ha convergit són grans, el $Ratio_1$ mostra un marge dinàmic ampli per a poder definir totes les funcions de pertanyença, i vol dir que l'autocorrelació per a c_{dec} no és menyspreable.

El $Ratio_2$ mostra la informació sobre la relació SNR i del *delay spread* del canal; si les dades rebudes no estan eixamplades al voltant dels xips contigus de la posició de *tracking* detectada el $Ratio_2$ presenta un bon marge dinàmic. Si per contra, sí que les dades estan eixamplades als xips del seu voltant, el valor del $Ratio_2$ empitjorarà i no contribuirà a detectar una adquisició fàcilment.

El $Ratio_3$ dóna informació sobre la SNR del receptor, i sobre la correlació creuada entre les quatre diferents versions delmades de la seqüència PN. Si la correlació creuada és alta entre les subseqüències, el $Ratio_3$ dóna resultats no discriminatoris i no ajuda a l'adquisició. En canvi, si la correlació creuada entre subseqüències és baixa, el valor del $Ratio_3$ pot ser prou clar com per definir l'adquisició si aquesta es dóna.

Finalment, el $Ratio_{1trac}$ dóna informació sobre la SNR al receptor en termes de la seqüència sencera - no de la seqüència delmada com els tres anteriors - . Es tracta d'un ràtio que presenta un resultat molt distintiu; si és bo, i el sistema està adquirit i per tant, també el *tracking* està funcionant correctament, presenta l'adquisició com a ineludible, no hi ha cap altre ràtio que tingui més fiabilitat en marcar l'adquisició.

Aquests paràmetres s'han escollit per la discriminació clara que contenen els valors que poden prendre sobre la probabilitat de tenir una adquisició correcta en relació als seus valors; el marge de valors de la seva sortida es pot dividir entre diverses funcions de pertanyença pel que fa al seu valor, amb la intenció d'ajudar l'estimació en l'estadi d'adquisició.

7.3.2 Conjunts difusos d'entrada

Un cop vistes les quatre variables d'entrada, es realitzen proves amb les 10 seqüències PN que han estat prèviament analitzades (veure apartat 6.6) per tal de millorar les prestacions de l'estructura multiresolutiva en el canal Rayleigh. S'han escollit les 10 seqüències GA1 que presenten millors valors de les funcions FE estudiades en el capítol anterior. S'observarà que hi ha força diferència de comportament en les diferents seqüències PN, i per tant, les primeres proves serviran per escollir-ne només una d'aquestes deu, la que té uns ràtios delimitats amb unes corbes més contínues i separables per trams. S'estudia la mediana i els quartils inferiors i superiors de les variables d'entrada per tal d'escollir aquesta seqüència preferida, i seguidament es defineixen les funcions de pertanyença. En aquest

punt es descriuen els conjunts difusos per a cada variable d'entrada. La definició dels conjunts difusos d'entrada amb les seves funcions de pertanyença requereix d'un estudi exhaustiu del comportament dels ràtios així com el funcionament de l'estructura amb les 10 diferents seqüències GA analitzades, per tal de veure quina optimitza el comportament de l'estructura multiresolutiva [AFSB07].

Valors dels ràtios per a cada seqüència i escenari

La família de seqüències PN usades per a provar els quatre ràtios d'entrada s'ha dissenyat usant algorismes genètics i s'ha descrit amb detall al capítol 6. A les figures 7.4, 7.5, 7.6 i 7.7 es realitza una comparativa dels quatre ràtios usant els escenaris descrits a l'apartat 2.5.2. Les proves llançades han estat de 600 símbols cada una, amb un amitjanament sobre 5 proves, i per a cada valor sencer de SNR des de -30dB a 0.

Les quatre subfigures superiors són els valors dels ràtios pel cas de tenir una situació d'adquisició. Les quatre figures de baix és el mateix però pel cas de tenir una no adquisició. Aquesta avaluació es realitza per a cada un dels ràtios i també per a cada escenari, variant el valor de SNR promig en cada simulació per a simular un entorn sorollós.

La figura 7.4 mostra una diferència molt clara entre els valors del $Ratio_1$ en el cas de l'adquisició i en el cas de la no adquisició, especialment en l'escenari 0. En els escenaris 1, 2 i 3, els valors que prenen els ràtios en el cas d'adquisició no són tant fàcilment distingibles dels que pren en el cas de no adquisició. Aquest comportament es repeteix per als quatre ràtios (figures 7.4, 7.5, 7.6 i 7.7): el primer dels escenaris és el que permet una discriminació més gran entre adquisició i no adquisició en termes dels valors dels ràtios, és el més clar per tal de detectar una adquisició.

La figura 7.5 dóna molt bons resultats per a gairebé totes les 10 seqüències PN de la família GA1. Aquestes figures mostren que el $Ratio_2$ es pot usar per a donar una estimació estable de l'adquisició. La figura 7.6 mostra un $Ratio_3$ sorollós, però tot i aquests valors inestables per al cas de la no adquisició, els valors del $Ratio_3$ en el cas d'adquisició per als escenaris 2 i 3, que són els pitjors per a totes les proves, mostren un comportament distint del cas de la no adquisició, per tant, poden ser d'utilitat per a la seva distinció. Això vol dir que el $Ratio_3$ conté informació interessant en el cas de tenir condicions de canal més desfavorables. Finalment, la figura 7.7 mostra el resultat per a $Ratio_{1trac}$; dóna els millors resultats de tot el sistema, per als quatre escenaris. Malgrat això, hi ha un inconvenient per al $Ratio_{1trac}$, i és que el sistema ha d'estar adquirit perquè aquest ràtio prengui un valor que es pugui tenir en compte. Si no està adquirit, qualsevol valor d'aquest ràtio apuntarà

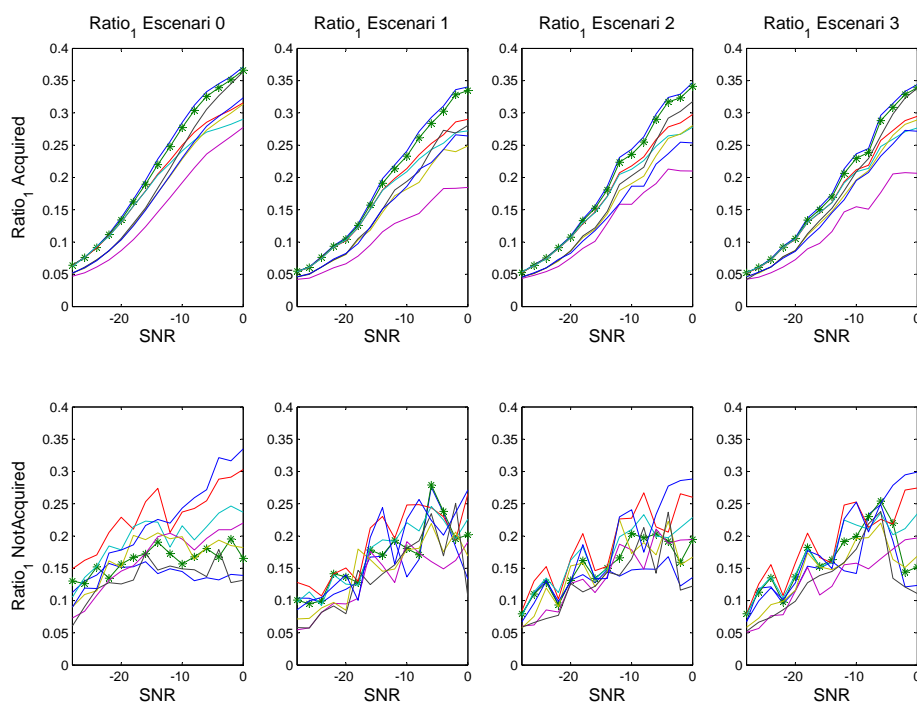


Figura 7.4: Comportament dels valors del $Ratio_1$ de les 10 seqüències GA1. Les quatre figures superiors mostren els valors del $Ratio_1$ per a cada un dels quatre escenaris en situació d'adquisició. Les quatre figures inferiors mostren els valors de $Ratio_1$ per al cas de no adquisició. En l'eix OX es mostra la SNR per a cada cas. La seqüència preferida es marca amb *.

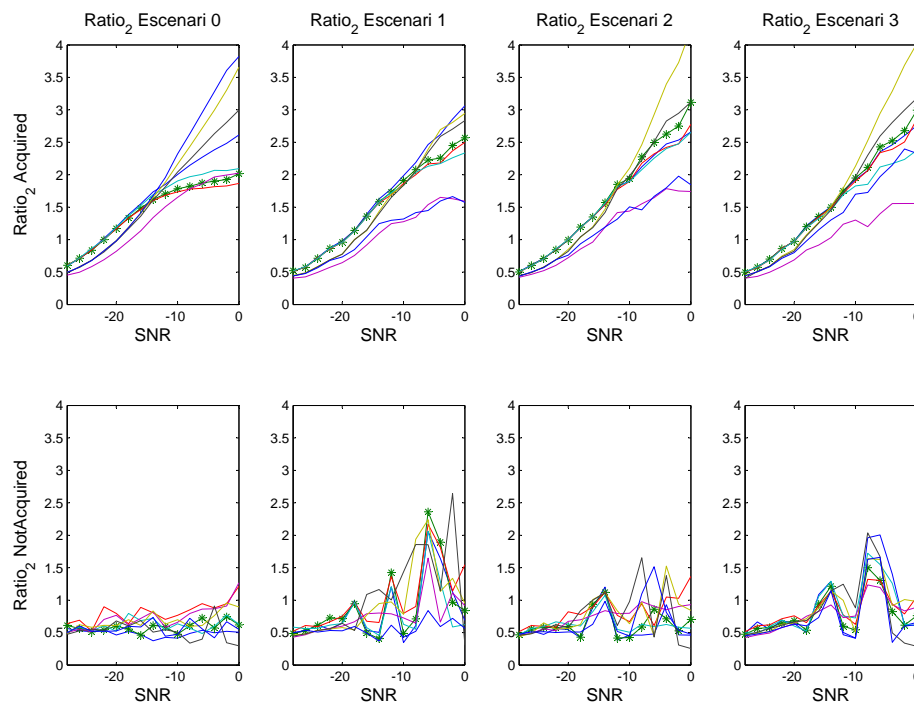


Figura 7.5: Comportament dels valors del $Ratio_2$ de les 10 seqüències GA1. Les quatre figures superiors mostren els valors del $Ratio_2$ per a cada un dels quatre escenaris en situació d'adquisició. Les quatre figures inferiors mostren els valors de $Ratio_2$ per al cas de no adquisició. En l'eix OX es mostra la SNR per a cada cas. La seqüència preferida es marca amb *.

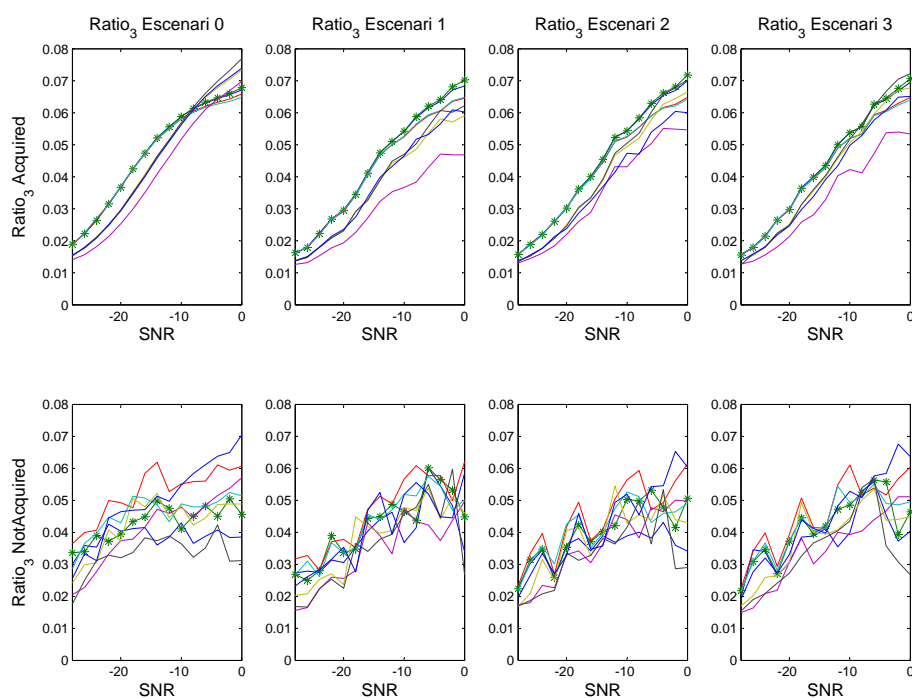


Figura 7.6: Comportament dels valors del $Ratio_3$ de les 10 seqüències GA1. Les quatre figures superiors mostren els valors del $Ratio_3$ per a cada un dels quatre escenaris en situació d'adquisició. Les quatre figures inferiors mostren els valors de $Ratio_3$ per al cas de no adquisició. En l'eix OX es mostra la SNR per a cada cas. La seqüència preferida es marca amb *.

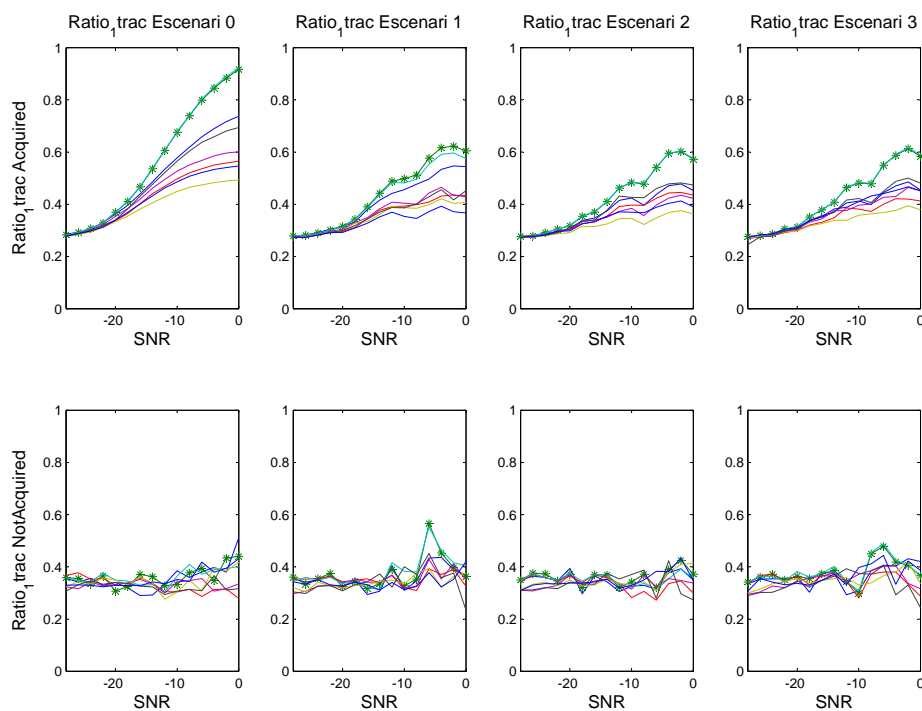


Figura 7.7: Comportament dels valors del $Ratio_{1trac}$ de les 10 seqüències GA1V. Les quatre figures superiors mostren els valors del $Ratio_{1trac}$ per a cada un dels quatre escenaris en situació d'adquisició. Les quatre figures inferiors mostren els valors de $Ratio_{1trac}$ per al cas de no adquisició. En l'eix OX es mostra la SNR per a cada cas. La seqüència preferida es marca amb *.

a la no adquisició, per això sempre s'ha de tenir en compte juntament amb algun dels altres tres ràtios.

Després d'ajuntar aquesta informació, una de les seqüències PN s'escull gràcies als bons resultats en els quatre ràtios i en els quatre escenaris. Aquesta seqüència és la que apareix puntejada en les figures (7.4, 7.5, 7.6 i 7.7). S'ha escollit perquè minimitza la distància euclidiana amb la millor seqüència en cada avaluació de cada ràtio. El criteri de decisió definitiu és la claredat amb la que es distingeix una situació d'adquisició d'una de no adquisició per a cada un dels ràtios avaluats. Quan més diferents siguin els valors que prenen els ràtios quan estan en una situació o en una altra, millor estimació de l'adquisició podran proporcionar. Si per contra, prenen valors similars en alguns trams de SNR indistintament de si el sistema està adquirit o no ho està, no permetran una bona estimació.

Seqüència escollida

La seqüència GA1 escollida no és la millor per a tots els ràtios i per a tots els escenaris en totes les SNR. Mostra els millors resultats globals, que vol dir que és menys sorollosa en el cas d'ésser comparada amb altres seqüències, i per tant, els seus valors poden ésser clarament discriminats en el cas d'adquisició o de no adquisició. En molts dels resultats prèviament mostrats aconseguix donar els millors valors, sobretot pel que fa a la discriminació entre adquisició i no adquisició. En referència a l'estudi realitzat en el capítol 6 en l'apartat 6.7, la seqüència escollida ha estat la seqüència 18 de la família GA1.

Un cop escollida la seqüència GA1 preferida, cal calcular algunes dades sobre els ràtios usant aquesta seqüència. Els ràtios es recalculen altre cop per a un conjunt de valors de SNR més ampli, per tal de donar peu a situacions de SNR pitjors, i els resultats per a l'adquisició es mostren a la figura 7.8. En aquests gràfics s'observa el moment en què l'adquisició deixa d'ésser possible per la quantitat de SNR en el canal. Aquest valor mitjà és el que prenen els ràtios en el cas de no adquisició (i per això no es mostren en aquest moment, per la poca informació que aporten).

Es calculen sobre aquests resultats les medianes, i els valors dels quartils $2n$ i $3r$ per tal de poder fixar alguns lliminars per a la definició de les funcions de pertanyença en les variables difuses d'entrada. La figura 7.9 mostra els boxplots dels valors dels $Ratio_1$, $Ratio_2$, $Ratio_3$ i $Ratio_{1trac}$ quan l'estructura està adquirida.

En la última de les figures, els valors de la mediana per als quatre ràtios simulats en els quatre escenaris i els quartils per a aquests grups també es mostren. Especialment els quartils sobre els quatre ràtios quan el sistema està adquirit es consideren claus per a la

definició de les funcions de pertanyença en el cas de la consideració d'adquisició.

Funcions de pertanyença difuses

Finalment, es defineixen les funcions de pertanyença difuses de les variables d'entrada. S'han definit quatre conjunts difusos per a cada variable; dues per la situació d'adquisició i dues per la situació de no adquisició. Només per al $Ratio_{1trac}$ s'han definit cinc conjunts difusos, tres per al cas d'adquisició i dos per al cas de no adquisició.

Pels tres primers ràtios se n'han tingut en compte només quatre perquè el sistema necessita claredat en la definició del resultat, respecte si està adquirit o no ho està. Els quatre grups tenen els noms següents (de pitjor funcionament a millor): **Not Acquired** ($NoAcq$), **Probably Not Acquired** ($\sim NoAcq$), **Probably Acquired** ($\sim Acq$) i **Acquired** (Acq).

La divisió entre **Not Acquired** i **Probably Not Acquired** s'ha fixat com la mediana per a la situació de no adquisició, i el mateix per a la diferència entre **Probably Acquired** i **Acquired**, que és la mediana del valor en situació d'adquisició. La divisió entre **Probably Not Acquired** i **Probably Acquired** es realitza assumint els valors màxims per a cada un són els 2n i 3r quartils com a límits, respectivament, de cada ràtio. Tots els intervals s'obtenen amb el valor mig dels quatre ràtios observats, i en cas de dubte, sempre es considera el pitjor cas, el cas del ràtio més petit. Alguns dels llindars per a les funcions de pertanyença segueixen la regla del pitjor cas. Les figures de les funcions de pertanyença per al $Ratio_1$, $Ratio_2$ i el $Ratio_3$ es mostren a la figura 7.10, a la 7.11 i a la 7.12 respectivament. La única diferència en el disseny es troba per al $Ratio_{1trac}$, que dona suficient informació per a afirmar que en alguns casos de valor molt elevat, a més d'estar adquirit, garanteix que ho està amb un sol camí principal, tal i com es mostra a la figura 7.13. Això s'ha pogut contrastar fent un estudi de tots els símbols que han portat el valor del $Ratio_{1trac}$ a aquesta zona, i en tots els casos, ha correspost a l'escenari 0. Es dedueix que quan hi ha un sol camí principal (com a l'escenari 0) o en el cas de tenir un sistema multicamí però amb els camins secundaris de molt poca potència, la relació entre la potència del camí principal i el soroll en el filtre de *tracking* és més elevada. En general, quan el $Ratio_{1trac}$ pren el valor **Adq-1path**, l'adquisició és molt bona i estable.

7.3.3 Variables de sortida

El paràmetre de sortida és *Acquisition*, que dona un valor en el marge de [0,1], essent zero si la situació és de **Not Acquired** i la unitat si és **Acquired**. Al mig d'aquests dos valors, hi ha dos altres conjunts difusos definits: **Probably Not Acquired** i **Probably Acquired**.

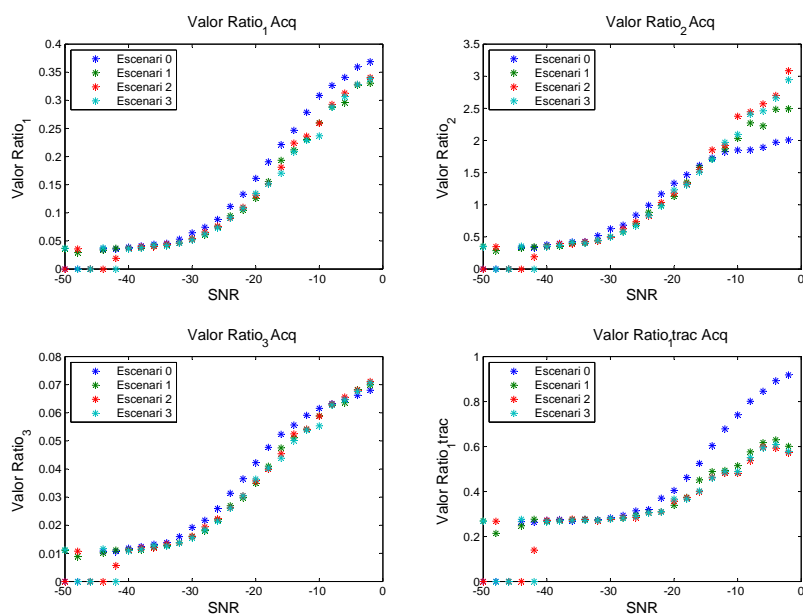


Figura 7.8: Valors per al $Ratio_1$, $Ratio_2$, $Ratio_3$ i $Ratio_{1trac}$ per a una situació d'adquisició, usant la seqüència escollida seqüència 18 de la família GA1. En l'eix OX, la SNR. En l'eix OY, el valor del ratio corresponent. Alguns dels ràtios per als pitjors valors de SNR es fixen a zero perquè el sistema no ha trobat cap mostra on el sistema estigués adquirit per el marge de valors de treball.

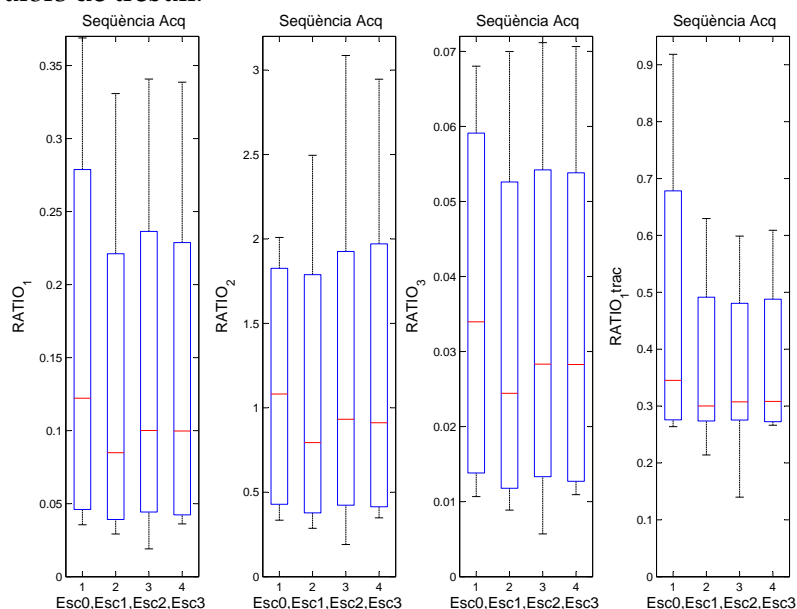


Figura 7.9: Boxplots amb les medianes i el 2n i 3r quartil per a $Ratio_1$, $Ratio_2$, $Ratio_3$ i $Ratio_{1trac}$ per a una situació d'adquisició usant la seqüència 18 del conjunt GA1

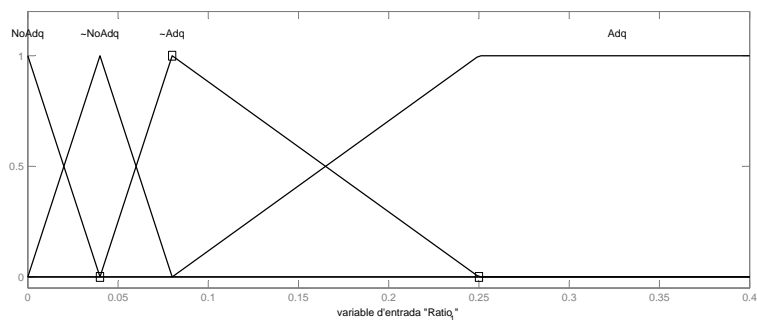


Figura 7.10: Funcions de pertinença per al $Ratio_1$

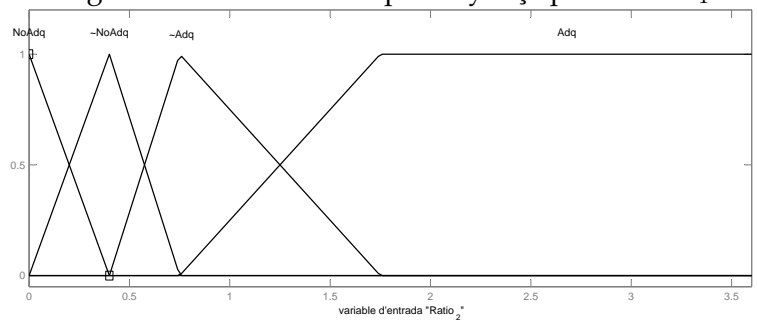


Figura 7.11: Funcions de pertinença per al $Ratio_2$

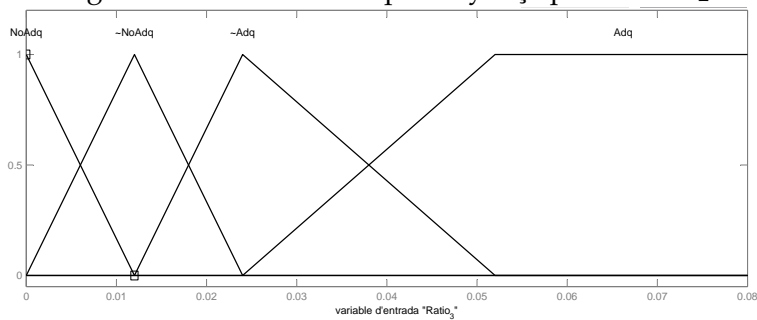


Figura 7.12: Funcions de pertinença per al $Ratio_3$

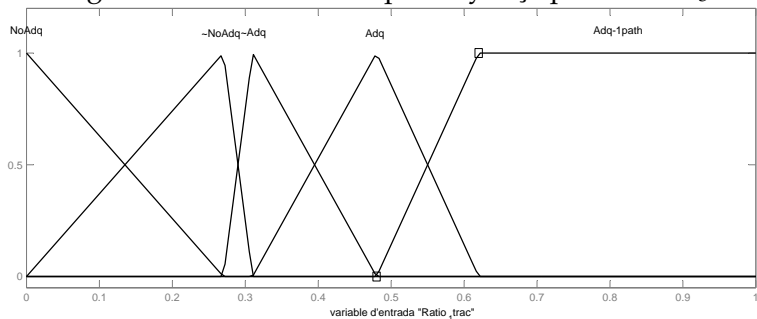


Figura 7.13: Funcions de pertinença per al $Ratio_{1trac}$

En aquest cas, a diferència de la prova presentada a l'apartat 7.2.1, no tindrà en compte l'estimació de la SNR. El motiu d'obviar aquesta sortida és perquè el detector que s'implementa en aquesta proposta de l'estructura multiresolutiva (veure apartat 5.7.2) no té necessitat d'un estimador de SNR. Per tant, es simplificarà el disseny del sistema de control difús proporcionant només una variable de sortida *Acquisition*.

El paràmetre *Acquisition* s'usa per a donar informació cap a la fase de detecció sobre la qualitat de l'estimació, la confiança que té. Cal notar que l'estructura multiresolutiva dóna una estimació del punt d'adquisició mentre la variable *Acquisition* avalua la probabilitat que el sistema estigui adquirit.

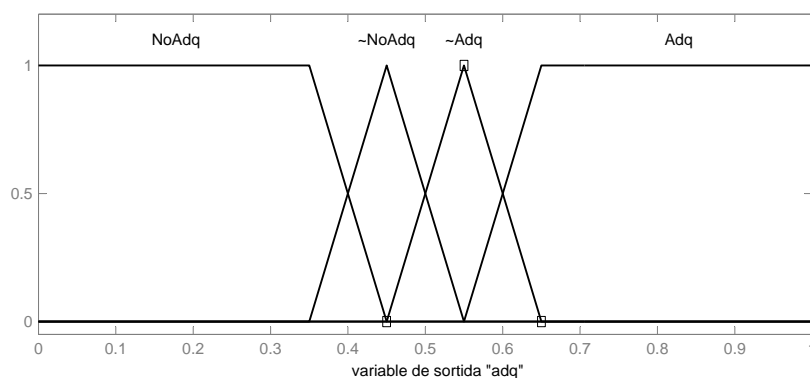


Figura 7.14: Funcions de pertanyença de la variable de sortida *Acquisition*

7.3.4 Conjunts difusos de sortida

Els valors crítics de la variable de sortida *Acquisition*, que prenen el valor al voltant de $[0.4, 0.6]$, es divideixen en dos conjunts difusos, el més baix corresponent a **Probably Not Acquired** i el més alt corresponent a **Probably Acquired**. L'objectiu del disseny dels quatre conjunts difusos de sortida és separar clarament quan el sistema d'adquisició està clarament adquirit (**Acquired**), o està clarament no adquirit (**Not Acquired**), i deixar un marge de maniobra per quan l'adquisició no està tant clara. Pels valors per sobre de 0.6 i per sota de 0.4 la variable de sortida *Acquisition* està clarament definida, essent el primer cas una adquisició clara i el segon cas, una no adquisició clara també.

Els marges de treball per a l'adquisició clara i la no adquisició no clara són majors que no pas els conjunts crítics; la diversitat de valors dels distints ràtios permet marcar l'adquisició de forma clara tant si és només un que la marca, com si són tots els ràtios que parlen de la mateixa estimació. En funció de si hi ha més o menys ràtios que marquen

adquisició o no adquisició, el valor de la variable *Acquisition* serà més proper a 1 o a 0.

Si la variable de sortida obté un valor crític és com a resultat d'una adquisició no clara, i el sistema desicional no té certesa sobre la confiança i la robustesa dels resultats. El que es realitza és incrementar el temps d'avaluació, d'aquesta manera s'aclareix la definició d'aquests dos conjunts difusos. Es defineixen dos conjunts difusos associats a una adquisició confusa perquè en realitat, malgrat que els indicis no siguin del tot clars per a marcar una adquisició o una no adquisició, l'avaluació dels quatre ràtios dóna informació suficient per posicionar la variable de sortida més cap a l'adquirit (**Probably Acquired**) o cap al no adquirint (**Probably Not Acquired**).

Regles difuses

Les regles difuses s'han definit per a obtenir el millor comportament en termes de qualitat de l'estimació de la variable de sortida *Acquisition* de l'estimador difús. Dos exemples de dependència entre les variables gràcies a les regles difuses es mostren a la figura 7.15, on es mostra la dependència entre *Acquisition* i el *Ratio*₁ i el *Ratio*_{1trac}, alhora que el *Ratio*₂ i el *Ratio*₃. Per a més detall sobre la definició de regles difuses, consultar l'apèndix I.

L'estimació més crítica per a la sortida *Acquisition* correspon a **Probably Not Acquired** i també a **Probably Acquired**. Això vol dir que els paràmetres d'entrada tenen valors no coherents per a sortides **Acquired** i **Not Acquired**. Per tal d'obtenir un valor de sortida precís, l'estimador difús avalua el grau d'implicació per a cada paràmetre d'entrada a les funcions de pertinença de les variables d'entrada i projecta aquesta implicació als conjunts difusos de la variable de sortida *Acquisition*, per tal d'obtenir el seu valor final usant defuzzificació.

7.3.5 Proves i resultats per a un sol camí principal

A continuació es mostren els resultats de les proves realitzades amb l'estimador difús dissenyat. En aquest apartat s'han tingut en compte només els càlculs realitzats sobre el camí principal, obviant els altres camins en el cas que existeixin (com en els escenaris 1, 2 i 3, que és sabut que existeixen més d'un camí, però només se n'ha tingut en compte el camí de més potència).

En primer lloc, es mostra l'avaluació del comportament del sistema difús, avaluant la confiança de l'estimació en la variable de sortida *Acquisition* i comparant els resultats amb la realitat del receptor a cada temps de simulació. La segona de les avaluacions fa

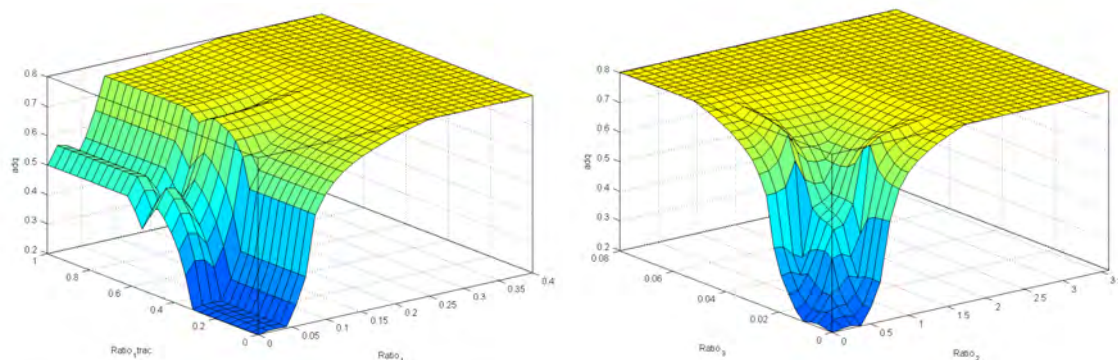
(a) *Acquisition* en funció del $Ratio_1$ i del $Ratio_{1trac}$ (b) *Acquisition* en funció del $Ratio_2$ i del $Ratio_3$

Figura 7.15: Dos exemples de la variació de la sortida *Acquisition* per a tot el marge de valors de dos ràtios.

referència a l'estudi de tota l'estructura multiresolutiva i el seu comportament. Els resultats per a l'estructura multiresolutiva es comparen amb l'estructura multiresolutiva original i el seu control d'estabilitat [Mor01].

Les proves s'han realitzat usant els quatre escenaris descrits a l'apartat 2.5.2; en totes les simulacions s'usa la mateixa seqüència PN de 128 xips (en aquest cas concret, la seqüència 18 del GA1), obtinguda a través de l'algorisme genètic ja detallat a l'apartat 6.4.1. En cada una de les proves, per a una certa SNR i un cert escenari, es realitza una simulació de transmissió de 600 símbols de dades, i s'han realitzat deu repeticions d'aquestes proves per tal de provar diferents inicialitzacions del canal. Els resultats que es presenten són la mitjana de totes aquestes proves.

Avaluació del comportament del sistema d'estimació difús

En l'avaluació del comportament del sistema d'estimació s'han realitzat 3 mesures. La primera és el % d'estimacions d'adquisició correctes, comparant el resultat de la variable *Acquisition* amb la mesura a posteriori de la probabilitat d'estar adquirit en un moment determinat, és a dir, amb l'estat real de l'estructura. Tal i com ja s'havia mesurat tant en el capítol 5 i el capítol 6, es fa la diferència entre la posició d'adquisició estimada i la real. La segona és el % d'adquisicions incorrectament estimades, però tenint en compte només les errades optimistes; això vol dir que s'ha avaluat l'estimació difusa positivament, ha obtingut un valor corresponent a adquirit (la sortida *Acquisition* té un valor per sobre

de 0.5), i que en realitat no ho estava³. La última és el % d'estimacions incorrectes de l'adquisició però des d'un punt de vista pessimista, és a dir, que el sistema d'estimació diu que no està adquirit (la sortida *Acquisition* té un valor per sota de 0.5) i en realitat sí que ho està.

En la figura 7.16 es mostren aquestes mesures per cada escenari i valor de SNR $\in [-50, 0]$ dB. Tal i com es mostra a 7.16.a, el % d'estimacions correctes dóna bons valors, prop del 100% en molts casos excepte en el rang de SNR de $[-42, -35]$ dB, on tots quatre escenaris presenten valors d'encert al voltant del 20%. Això succeeix a causa d'aquest valor llindar de SNR, on els ràtios efectuen avaluacions confuses per l'elevat nivell de soroll. Però aquest fet és acotat, perquè a mesura que la SNR empitjora els ràtios fan que el sistema difús convergeixi a una avaluació correcta, malgrat que força avaluacions siguin per a **Not Acquired** en aquest cas.

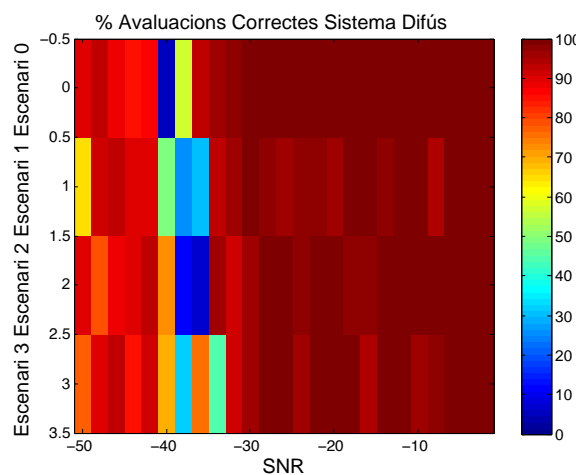
Les avaluacions errònies es mostren a les figures 7.16.b i 7.16.c. Aquestes figures mostren que la majoria de les avaluacions incorrectes succeeixen quan l'estimador dóna com a resultat un no adquirit quan realitat el sistema està adquirit (errades pessimistes). També mostra que les estimacions incorrectes *optimistes* es donen en menys probabilitat que les *pessimistes*, donant valors al voltant del 5%. Aquests resultats són els majors indicadors de la robustesa del sistema.

Comparació entre el control de l'estructura multiresolutiva amb estimació difusa vs. l'estructura multiresolutiva original [Mor01]

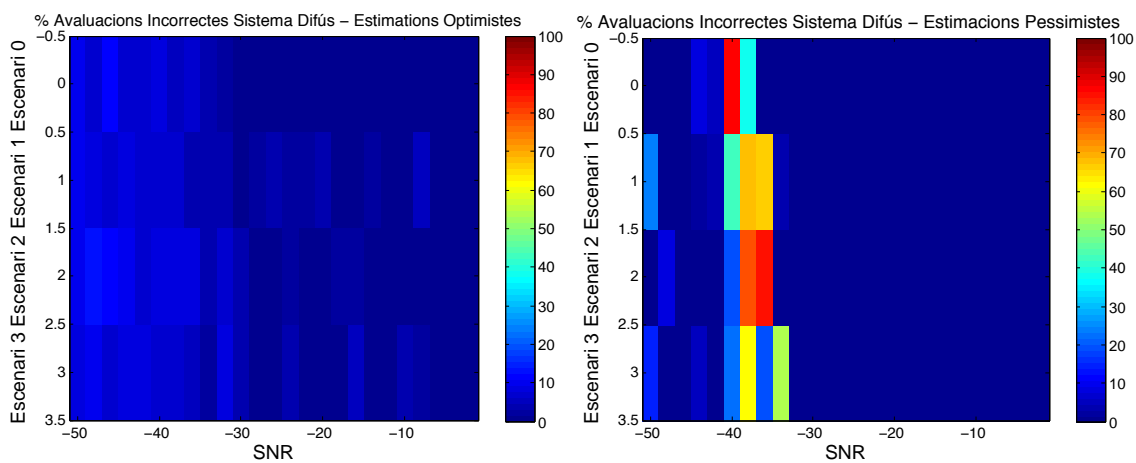
L'avaluació d'aquestes dues estructures es basa en la comparativa de la sortida *Acquisition* en el cas de l'estimador difús amb l'estructura multiresolutiva millorada presentada en aquest treball i el control per estabilitat en el cas de l'estructura multiresolutiva original [Mor01], usant les mateixes condicions de canal en tots dos casos. En les proves realitzades, el valor del control no està afectant el funcionament de l'estructura multiresolutiva. S'hi mesura tan sols la bona estimació del control.

En la realització d'aquesta comparativa també és just tenir en compte el cost computacional de cada un dels sistemes de control. Una breu comparativa entre el sistema d'estabilitat de l'estructura original de Moran [Mor01] i el control difús de la nova proposta Ralsina

³Es parla en aquest apartat d'errors optimistes i d'errors pessimistes. En el primer dels casos es refereix a un error comès quan el sistema afirma que està adquirit i en realitat no ho està. El segon dels casos és just al revés, quan el sistema diu que no està adquirit i sí que ho està. En la bibliografia [YKH06, YCH08] es parla d'aquests errors com *in-phase false alarm* pel cas que el sistema comuniqui que està adquirit i no ho estigui, i com a *out-of-phase false alarm* pel cas contrari - que digui que no està adquirit i que en realitat ho estigui.



(a) % d'avaluacions correctes de l'estimador difús



(b) % d'avaluacions incorrectes de l'estimador difús - Errors *optimistes*

(c) % d'avaluacions incorrectes de l'estimador difús - Errors *pessimistes*

Figura 7.16: Comportament de l'estimador difús. Mesures sobre la correctesa de les avaluacions per als 4 escenaris i el marge de valors de SNR $\in [-50, 0]$ dB.

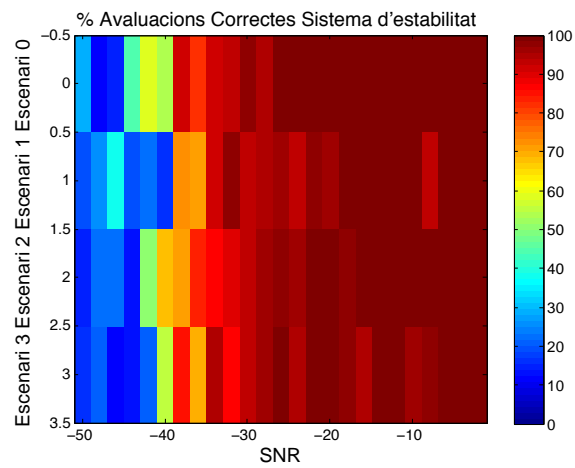
es mostra a la taula J.1 de l'apèndix J. En aquest sentit, el control difús és més costós, més de tres vegades el cost del control per estabilitat, però a continuació es mostrarà que la millora dels resultats que presenta fa que se n'assumeixi el cost.

El control per estabilitat per a l'estructura multiresolutiva [Mor01] L'estructura multiresolutiva presentada per [Mor01] treballa amb un control per estabilitat. Aquest control es basa en la robustesa de la convergència del filtre (veure apartat 4.2). El control per estabilitat dóna una sortida **Acquired** si el filtre adaptatiu presenta els mateixos resultats durant un determinat nombre de vegades seguides (en aquest cas, es fixa el valor a tres vegades seguides, tal i com es mostra a [Mor01]). En el treball [Mor01] es mostra que la probabilitat d'estar correctament adquirit incrementa a mesura que la posició d'adquisició és més estable, i el control per estabilitat es basa en aquest principi. Els problemes de funcionament d'aquest tipus de control són la manca de robustesa en cas de tenir un entorn amb SNR molt variant, amb interferència i esvaïment de senyal, i alhora, també amb multicamí, perquè no es pot reconèixer una adquisició correcta immediatament, sinó que cal esperar almenys els tres símbols necessaris per a acomplir el sistema de control. Fou dissenyat per a millorar l'estabilitat, per tant, es manté **Not Acquired** fins que la posició d'adquisició no sigui estable de nou.

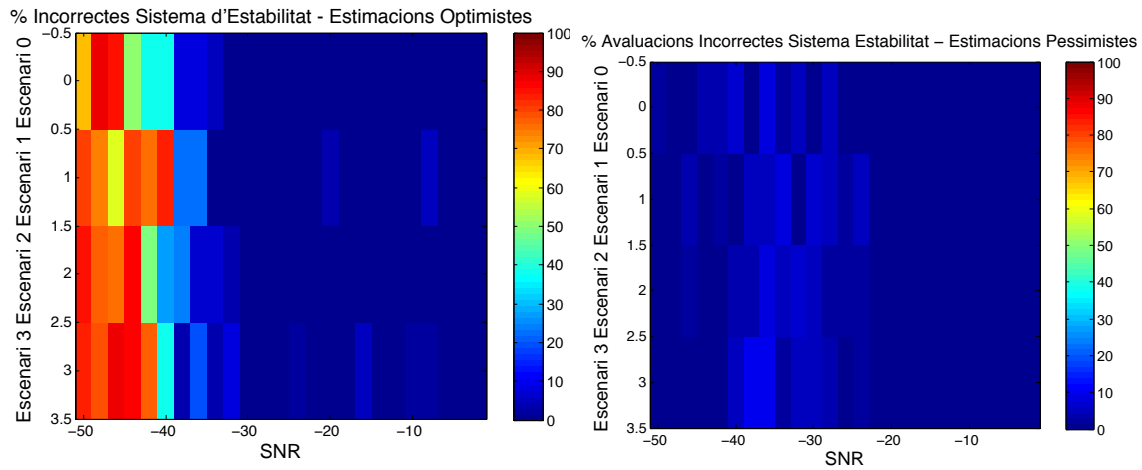
Aquesta manca de robustesa es soluciona amb el disseny del sistema d'estimació difús, perquè la seva estimació usa diversos paràmetres instantanis, per tant la readquisició és més ràpida; el fet de confiar en quatre paràmetres diferents assegura la robustesa del sistema, tot i que puguin haver-hi situacions de no convergència per als filtres LMS.

Els resultats per al control d'estabilitat es mostren a les figures 7.17. La figura 7.17.a mostra el % d'avaluacions correctes del control per estabilitat, i les figures 7.17.b i 7.17.c mostren el funcionament incorrecte del sistema, en el primer cas per errors *optimistes* i en el segon dels casos per errors *pessimistes*. La figura 7.17.b denota un error optimista molt alt per $SNR_i - 40dB$, que fa que l'estructura assumeixi adquisició quan no ho està en realitat. Aquest fet incrementa la BER al receptor en termes de confiança en la desmodulació de la informació. Cal fer notar que quan empitjora el comportament del % d'adquisició correcte del control per estabilitat per a valors de $SNR < -38dB$, millora el % d'estimació incorrecte *pessimista*.

Resultats comparatius En aquest punt es realitza un anàlisi comparatiu dels resultats dels controls difús i d'estabilitat. Es calculen els resultats numèrics per als quatre escenaris, i la mitjana d'aquests resultats es mostra per a comparar els dos sistemes.



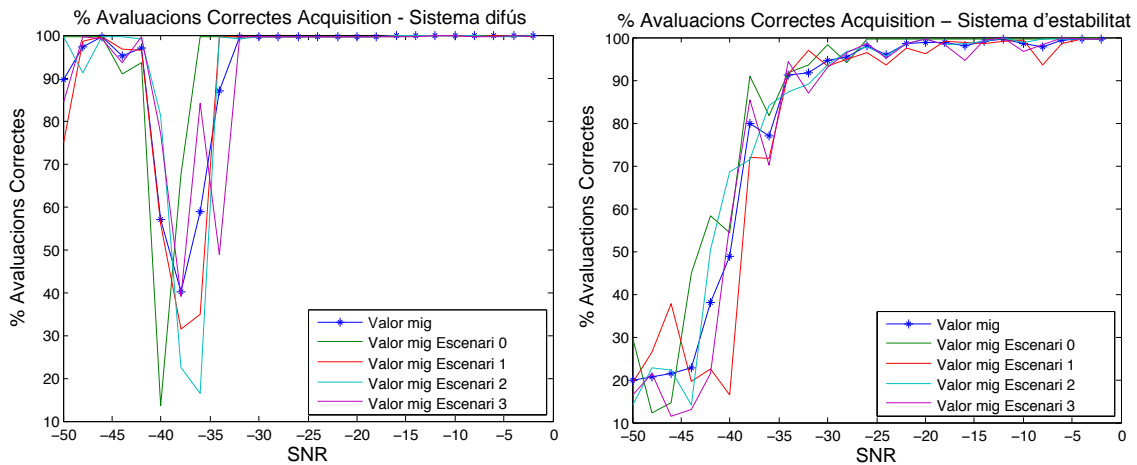
(a) % d'avaluacions correctes del control per estabilitat



(b) % d'avaluacions incorrectes del control d'estabilitat - errors *optimistes*

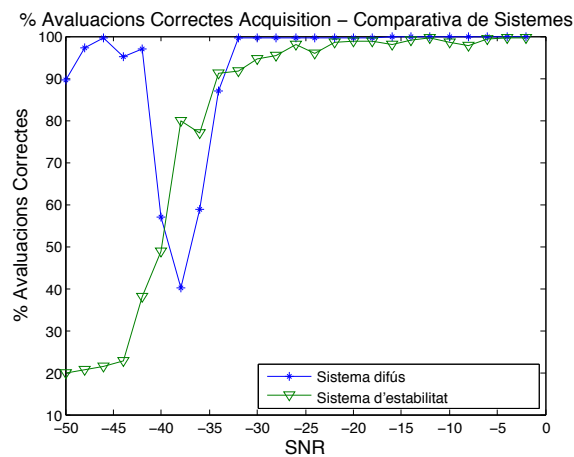
(c) % d'avaluacions incorrectes del control d'estabilitat - errors *pessimistes*

Figura 7.17: Funcionament del control per estabilitat. Mesures sobre les avaluacions correctes i les incorrectes.



(a) % d'avaluacions correctes de l'estimador difús

(b) % d'avaluacions correctes del control per estabilitat



(c) Comparativa de les avaluacions correctes per l'estimador difús i el control per estabilitat

Figura 7.18: Comparativa de les avaluacions correctes per l'estimador difús i el control per estabilitat. Es presenten els resultats amitjanats per a 5 proves per a cada SNR i per a cada escenari. En l'eix OX, la SNR i en l'eix OY EL % d'adquisicions correctes.

En la figura 7.18 es realitza l'anàlisi del funcionament de l'estimació correcta per a tots dos controls (figura 7.18.a i figura 7.18.b). En la figura 7.18.c la comparativa dels dos es realitza en %. L'estimador difús mostra millor funcionament per a cada valor de SNR diferent excepte per el marge de valors de $[-38,-36]$ dB, on es comporta pitjor, tot i que en els valors de SNR baixos torna a ser clarament superior el seu funcionament. Cal tenir en compte que el control per estabilitat comença a funcionar malament al voltant dels -37 dB (es comença a degradar abans que el control difús), i no es recupera per a SNR pitjors.

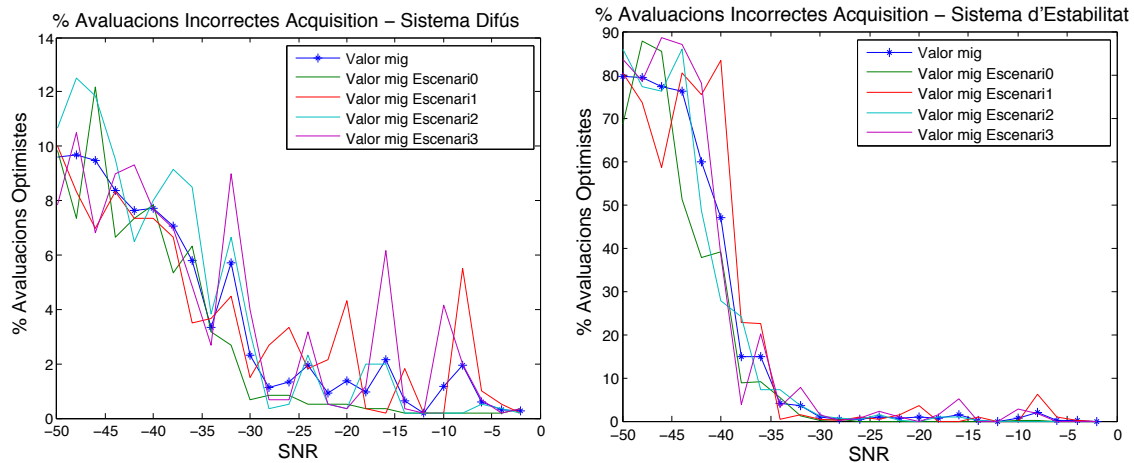
La figura 7.19 mostra les estimacions incorrectes *optimistes* tant per l'estimador difús com pel control per estabilitat. L'error optimista és molt baix per al control difús per a qualsevol SNR (veure la figura 7.19.a), i per el control per estabilitat és just el contrari; té un error optimista molt elevat, especialment per valors baixos de SNR (veure la figura 7.19.b, i també 7.19.c per a una comparativa entre els dos sistemes). Llavors l'ús del control per estabilitat fa que l'estructura multiresolutiva tingui confiança en la informació desmodulada per part del sistema quan en realitat no està adquirit correctament, i la BER s'incrementa en el receptor.

En la figura 7.20 es mostra l'error pessimista per a tots dos controls. En aquest cas, la figura 7.20.a mostra un comportament dolent del control difús per als valors de SNR que van de $[-38,-35]$ dB donant valors de fins a 15%, però el seu comportament millora substancialment quan la SNR pren valors menors. La figura 7.20.b mostra un comportament més acotat, amb valors per sota de l'11%, per part del control per estabilitat en el cas de tenir un error pessimista. La figura 7.20.c mostra la síntesi dels resultats comentats. Al voltant de -38 dB, els errors *pessimistes* empitjoren substancialment en el cas del controlador difús, un cas força pitjor que el controlador per estabilitat.

Realimentació d'informació per a l'estructura multiresolutiva d'adquisició

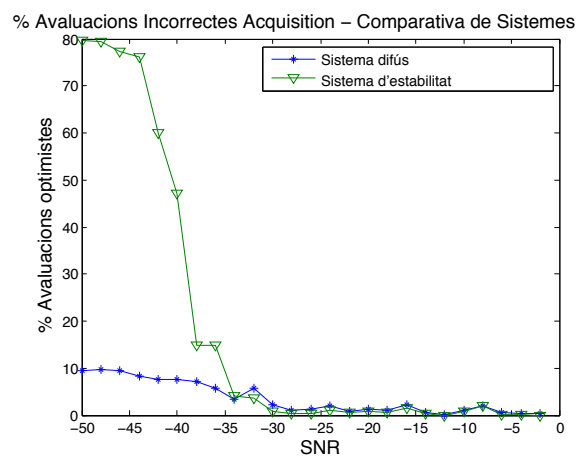
Els resultats obtinguts mostren la possibilitat de millorar el comportament de l'estructura multiresolutiva usant els valors que dona la variable de sortida *Acquisition* en el cas del control difús. L'avantatge més important de la lògica difusa enfront del control per estabilitat és que es mesura la qualitat de l'adquisició; si el comportament del sistema és bo, *Acquisition* té un valor elevat; si *Acquisition* té un valor baix, la convergència no es garanteix.

A la figura 7.21 es mostren els valors mitjos de la variable de sortida del sistema difús anomenada *Acquisition*; cada valor es calcula realitzant un amitjanament per a cada escenari i es mostra el resultat per a cada valor de SNR. Aquesta figura mostra la informació



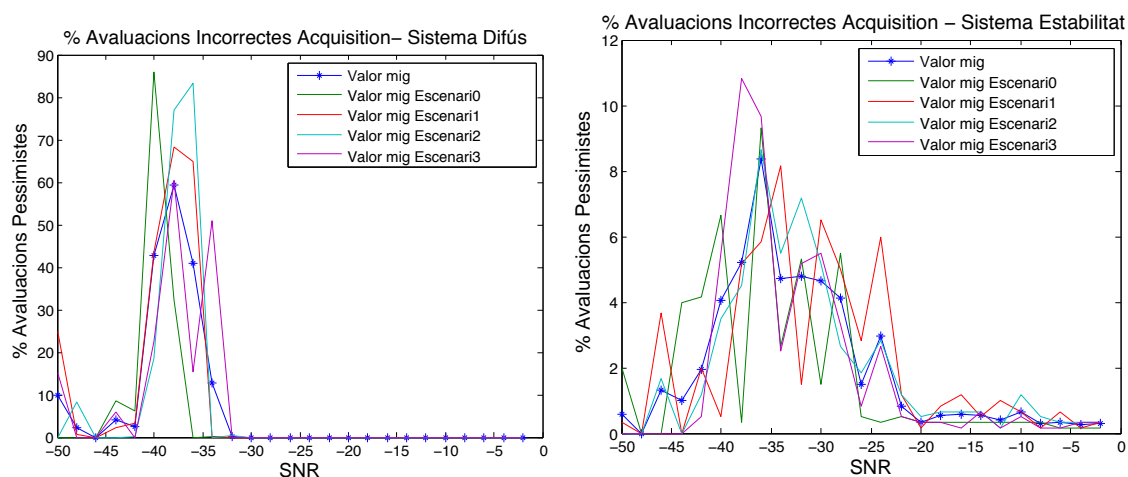
(a) % d'avaluacions incorrectes *optimistes* del sistema d'estimació difús

(b) % d'avaluacions incorrectes *optimistes* del sistema de control per estabilitat



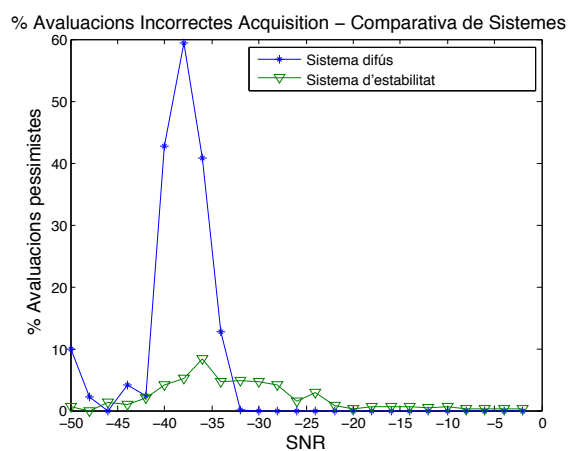
(c) Comparativa de les estimacions incorrectes *optimistes* per part del sistema difús i del control d'estabilitat.

Figura 7.19: Comparativa de les avaluacions incorrectes tant per l'estimador difús com pel control per estabilitat, en el cas de que l'error sigui *optimista*. Es presenten els resultats amitjanats per a 5 proves per a cada SNR i per a cada escenari. En l'eix OX, la SNR i en l'eix OY EL % d'errors *optimistes*.



(a) % d'avaluacions incorrectes *pessimistes* del sistema d'estimació difús

(b) % d'avaluacions incorrectes *pessimistes* del sistema de control per estabilitat



(c) Comparativa de les estimacions incorrectes *pessimistes* per l'estimador difús i pel control per estabilitat.

Figura 7.20: Comparativa de les avaluacions incorrectes per el sistema d'estimació difús i per el control per estabilitat, en el cas que l'error sigui *pessimista*. Es presenten els resultats amitjanats per a 5 proves per a cada SNR i per a cada escenari. En l'eix OX, la SNR i en l'eix OY EL % d'errors *pessimistes*.

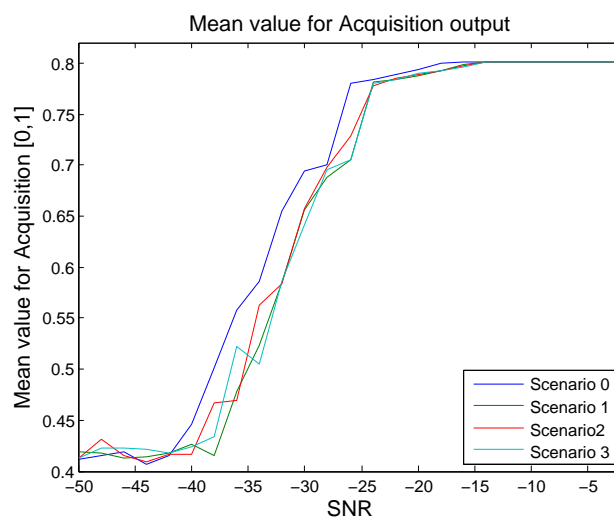


Figura 7.21: Valor mig d'Acquisition per als quatre escenaris

que el sistema difús dóna al sistema decisonal de l'estructura multiresolutiva. En primer moment, s'usa per a confirmar la convergència. Si el valor de la variable *Acquisition* és més alt que 0.75, la convergència gairebé està garantida, i el sistema no ha de fer funcionar tots els filtres adaptatius alhora; es deixarà seguir convergint aquell que presenta la posició d'adquisició, i es pot aturar aquells que no convergeixen. Si el valor d'Acquisition està entre 0.5 i 0.75, el sistema està **Probably Acquired**, però manté cercant el punt correcte amb la intenció de millorar l'adquisició. D'aquesta forma, per a qualsevol conjunt de dades detectades en recepció, se'ls pot associar una probabilitat d'encert, en funció del valor de la variable *Acquisition*, aquesta seria la primera millora del sistema difús.

El segon avantatge d'usar una variable de sortida contínua per a la variable *Acquisition* és reduir el cost computacional aturant la cerca - els filtres LMS d'adaptació - durant l'estat d'adquisició clara (**Acquired**). Gairebé $\frac{M-1}{M} = \frac{3}{4}$ (assumint que el nombre de filtres és $M = 4$) del cost computacional total es poden reduir si s'aturen els filtres en casos clars d'adquisició, quan la variable *Acquisition* està per sobre de 0.75. Això és possible per al marge de valors de $[-20,0]$ dB aproximadament, i no és possible de realitzar si s'usa el control per estabilitat. El filtre de *tracking* no s'atura malgrat l'adquisició sigui bona, tan sols s'actua sobre els filtres d'adquisició. Es veurà amb més detall l'aplicació en l'estalvi del cost computacional en el punt 7.4.1.

7.4 El sistema decisional de l'estructura multiresolutiva

En aquesta secció es presenta l'aplicació del sistema decisional de l'estructura multiresolutiva, que té com a objectiu reduir al màxim el temps de computació necessari per a l'execució de l'estructura i alhora, optimitzar-ne la detecció de la informació rebuda, tal i com ja es detallava als objectius de la tesi (veure apartat 1.3). En aquest sentit, a continuació es presenta com es maximitza l'eficiència en termes de nombre d'operacions en funció del paràmetre *Acquisition*, tot aturant filtres si l'estabilitat és prou bona. Finalment es parlarà del disseny de la solució RAKE [Sk188], l'activació del qual depèn de l'estabilitat del sistema mesurada per la variable *Acquisition*, per a la reconstrucció de la informació en recepció amb l'objectiu de millorar la BER.

7.4.1 Disminució del temps de computació

Una de les prioritats del sistema decisional és l'estalvi de temps de computació innecessari per part dels filtres adaptatius LMS de l'estructura. Un cop els filtres LMS han convergit, i per tant, un d'ells s'ha adaptat correctament a la seqüència PN delmada (veure apartat 5.3), al convergència de la resta de filtres resulta estèril fins que hi ha un canvi d'alguns dels camins d'arribada de les dades. Es tracta d'eliminar al màxim aquestes convergències que no donen cap fruit sense que això afecti significativament al rendiment de la sincronització de l'estructura. Per tal propòsit, s'han realitzat dues proves, la primera molt poc arriscada, evitant el funcionament dels filtres adaptatius durant certs períodes de temps quan hi hagi el coneixement que l'estructura es troba correctament adquirida; s'usarà aquesta com a prova de concepte de la validesa conceptual de la proposta. En la segona es concretarà la proposta amb un disseny ad hoc a les recepcions de l'estructura multiresolutiva. Ambdues propostes han estat realitzades amb el control difús ajustat per a les seqüències GA1 (veure capítol 6), i en particular, per a la seqüència 18 d'aquesta família, tal i com ja s'ha detallat en l'apartat 7.3.2. El sistema decisional depèn en poca mesura de la seqüència escollida; el que sí que depèn de la seqüència escollida és la definició dels marges de les variables difuses d'entrada del sistema de control difús.

Primera proposta

La primera de les propostes pren el valor de la variable *Acquisition*, que és la sortida del sistema difús, i s'adopta l'activació dels filtres en el seu marge de valors a partir de 0.8. Cal recordar (per més dades observar la figura 7.14, on es mostren els conjunts difusos

de sortida) que la variable *Acquisition* pren aquests valors quan el sistema està clarament adquirit, és a dir, que hi ha més d'una norma lingüística que apunta una adquisició clara. El risc que es pren assumint adquisició és molt baix, puix que l'error en aquesta zona és molt baix. Així doncs, si la sortida de *Acquisition* està per sobre de 0.8, els $M - 1$ filtres no adaptats a la seqüència PN s'aturen durant 5 temps de símbol.

Es pren aquesta mesura perquè no es tracta d'un temps crític per al valor del temps de coherència del canal, però alhora l'estalvi de cost computacional és elevat. Si el sistema està clarament adquirit ($Acquisition > 0.8$) el sistema realitzarà només una de cada sis convergències completes dels quatre filtres adaptatius de la part d'adquisició. Les altres cinc seran convergències parcials només del filtre que ja està adquirit. Si el sistema roman adquirit, i la variable *Acquisition* roman clarament adquirida ($Acquisition > 0.8$) un cop han tornat a convergir tots els filtres (dit d'una altra manera, el punt d'adquisició segueix essent bo, s'hagi mantingut o hagi canviat), es tornarà a engegar el procés d'estalvi.

Aquesta prova de concepte és molt poc flexible respecte al funcionament del sistema, i no hi està gaire adaptada. El que interessa en aquests resultats és comprovar que realment es pot disminuir el cost computacional dels filtres adaptatius sense reduir-ne la precisió. Es mesura, doncs, la reducció del cost per una banda, i per altra, la taxa d'error. Les simulacions realitzades han usat els quatre escenaris de simulació (veure apartat 2.5.2) i amb una longitud de 10000 símbols. S'ha fet més gran el nombre de símbols per tal de garantir que el sistema estava funcionant de forma estable en règim permanent.

La reducció del cost computacional per a tots quatre escenaris es pot observar a la figura 7.22. Es presenten els resultats amb diferent quantitat de símbols per tal d'observar el comportament en règim permanent de l'estalvi de cost computacional. En la figura superior esquerra s'observa l'escenari 0, amb molt pocs símbols avaluats (25 símbols), i s'observa com per relacions SNR bones, el cost temporal acumulat per a cada nou símbol creix, però de forma irregular. Creix de forma lineal i més ràpida quan s'actualitzen tots els filtres (tal i com succeeix a la corba de funcionament sense control de temps), però també disminueix el seu pendent quan s'activa l'estalvi de cost computacional.

No es mostra cap gràfica de l'error comès (que el sistema hagi considerat adquisició i fos una falsa alarma, o també a l'inrevés, que el sistema hagi considerat no adquisició i també fos una falsa alarma), perquè s'ha avaluat que en les simulacions que ens han permès realitzar la gràfica 7.22 no hi ha hagut cap error d'estimació; s'ha comprovat que en cap moment que el sistema ha permès aturar tres dels filtres, algun d'aquests hagi estat necessari per a convergir la posició d'adquisició adequada. Aquesta taxa d'error nul·la respon al poc risc que s'ha assumit en el disseny d'aquesta prova de concepte.

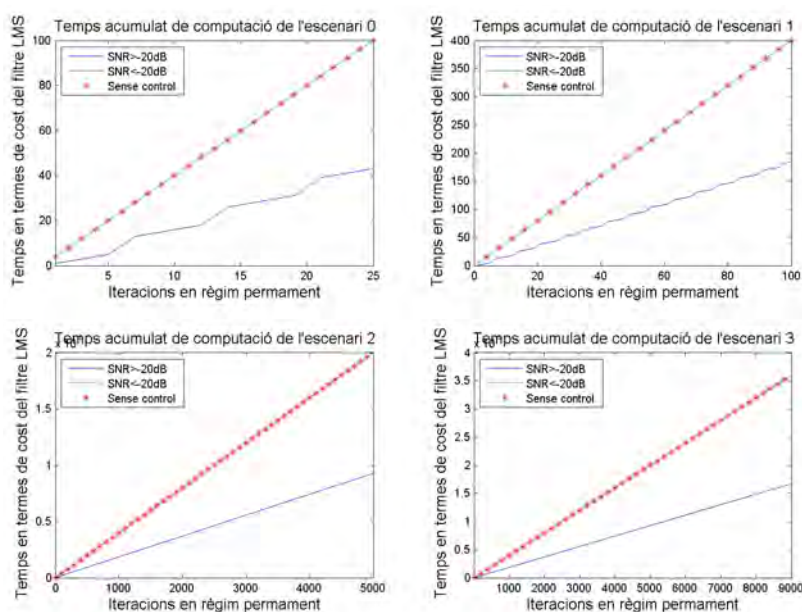


Figura 7.22: Comparativa per valors de SNR del cost acumulat de computació. Per l'escenari 0 s'han simulat 25 símbols, per l'escenari 1 se n'han simulat 100, l'escenari 2 se n'han simulat 5000 i finalment, l'escenari 3 s'han simulat 9000 símbols, que es detallen a l'eix OX. L'eix OY mostra el temps gastat en unitats de filtre LMS - una unitat és, doncs, les iteracions necessàries per a la convergència d'un filtre LMS -. Finalment, aclarir que tots els resultats es presenten en règim permanent, un cop els filtres adaptatius ja han convergit.

D'altra banda, aquesta prova de concepte demostra que si les condicions de simulació són bones, i per tant, l'estructura multiresolutiva detecta que disposa d'una bona adquisició, l'estalvi de cost computacional és possible. En aquesta prova de concepte s'han obtingut resultats encoratjadors per a dissenyar un control més adaptat a les condicions de treball de l'estructura multiresolutiva. En el cas d'aquesta primera proposta, l'estalvi computacional és similar en els diferents escenaris, tot i que la seva dificultat d'adquisició no és la mateixa. El motiu és que la primera proposta ha estat molt conservadora pel que fa a disminució de cost computacional.

Segona proposta

La segona de les propostes d'estalvi de temps permet un estalvi de temps més gradual i que té en compte posicions d'adquisició menys clares que la primera proposta, presentada en l'apartat anterior. Tal i com es pot observar a la figura 7.14, s'assumeix que a partir del valor 0.6 de la variable de sortida *Acquisition*, l'estimador difús indica que el sistema

està adquirit. En aquesta proposta s'usarà el valor de sortida d'*Acquisition* a partir d'aquest valor, a diferència de la proposta anterior, que només es refiava d'estimacions més optimistes.

L'algorisme funciona de la forma següent:

1. En primer lloc, s'observaran dos valors consecutius de la variable de sortida *Acquisition* presos durant dos temps de símbol consecutius. Només es consideraran vàlids per a engegar el sistema d'aturada de filtres si els seus dos valors són, ambdós, més grans que 0.6.
2. Es realitza la classificació de la qualitat de l'adquisició en funció dels dos valors mostrejats de la variable *Acquisition*. Poden succeir tres situacions:
 - Si tots dos valors són majors que 0.8, el sistema està clarament adquirit. Els $M - 1$ filtres no convergits s'aturaran durant 5 temps de símbol.
 - Si un dels dos valors és major que 0.8 i l'altre només és major que 0.6, el sistema està adquirit, però no de forma tant clara com el cas anterior, perquè alguna de les entrades no pren un valor corresponent a l'adquisició. Els filtres no convergits s'aturaran durant 4 temps de símbol.
 - Finalment, si tots dos valors només són més grans que 0.6 però no que 0.8, el sistema segueix estant adquirit, però amb menys certesa que els casos anteriors. Davant de la possible variabilitat del canal, els filtres no convergits s'aturaran durant 3 temps de símbol.
3. Un cop han finalitzat els temps de símbol d'aturada es procedeix a repetir les mesures (torna al punt 1), per tal de tornar a començar tot el procés.

Els temps d'espera han estat dissenyats amb el valor màxim de $5 \cdot T_s$ per tenir en compte el temps de coherència del canal (estudiat en 2.5.2), i aquest temps s'ha reduït en els casos que s'ha considerat que calia un mostreig més freqüent davant de possibles canvis en l'adquisició. Diverses proves informals han permès fixar el valor d'aquests temps d'espera atenent a un comportament òptim en l'estalvi de temps així com en l'error de l'estimació de l'estat de l'estructura.

Els resultats de l'algorisme d'estalvi de temps plantejat es mostren a les figures 7.23 i 7.24. A la figura 7.23 es mostra el còmput de temps total per a cada valor de SNR i per a cada escenari. La mesura de temps en realitat és el temps de convergència d'un filtre adaptatiu LMS. Com que tots quatre filtres de l'adquisició són iguals, s'ha pres com a

mesura unitària. Cal aclarir que els temps comparatius que es mostren en aquestes dues figures tenen en compte només els filtres adaptatius de l'adquisició i no el filtre de *tracking*. Es mostra a la figura que l'estalvi de temps mostrat en les dues figures 7.24 creix (és a dir, el cost computacional decreix) a mesura que la SNR millora. En aquest sentit, l'escenari que permet més estalvi és l'escenari 0, seguit dels escenaris 1, 2 i 3.

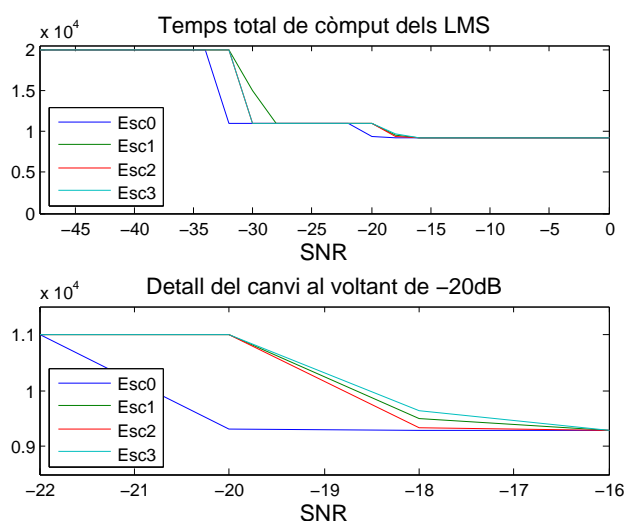


Figura 7.23: Càlcul del temps total de càlcul dels filtre LMS per a cada valor de SNR i per a cada escenari de simulació. Cada unitat de còmput de temps representa el temps de convergència d'un filtre adaptatiu LMS.

En la segona de les figures, la figura 7.24 es presenta una comparativa per diferents valors de SNR del cost acumulat al llarg del temps que suposa l'adquisició, també en unitats de temps de convergència del filtre LMS. Es presenten els quatre escenaris per separat, puix que els resultats en termes de temps no són ben bé iguals per a tots quatre. El que permet més estalvi és l'escenari 0, seguit dels escenaris 1, 2 i 3. Tampoc no es presenten tots els valors de SNR simulats, es mostren tan sols els que s'ha considerat que tenen resultats significativament diferents els uns dels altres dins dels marges $\text{SNR} \in [-50, 0] \text{dB}$. S'observa amb claredat que en tots quatre escenaris, quan la SNR és bona, propera a zero, l'estalvi de temps és gran, i aquest estalvi va disminuint - o el cost va augmentant - a mesura que la SNR empitjora.

Les dades mostrades no ens són útils per a valorar el bon funcionament del sistema si no s'avalua també l'error que s'està cometent, és a dir, si l'estalvi computacional està provocant que l'estructura multiresolutiva caigui en falses alarmes d'adquisició. En aquest cas, la proposta pren més riscos que la primera de les propostes, i per tant, la magnitud de

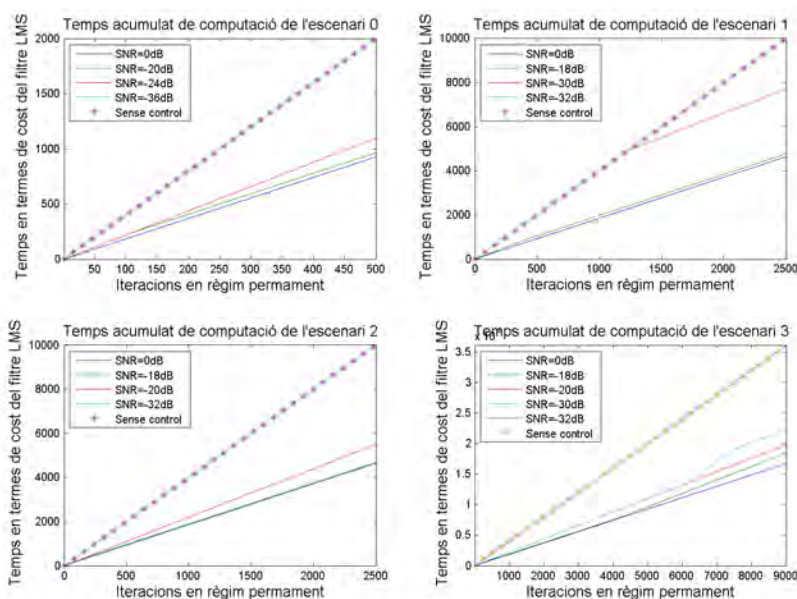


Figura 7.24: Comparativa per diferents valors de SNR del cost acumulat de computació. Per l'escenari 0 s'han simulat 500 símbols, per l'escenari 1 se n'han simulat 2500, l'escenari 2 se n'han simulat 2500 i finalment, l'escenari 3 s'han simulat 9000 símbols, que es detallen a l'eix OX. L'eix OY mostra el temps gastat en unitats de filtre LMS - una unitat és, doncs, les iteracions necessàries per a la convergència d'un filtre LMS -. Finalment, aclarir que tots els resultats es presenten en règim permanent, un cop els filtres adaptatius ja han convergit.

L'error també s'ha tingut en compte per el disseny dels llindars de decisió (0.6 i 0.8 de la variable *Acquisition*), alhora com per validar els temps d'espera abans comentats.

A diferència de la primera estimació, que en cap de les proves realitzades s'havia comès cap error, en aquest cas sí que se'n cometen, malgrat siguin pocs. A la figura 7.25 (superior) es mostren els símbols avaluats de forma errònia en totes les proves realitzades; aquest error implica que el sistema ha considerat un símbol com a adquirit i en realitat no ho estava. Són com a molt 3 símbols per a cada una de les proves realitzades (amb un total de 9000 símbols) que contenen error. I els valors de SNR que contenen error són al voltant de -20dB, i per valors més baixos de SNR.

A la figura 7.25 (inferior) es mostren tots els encerts del llindar d'estalvi temporal. El que falta per a arribar al màxim de simulació en cada cas són les mostres necessàries per tal de validar que el control d'estalvi es pot activar. D'altra banda, s'observa que per valors de SNR per sota de -35dB no funciona mai correctament; en realitat és que no funciona mai, perquè el sistema ja no presenta resultats d'adquisició suficientment bons per a activar

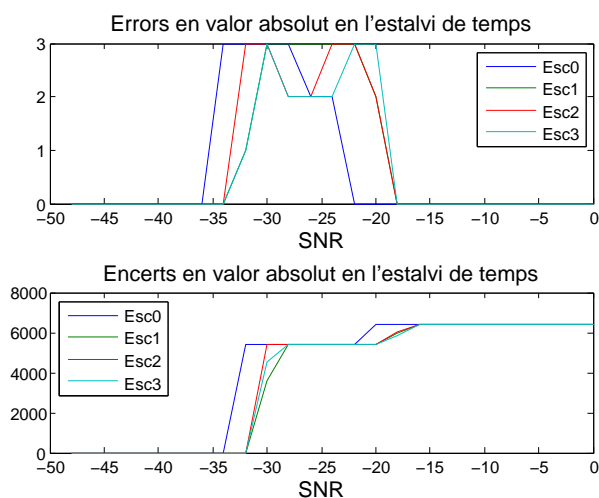


Figura 7.25: Errors (superior) i encerts (inferior) del llindar d'aturada dels filtres LMS no convergits, per a cada escenari i per a cada valor de SNR simulat.

el sistema d'estalvi. Superposant les dues figures de la gràfica 7.25, es pot afirmar que els pocs errors que es cometen (és a dir, que el sistema s'atura pensant que està adquirit correctament i no ho està) coincideixen amb una zona inestable, de transició, en que el sistema d'estalvi varia entre els tres grups de funcionament abans descrits. Malgrat tot, els errors comesos es poden quantificar com el 0.03% sobre el total d'estimacions com a màxim, per tant, assumirem que són uns bons resultats.

El sistema d'estalvi computacional romandrà actiu sempre en l'estructura multiresolutiva, i estalviarà cost computacional sempre que l'estimació de l'adquisició sigui suficientment bona. No es contempla - de moment- la possibilitat d'ampliar aquest control d'estalvi a posicions amb menys garantia d'adquisició (el marge de valors de **Probably Acquired**, per exemple), perquè com que es tracta sols d'una optimització temporal, no es vol cometre més errors en el sistema d'adquisició només per optimitzar el temps que es gasta en realitzar l'estimació.

El % de temps estalviat amb el funcionament del sistema decisional i el control difús depèn de la proposta que s'usi; a més, podria haver-hi propostes encara més arriscades en el sentit d'estalvi computacional, assumint més errors que els que hem mostrat en aquesta segona proposta.

7.4.2 Disseny de l'estructura RAKE per a la detecció final

Tal i com ja s'ha detallat a la secció 5.7, l'estructura multiresolutiva pot proporcionar camins secundaris d'arribada de dades al receptor amb poc esforç; es tracta tan sols d'expandir la cerca dels màxims dels filtres adaptatius més enllà del màxim que suposa el camí principal. L'algorisme RAKE [Sk188] aplicat es basa en la filosofia EGC (*Equal Gain Combining*), malgrat que només corregeix la fase. En aquest cas, s'ha optat per aquesta tècnica - i no la tècnica de *Maximum Ratio Combining*, que presenta millors resultats - perquè l'estructura multiresolutiva no dona una resposta impulsional del canal real; la dona amitjanada en el temps, i per tant, no es pot aplicar com a instantània en la recuperació d'un símbol concret.

En aquest sentit, s'ha dissenyat una estructura RAKE [Sk188] senzilla adaptada a les característiques de l'estructura multiresolutiva per a aprofitar els avantatges que proporciona en aquest sentit. Hi ha tres condicions de disseny que ha calgut tenir en compte. La primera han estat les modificacions que ha calgut fer en l'estructura multiresolutiva per adaptar-se a la redundància de les seqüències GA1, puix que les seves delmacions són molt semblants. La segona és a partir de quin llindar sobre els valors de la resposta impulsional suavitzada en mòdul (respecte al camí d'energia màxima) es té en compte un camí secundari; aquest és fonamental per a poder distingir un màxim secundari que pot ésser resultat de soroll en un moment determinat del camí secundari que és fonamental identificar per a poder aprofitar la diversitat del multicamí en recepció. Tot seguit es descriuran quatre escenaris de simulació nous (a més dels ja definits a l'apartat 2.5.2), que han estat definits per tal de poder treballar millor amb la versió multicamí de l'estructura multiresolutiva, malgrat els seus paràmetres definitoris no corresponen estadísticament amb el canal ionosfèric definit al treball de tesi de Vilella [Vil07].

A partir d'aquest moment es recuperen les seqüències GA1 i GA2 de millor funcionament, per tal de veure quina d'elles funciona millor en termes de multicamí; no hi ha cap garantia a priori que la que tingui millor funcionament en multicamí sigui la mateixa que la millor en la definició del sistema difús. Alhora, es revisa el funcionament comparat entre les seqüències GA1 i GA2, perquè a l'avaluació realitzada al capítol 6 es mesura tan sols el funcionament tenint en compte el camí d'energia màxima, malgrat alguns dels escenaris de simulació fossin multicamí.

Adaptació de l'estructura multiresolutiva per al treball amb les seqüències GA1

A continuació es realitza una breu descripció de l'adaptació que ha calgut realitzar amb l'estructura multiresolutiva per tal de poder treballar amb les seqüències GA1. Per tal de treballar amb les seqüències GA2 no ha calgut realitzar cap modificació respecte a l'estructura detallada a l'apartat 5.3, puix que la descripció inicial assumia que les subseqüències podien d'estar totalment incorrelades entre elles.

Per tal de poder realitzar un seguiment de tots els camins en recepció, cal que la informació de cada un dels camins sigui única, i aquest fet no succeeix en el cas de disposar de seqüències GA1. Tal i com es pot observar a la figura 7.26, el comportament de l'estructura és molt distint per al mateix escenari de simulació si comparem el resultat dels 4 filtres adaptatius usant seqüències GA1 o bé tipus GA2. En el cas de la figura 7.26.a hi ha quatre rèpliques del mateix camí, malgrat que una d'elles és la que marca l'adquisició (en aquest cas, la del filtre adaptatiu 1). En el segon dels casos, tan sols una marca el lloc correcte de l'adquisició. Això és a causa de que en la família GA1 les subseqüències tenen una similitud molt alta entre elles en el cas d'estar en fase (veure apartat 6.4.1).

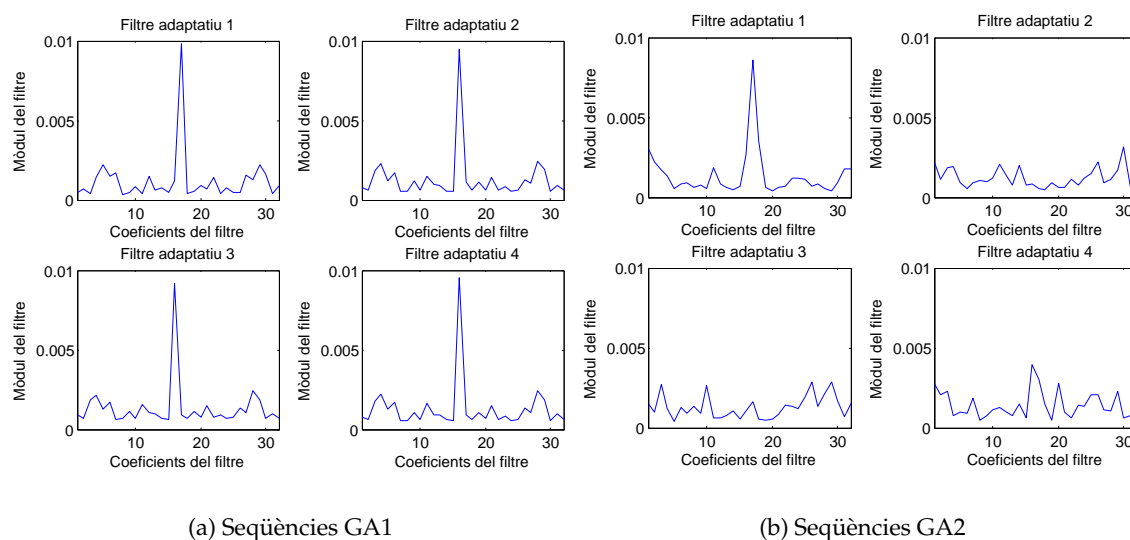


Figura 7.26: Comparativa de la resposta dels filtres adaptatius per a les seqüències GA1 i GA2, per a l'entorn de l'escenari 0 (veure escenaris a l'apartat 2.5.2)

Per tal de poder realitzar un bon treball en multicamí i poder discernir els diferents camins juntament amb el temps que hi ha entre un i el següent, caldrà que immediatament després d'haver calculat el camí principal, s'anul·li no només el valor del filtre que

el marca, tal i com s'esmentava a la secció 5.7, sinó totes les rèpliques del mateix camí en els altres tres filtres (fixant a zero la mostra adequada en cada filtre). D'aquesta manera es baixa lleugerament la resolució dels filtres, especialment si els diferents camins estan molt propers en el temps, però d'altra banda és la única forma de no confondre l'estructura RAKE assumint camins que no són reals.

Aquest procediment permet que tota la resta de valors dels filtres adaptatius puguin ser usats per a cercar altres camins, i que amb aquests altres camins s'apliqui la mateixa procedimentació fins a arribar a detectar-ne tres, com a màxim. Caldrà comprovar en el seu moment si aquesta pèrdua de resolució en la detecció dels camins secundaris perjudica a la recepció de les dades. Es validarà degudament en les proves sobre totes dues famílies de seqüències.

Llindar de discriminació de camins secundaris

El primer que ha estat necessari és decidir a partir de quin llindar (sobre el valor del camí principal), sempre respecte al camí principal, els camins secundaris han d'ésser tinguts en compte. Per tal de prendre aquesta decisió ha calgut un estudi previ sobre el nivell de soroll en els filtres.

L'estudi s'ha realitzat sobre els quatre escenaris definits en l'apartat 2.5.2, amb l'objectiu de mesurar la relació entre la mitjana dels coeficients dels filtres adaptatius en posició de no convergència, en relació amb el màxim que sí que ha convergit. Es tenen en compte els valors dels filtres adaptatius ja amitjanats amb l'*exponential smoothing*. Els resultats es mostren a la figura 7.27.

Els resultats mostren que la relació entre el nivell de soroll i el màxim no és constant, sinó que la influència del soroll és més gran a mesura que la potència de soroll també és més gran. També es mostra que en els escenaris multicamí (Esc1, Esc2, Esc3) la relació és lleugerament més gran ja que el màxim només aporta part de l'energia del senyal. Gràcies als resultats obtinguts es pot concloure que el llindar que garantiria que no s'acceptés mai un camí erroni (que en realitat fos soroll) seria considerar $x = 0.5$, on x és el quocient entre el valor del coeficient del filtre adaptatiu suavitzat en mòdul i el valor del màxim per a tots els filtres, que és la fita màxima de tots els escenaris en totes les SNR. El més òptim seria poder adaptar el llindar a les condicions de treball del canal, però en aquest treball no s'ha considerat el disseny d'una solució amb llindar variable, s'ha plantejat com a línia de futur.

Es considera, doncs, un llindar de 0.4 (o del 40% sobre el màxim del camí principal), tal

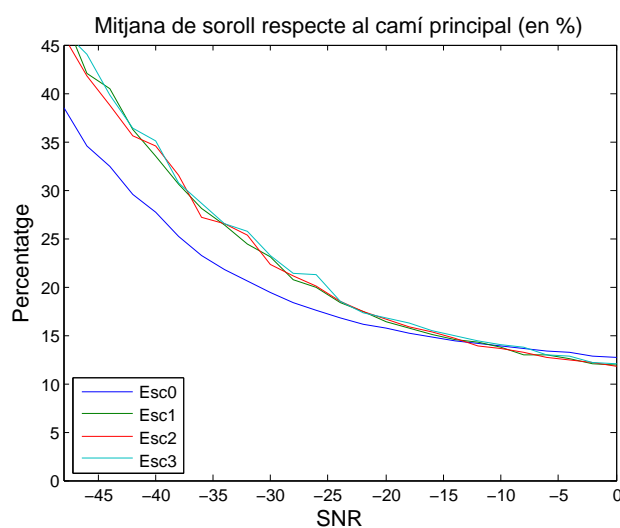


Figura 7.27: Relació entre el màxim i el valor mig del soroll del filtre adquirit en funció de la SNR

i com s'observa a la figura 7.27, que minimitzaria la probabilitat de falsa alarma a no ser que s'estigui treballant en relacions SNR molt dolentes, per sota de -43dB , (en les que caldria veure si existeix una adquisició correcta abans de pensar en camins secundaris). Una opció menys conservadora seria tenir en compte el llindar al voltant de 0.3, que permetria treballar fins al voltant de -35dB , que és el llindar de bon funcionament de l'estructura multiresolutiva. Per tal de realitzar la primera prova amb l'estructura RAKE, però, s'usarà el llindar més conservador, i es prendrà com a criteri de detecció de camins secundaris quan la mostra del filtre suavitzat en mòdul sigui superior o igual al 40% sobre el valor màxim del filtre.

A més de realitzar la mesura sobre el camí principal, per tal que el RAKE estigui actiu en recepció, caldrà que la sortida del bloc controlador difús *Acquisition* estigui en algun dels estats d'adquisició o bé **Acquired** o bé en **Probably Acquired**. També s'activarà en el cas de ser dubtós, quan valgui **Probably Not Acquired**, per tal de donar la opció que l'estructura RAKE millori l'adquisició aprofitant la diversitat del multicamí en recepció. Si no és així, no s'activarà la detecció RAKE per el risc de que el sistema no estigui adquirit i la contemplació de diversos camins pugui encara augmentar el soroll en detecció. A continuació s'estudia, però, si es podrà disposar d'algun indicador que provingui del control i que mostri la probabilitat de l'existència del multicamí.

Ajust del controlador difús per a multicamí

Un dels objectius del control difús és poder traçar correctament i en tot moment el comportament dels diferents camins que arriben al receptor. És per això que s'han avaluat els ràtios obtinguts en els quatre escenaris originals (descrits a taula 2.2) per als camins segon i tercer en cada situació que aquests existissin. Aquesta avaluació manté el mateix procés ja usat per a la detecció dels màxims en l'estructura multiresolutiva, es tracta d'un procés iteratiu. En primer lloc s'avaluen els ràtios per al camí principal; tot seguit, aquest camí principal s'elimina dels filtres. En segon lloc, s'avaluen els ràtios del segon dels camins en termes de potència, i també s'elimina aquest segon. I es fa el mateix procés per a l'últim dels camins. Els marge de valors que s'obtinguin són els que s'usaran per a definir els conjunts difusos d'entrada dels blocs difusos que han de donar resposta al control dels diversos camins del multicamí.

Els resultats dels quatre ràtios avaluats es mostren a les figures 7.28. Els resultats que es mostren s'han avaluat avaluant només els casos que el sistema està adquirit (es pot comprovar observant la posició d'adquisició en funció de l'escenari de simulació usat), i mostren els valors mitjos dels diversos ràtios, amb simulacions de 600 símbols i amb 5 proves per a cada SNR i escenari. El codi usat és la lletra A per al ràtio corresponent al camí principal, la lletra B al ràtio corresponent al camí secundari i la lletra C al ràtio corresponent al tercer dels camins.

La conclusió arribada de la observació dels resultats presentats a la figura 7.28 es centra en que els ràtios avaluats sobre els camins segon i tercer del canal presenten poques diferències entre la posició adquirida i la no adquirida. En situació de clara adquisició, amb una relació SNR d'entre [-10,0]dB, on el camí principal mostra uns valors de ràtios distingibles clarament del soroll, els camins secundari i especialment, el terciari, mostren valors molt menors, fins i tot de la meitat o de la tercera part del que mostra el camí principal. El que ens està dient aquesta valoració és que els valors dels ràtios en multicamí fora del camí principal són molt poc significatius, i que són fàcilment confusibles amb el soroll.

Sense haver fixat un llindar concret per a determinar que no és possible la distinció de les diferents situacions en la figura 7.28 per al camí B i el camí C, cal tenir clar que per al bon funcionament del control difús, caldria poder fixar una zona de saturació - força ampla - en la que el sistema estigués clarament adquirit. El mateix hauria de succeir pel cas de no estar adquirit. D'altra banda, però, i ja s'ha descrit anteriorment a l'apartat 7.3.2, cal que hi hagi dos estadis intermitjos, un que sigui més proper a l'adquisició, i l'altre que sigui més proper a la no adquisició. Amb el poc marge dinàmic que ens proporcionen les

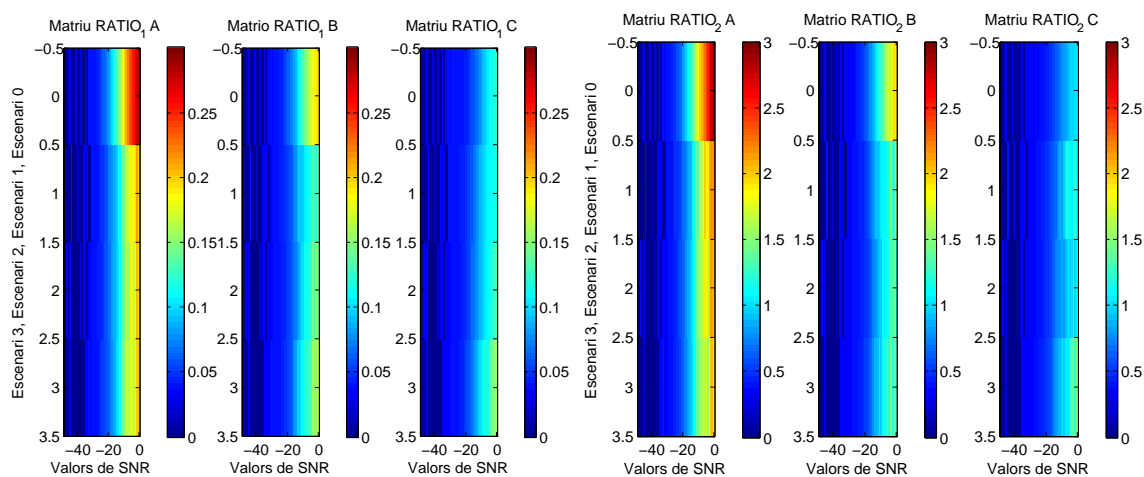
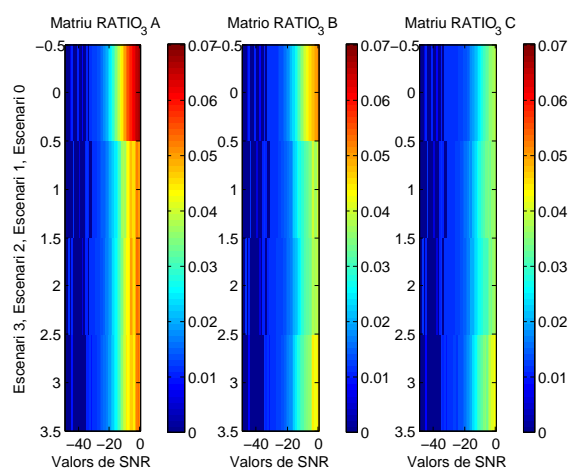
(a) Valors per al $Ratio_1$ (b) Valors per al $Ratio_2$ (c) Valors per al $Ratio_3$

Figura 7.28: Ratio1, Ratio2 i Ratio3 per a multicamí. A, B i C representen els tres camins possibles, on A és el camí principal i de més energia. En l'eix OX, els valors de SNR. En l'eix OY, els quatre possibles escenaris. Els valors representats en colors són els resultats de cada un dels ràtios per a cada SNR, escenari i camí.

figures 7.28, els valors per al millor dels camins possibles s'acosta més a la no adquisició, que no pas a l'inrevés.

Hi ha un problema afegit, a més del ja detectat. Les variables de sortida són variables en funció de la relació entre el camí principal i els camins secundaris, per tant, no sols depenen de la SNR del canal en el moment de mesura. Aquest increment de variabilitat afegeix més dificultat en fixar-los en valors concrets per tal de discriminar-ne l'existència, i és un motiu més que va en contra de realitzar una adaptació del control difús.

Com que els resultats són poc significatius i no invariants en la SNR, és més que qüestionable la despesa de cost computacional que cal emprar per a realitzar-ne l'avaluació dels ràtios. Arribat aquest punt, observant els resultats presentats a la figura 7.28 i alhora, els de la figura 7.27, s'observa clarament que la relació entre la SNR i el valor màxim del camí principal segueixen una corba nítida, i es tracta d'una informació que serà útil per a distingir si un màxim d'un filtre adaptatiu es tracta del resultat del soroll o bé d'un altre camí real. Aquesta distinció és més clara que no pas els mateixos ràtios, confusibles amb el soroll en un marge de valors elevat. Els ràtios que es mostren a la figura 7.28 mostren que els quocients entre els màxims i la mitjana del soroll no prenen valors suficientment distingibles per a que la informació del sistema difús pugui donar una sortida fiable.

És per aquest motiu pel que finalment no s'ha ajustat el control difús per a la detecció dels camins secundaris. En lloc d'això, el procediment d'identificació d'una recepció multicamí serà el següent: en primer lloc, detectar l'adquisició per part del sistema difús sobre el camí principal, és a dir, seguim l'estratègia explicada en l'apartat 7.3.4, a on només es cerca el màxim d'energia dels M filtres d'adquisició. En segon lloc, avaluar si els màxims secundaris localitzats als filtres adaptatius abasten el % preestablert de potència sobre el camí principal. Si és així, seran tinguts en compte. No seran tinguts en compte en cas contrari.

Nous escenaris de simulació

Els nous escenaris de simulació han estat definits per tal d'observar amb més detall el comportament de l'estructura multiresolutiva en multicamí en escenaris amb més diversitat de multicamí que no pas els definits a l'apartat 2.5.2. Els paràmetres de retard així com de les de potència de les diferents components del multicamí d'aquests nous escenaris es defineixen a la taula 7.1.

Tal i com es pot observar a la taula 7.1, s'ha procurat que els camins secundaris tinguessin més importància que en els escenaris clàssics (veure taula 2.2) a nivell de potència per

Taula 7.1: Paràmetres retard i de potència de cadascun dels 3 camins definits en els nous escenaris de simulació

Escenari	τ [s]	P [dB]
Escenari 0	$[0 \ 0.3 \cdot 10^{-3} \ 2 \cdot 10^{-3}]$	$[0 \ -2\text{dB} \ -3\text{dB}]$
Escenari 1	$[0 \ 0.2 \cdot 10^{-3} \ 2 \cdot 10^{-3}]$	$[0 \ -2\text{dB} \ -3\text{dB}]$
Escenari 2	$[0 \ 2 \cdot 10^{-3} \ 2.3 \cdot 10^{-3}]$	$[0 \ -2\text{dB} \ -3\text{dB}]$
Escenari 3	$[0 \ 0.5 \cdot 10^{-3} \ 2.1 \cdot 10^{-3}]$	$[0 \ -2\text{dB} \ -3\text{dB}]$

tal de poder emfatitzar les millores de tenir-los en compte, així com s'han diversificat els retards entre els diferents camins per incrementar la variabilitat de les solucions, procurant que les distàncies entre camins siguin petites per tal de determinar si existeix pèrdua de resolució usant les seqüències GA1. D'ara en endavant, totes les proves per a determinar la qualitat del funcionament del RAKE tindran en compte els escenaris clàssics (definits a la taula 2.2 de l'apartat 2.5.2) però també els escenaris específics (definits a la taula 7.1).

Comparativa d'adquisició i *tracking* per a les seqüències GA1 i GA2

En aquesta primera valoració de funcionament es mesura el % de temps que el sistema està correctament adquirit i per tant, que també té el *tracking* correcte, tant per a les seqüències GA1 i GA2, com per als vuit escenaris de simulació definits fins ara. Es podrà contrastar quina és la millor adquisició, de les vuit seqüències en comparació (les quatre millors per a l'aproximació GA1 i les quatre millors per a l'aproximació GA2 en termes de les funcions *FE* definides a l'apartat 6.6.3). Es realitza doncs, les primeres proves de comparació entre les dues famílies de seqüències per al comportament multicamí de l'estructura. Aquestes proves s'han dissenyat usant els escenaris clàssics (veure apartat 2.5.2) però també els quatre escenaris nous de simulació (veure taula 7.1), i en aquest cas les simulacions que es presenten s'han realitzat sobre blocs de dades de 600 símbols. Les seqüències estudiades han estat les 5, 18, 19 i 20 per a la família de seqüències GA1 i les 2, 27, 1000 i 1500 per a la família de seqüències GA2. Es prenen només 4 seqüències de cada família per a mirar de simplificar l'anàlisi comparatiu, i perquè ja s'ha mostrat anteriorment que es tracta de prendre les millors seqüències.

A continuació s'avaluen els encerts en adquisició per a les dues famílies, i tot seguit la precisió en el *tracking*. Com que hi ha una diversitat de dades gran, tant pel que fa al nombre de seqüències provades com pel que fa al nombre d'escenaris, els criteris de

decisió finals es mostraran amb una distribució de resultats totals.

Posicions d'adquisició A la figura 7.29 s'observen les corbes de funcionament de l'adquisició en el cas de les seqüències GA1 i a la figura 7.30 s'hi mostren les mateixes dades per a les seqüències GA2. Cal observar que en el cas dels escenaris clàssics (veure taula 2.2) a la figura 7.29 no es mostren els resultats per al segon i tercer camí, puix que l'escenari 0 no és multicamí. A totes dues figures els resultats es presenten en tres fileres. La primera s'associa a 1 *path*, referint-se als resultats del camí principal, el camí amb més energia. La segona filera s'associa a 2 *path*, que és el 2n camí, a nivell energètic, i finalment el 3 *path* correspon al tercer dels camins possibles.

L'avaluació de la correctesa de l'adquisició ha estat estricta: s'ha mesurat en cada un dels símbols rebuts la posició estimada per el sistema i s'ha contrastat amb la posició correcta de l'adquisició mesurada en termes de correlació (veure [YKH06, YCH08]), i s'ha donat una tolerància màxima en valor absolut de la meitat del temps de xip, perquè es tracta del temps d'adquisició. És a dir, $|\hat{\tau}_c - \hat{\tau}_{EA}| < \frac{T_c}{2}$.

Els resultats que fan referència al primer dels camins mostren estabilitat per a totes les seqüències, especialment fins al voltant dels -30dB, tant per als escenaris clàssics com per als escenaris específics. No es mostren estables ni amb tant bons resultats els segons i els tercers camins, especialment per a algunes de les seqüències; en el cas dels escenaris clàssics són millors les seqüències GA1. Aquesta millora s'entén, puix que si no hi ha problemes de resolució per tal de trobar els camins, les seqüències GA1 són més redundants i per tant, augmenten la probabilitat d'adquisició correcta (tal i com ja es va observar a les proves realitzades en l'apartat 6.7).

El resum de resultats es pot veure de forma integrada a les figures 7.31.a (per als escenaris clàssics) i 7.31.b (per als escenaris específics). Les dades que es mostren en els boxplots acumulen el que succeeix per a tots els possibles valors de SNR. En aquests boxplots es pot observar que per la detecció del primer dels camins gairebé totes les seqüències es comporten molt correctament, però aquest percentatge empitjora molt ja en la detecció del segon dels camins. Malgrat aquest empitjorament, encapçalat en els escenaris clàssics per les seqüències GA2, en els escenaris específics aquest funcionament es manté a uns nivells força més acceptables, especialment en el cas de la seqüència GA2-S1000, fins al punt que el funcionament d'aquesta seqüència en la detecció del tercer dels camins dels escenaris específics millora totes les seqüències GA1 i GA2 restants.

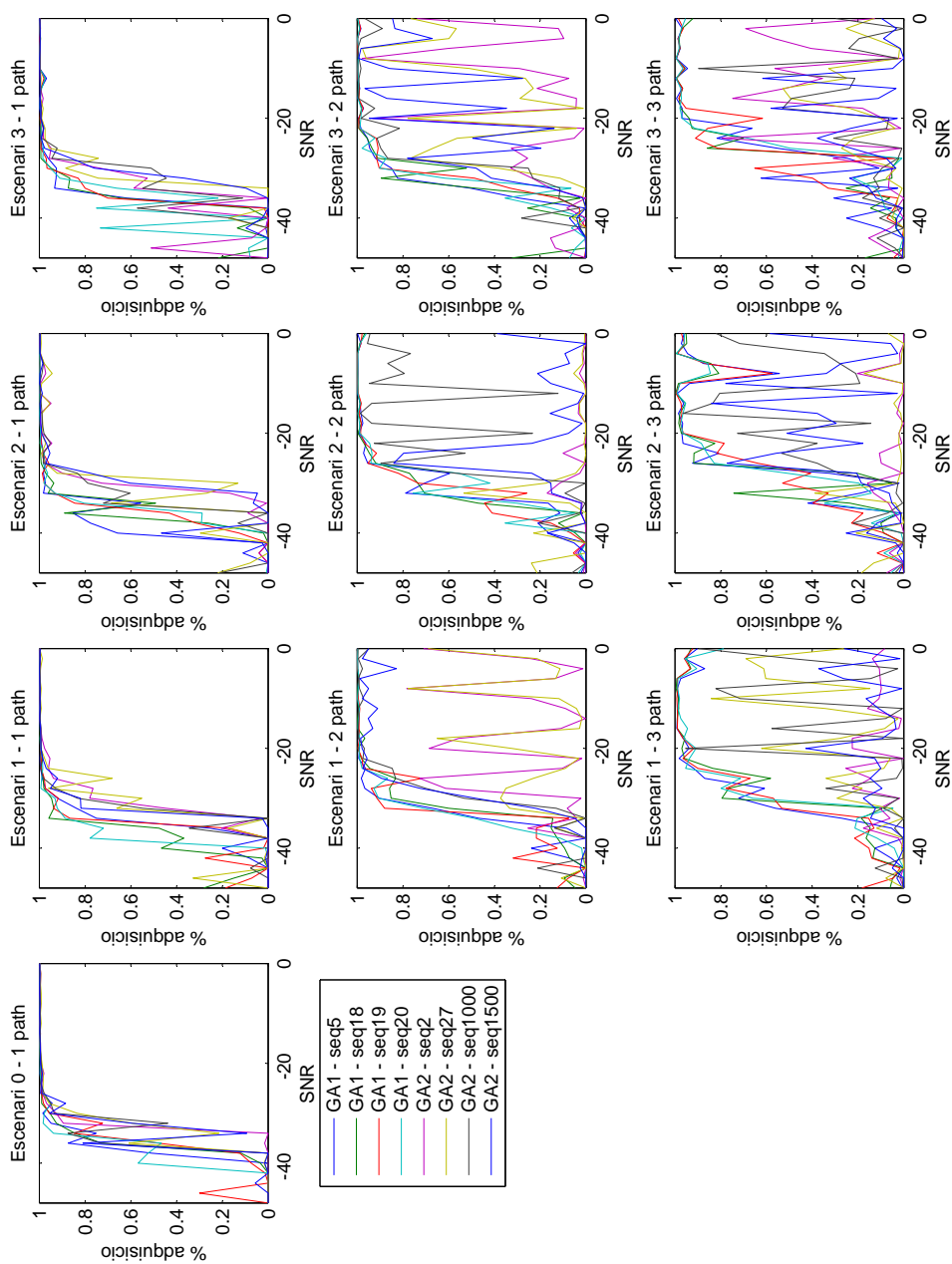


Figura 7.29: % d'adquisicions correctes per a cada seqüència GA1 i GA2 per als escenaris clàssics (veure taula 2.2). En l'eix OX la SNR. En l'eix OY la probabilitat d'estar correctament adquirits. En cada gràfica es mostren els resultats per a 8 seqüències distintes, 4 per a GA1 i 4 per a GA2.

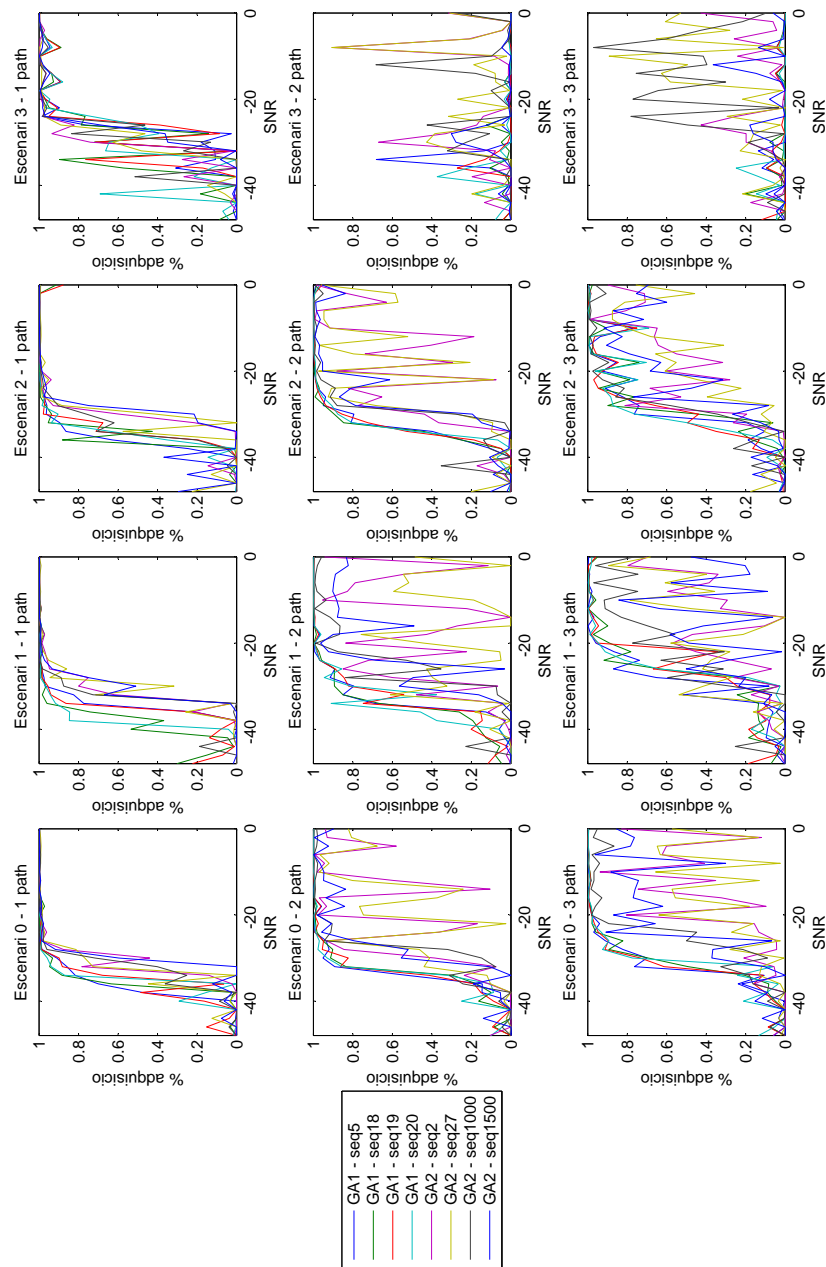


Figura 7.30: % d'adquisicions correctes per a cada seqüència GA1 i GA2 per als escenaris específics (veure taula 7.1). En l'eix OX la SNR. En l'eix OY la probabilitat de que el *tracking* sigui correcte. En cada gràfica es mostren els resultats per a 8 seqüències distintes, 4 per a GA1 i 4 per a GA2.

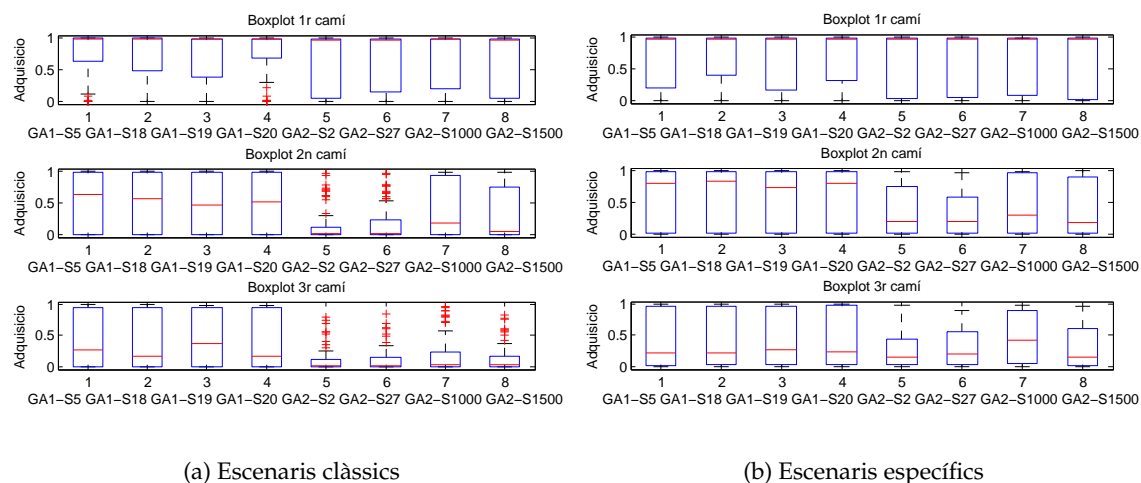


Figura 7.31: Boxplot dels resultats del % d'adquisicions correctes per a totes les seqüències GA1 i GA2 provades (veure eix d'abscisses) per als escenaris clàssics (veure taula 2.2) i per als escenaris específics (veure taula 7.1)

Posicions de tracking A continuació es detallen els resultats referents a les posicions amb *tracking* correcta per a les tres posicions dels tres camins d'arribada. A la figura 7.32 s'observen els resultats per als escenaris clàssics (veure taula 2.2) i a la figura 7.33 s'observen els resultats per als escenaris específics (veure taula 7.1).

Tal i com es mostra a les figures 7.32 i 7.33, els % de *tracking* correcte empitjoren clarament respecte als que s'havien mostrat anteriorment per a l'adquisició. Això és a causa de dos successos. Per una banda, el fet que l'adquisició necessita de certa estabilitat per a proporcionar dades fiables al *tracking*, i quan aquest disposa de les dades, cal que convergeixi el filtre. Per tant, hi ha una demora evident de la velocitat del *tracking* respecte a l'adquisició; es pot mirar de minimitzar, però no eludir.

D'altra banda, s'ha detectat un funcionament irregular en la implementació dels filtres de *tracking* en el cas de multicamí. Es dona bàsicament en el cas que les posicions dels diferents camins sigui força propera. Com que es disposa de tants filtres de *tracking* com camins s'hagin detectat (fins a un màxim de tres), si els camins són propers, és possible que més d'un dels camins convergeixi en el mateix filtre de *tracking*. Això succeirà si els filtres de *tracking* de cada rebot se superposen en *delay*. El que implica aquest succés és que la convergència del *tracking* en dos filtres diferents sigui per al mateix camí, resultat que és descartat per el sistema decisonal; si el sistema decisonal detecta que dos filtres de *tracking* proporcionen el mateix camí, n'usa només un. La situació ideal caldria que no

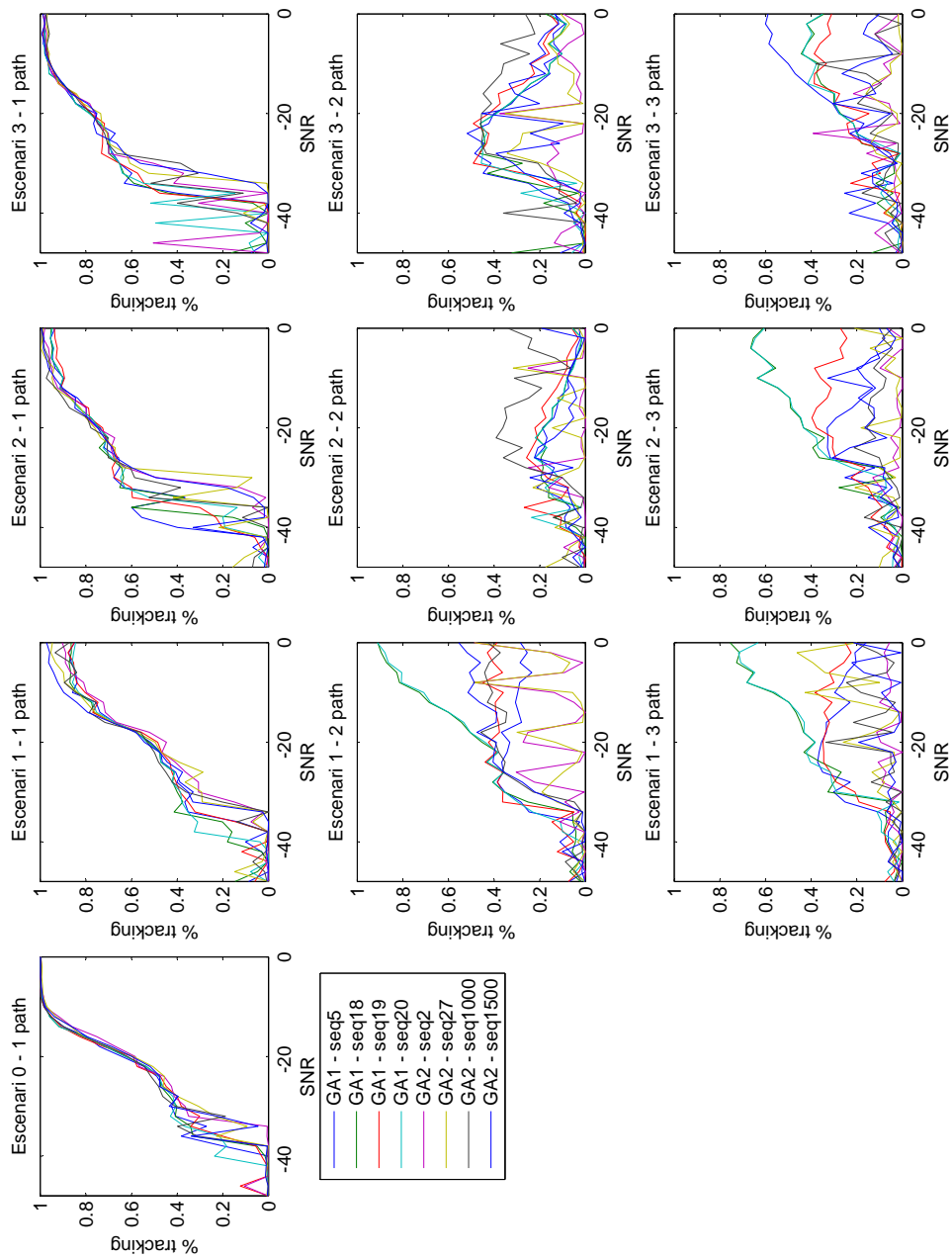


Figura 7.32: % de posicions de *tracking* correctes per a cada seqüència GA1 i GA2 per als escenaris clàssics (veure taula 2.2)

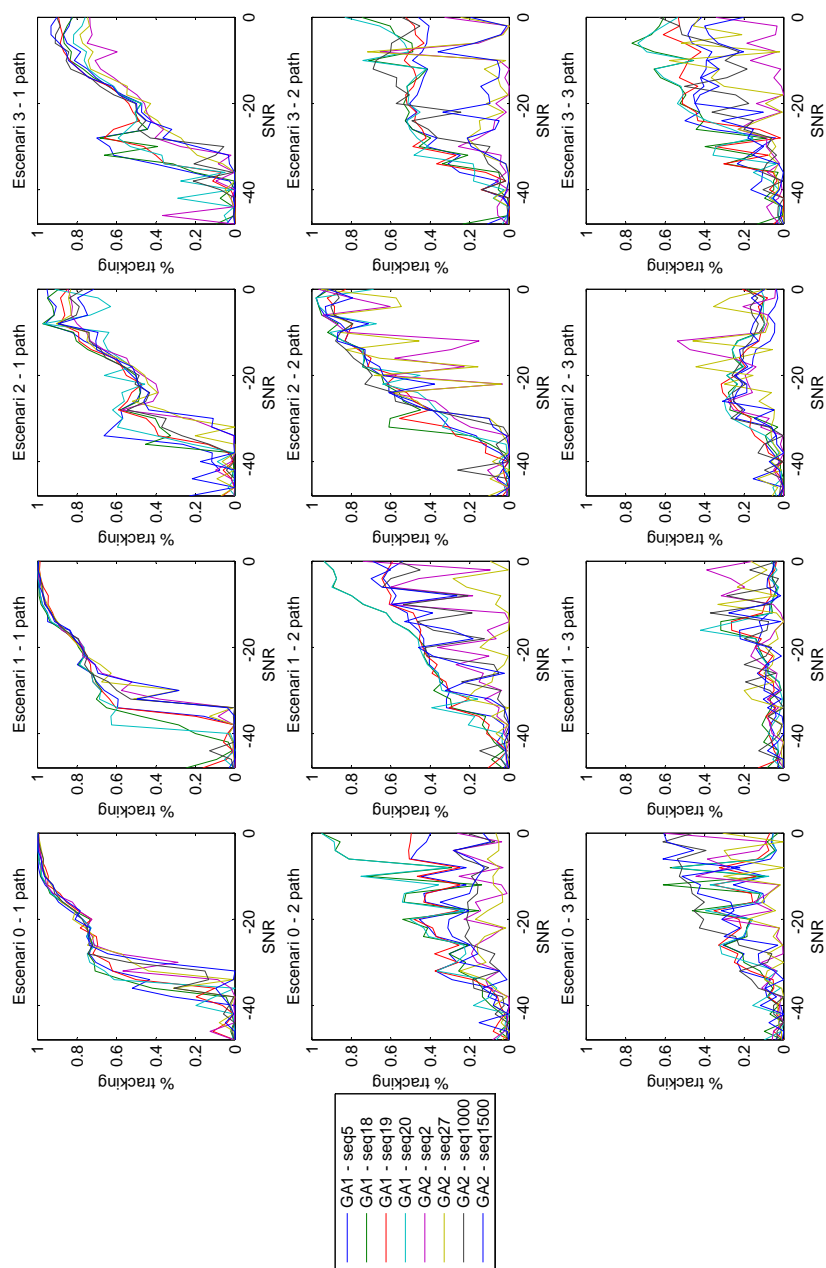


Figura 7.33: % de posicions de *tracking* correctes per a cada seqüència GA1 i GA2 per als escenaris específics (veure taula 7.1)

contemplés la possibilitat que dos camins entressin en un sol filtre, o en tot cas, si això succeeix, que el sistema decisional pugui detectar els dos màxims en un sol filtre. Aquesta millora es deixa de moment per les línies de futur d'aquest treball.

La millora del procés de detecció dels camins secundaris s'ha plantejat com a línia futura d'aquest treball: es pretén dissenyar un sol filtre de *tracking*, que contempli una durada temporal suficient per a abastar tots els camins possibles (estadísticament) que proporciona el canal (per tant, que compleixi amb el *delay spread* del canal), i que serveixi per a convergir alhora els diferents camins que doni el canal. Caldria fer un estudi temporal respecte a la longitud necessària del filtre, puix que és precisament la longitud el que fa que el cost del filtre pugui amb molta rapidesa.

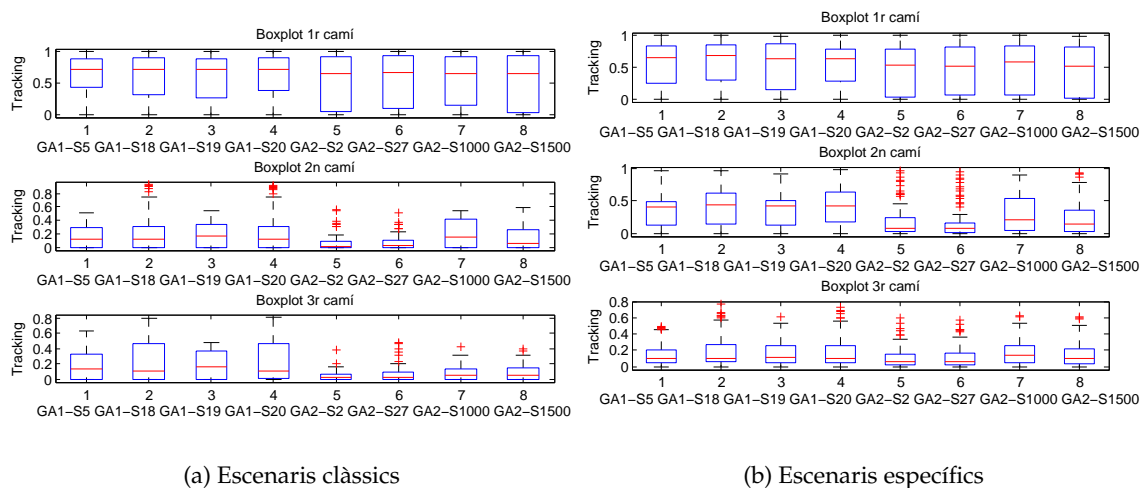


Figura 7.34: Boxplot dels resultats del *tracking* correctes per a totes les seqüències GA1 i GA2 provades a l'eix d'abscisses per als escenaris clàssics (veure taula 2.2) i per als escenaris específics (veure taula 7.1)

Finalment, a la figura 7.34 s'observen els resultats sobre l'anàlisi del % d'incert en el procés de *tracking* integrats en forma de boxplots i acumulant totes les mesures per a tots els valors de SNR analitzats. Els resultats per al primer dels camins són raonablement bons per a totes les seqüències i tots els escenaris, proporcionant uns resultats lleugerament millors les seqüències GA1. No són tan clars, però, els resultats, si es miren els altres camins, especialment el segon camí. En la valoració d'aquest segon camí s'observa que la seqüència GA2-S1000 pren bons resultats, tant en els escenaris clàssics com en els escenaris específics. Això fa pensar que es tracta de la seqüència que presenta millors resultats per a tota la família de seqüències GA2.

Resultats de BER A la figura 7.35 s'observa el resultat del BER⁴ per a totes les seqüències GA mesurades fins ara (les GA1 - 5, 18, 19 i 20 -, i per a les seqüències GA2 - 2, 27, 1000 i 1500 -). Els resultats han estat avaluats per als escenaris clàssics (veure taula 2.2) per a la filera superior de gràfiques, per als escenaris específics (veure taula 7.1) i també per aquests mateixos escenaris específics (taula 7.2), però provocant que la potència dels camins secundaris sigui momentàniament més gran que la del camí primer; l'objectiu és emular de forma més precisa el moment en què en un canal desapareix un camí principal i n'apareix un altre. Aquesta última prova ha estat realitzada per a donar més pes a la mesura del BER en el camí de màxima potència, puix que en els escenaris simulats (tant per als escenaris clàssics com per als escenaris específics) el camí de més potència acostuma a recaure en el primer i hi ha poques situacions que això canviï. Cal dir també que les proves han estat realitzades sobre 600 símbols, per tant, els valors del BER en el millor dels casos, quan les condicions són més favorables, no poden ser molt baixos. A la taula 7.2 es descriuen els detalls del retoc respecte dels escenaris específics.

Taula 7.2: Paràmetres de retard i de potència dels escenaris específics amb la mateixa distribució temporal dels escenaris específics de la taula 7.1 però amb variació de potència dels camins secundaris. Han estat definits per a emular amb més precisió quan desapareix un camí principal i n'apareix un altre en una transmissió.

Escenari	τ [s]	P [dB]
Escenari 0	$[0 \ 0.3 \cdot 10^{-3} \ 2 \cdot 10^{-3}]$	[-2dB 0dB -5dB]
Escenari 1	$[0 \ 0.2 \cdot 10^{-3} \ 2 \cdot 10^{-3}]$	[-3dB -2dB 0dB]
Escenari 2	$[0 \ 2 \cdot 10^{-3} \ 2.3 \cdot 10^{-3}]$	[-3dB -1dB 0dB]
Escenari 3	$[0 \ 0.5 \cdot 10^{-3} \ 2.1 \cdot 10^{-3}]$	[0 -2dB -3dB]

A la figura 7.35 s'observa que la BER empitjora clarament a partir dels -20dB. Totes les corbes corresponents a les diferents seqüències empitjoren al voltant d'aquest valor, i aconseguen valors propers als 0.5 al voltant dels -30dB. D'alguna manera la BER ens diu que per sota d'aquests valors de SNR, la bona adquisició no influeix en el resultat de la fiabilitat en la detecció per culpa del soroll. L'anàlisi de les dades d'aquesta gràfica les veurem a continuació, a la figura 7.36 en forma de boxplot integrat de tots els escenaris possibles, per tal de determinar quina de les seqüències PN provades (les quatre GA1 i les quatre GA2) donen millor BER a nivell global. Si les diferències són significatives, pot

⁴Cal aclarir que aquest BER ha estat avaluat amb les dades simulades sense aplicar-los cap tipus de codi corrector d'errors. És clar que amb un estudi acurat de les característiques de les dades transmeses els errors en recepció es poden reduir a valors més baixos, usant codis correctors i entrellaçat adequatament.

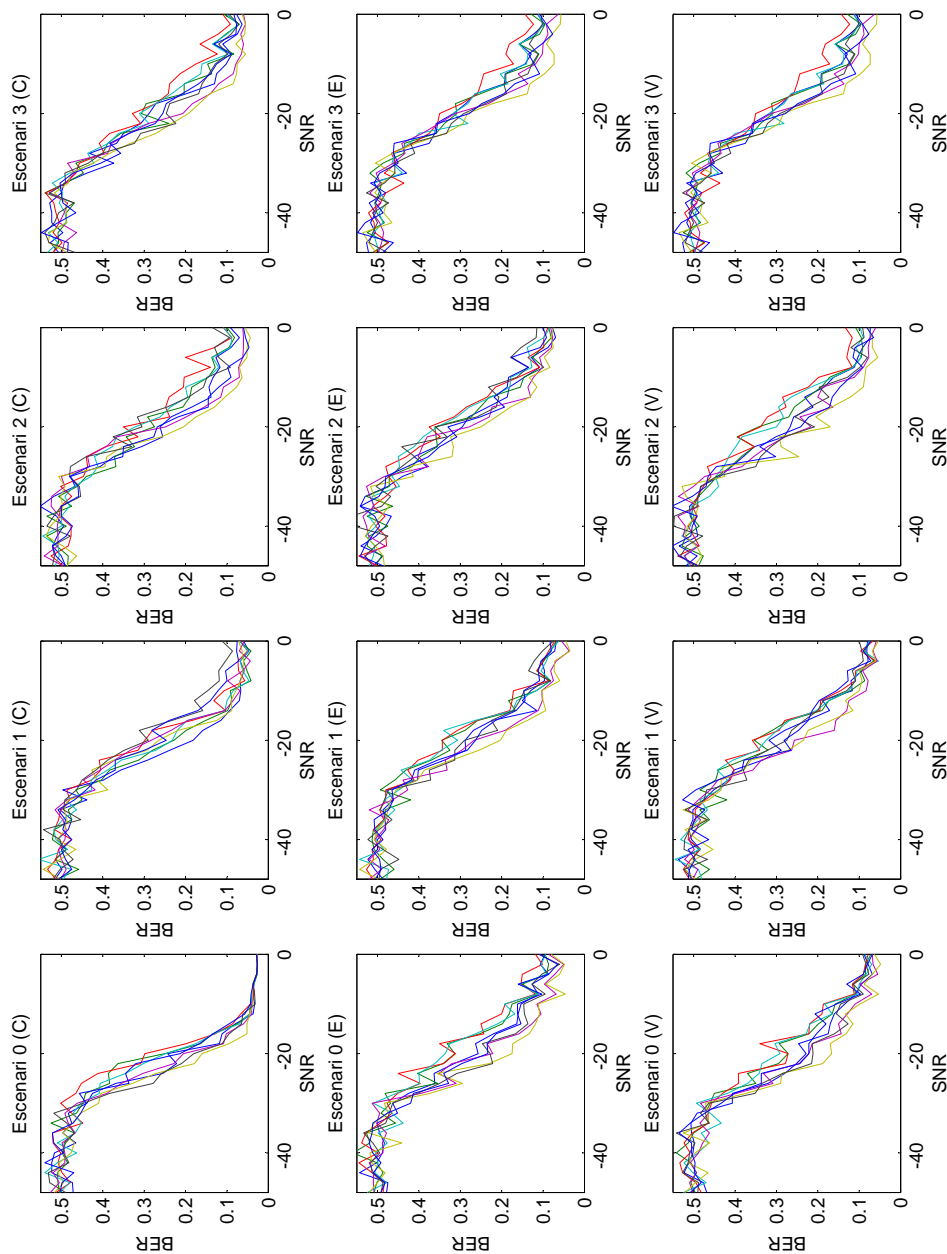


Figura 7.35: BER avaluat en el camí de màxima potència instantània en recepció, per a les seqüències GA1 - 5, 18, 19 i 20 -, i per a les seqüències GA2 - 2, 27, 1000 i 1500 -, per als escenaris clàssics -C- (veure taula 2.2), per als escenaris específics -E- (veure taula 7.1) i per als escenaris específics -V- (veure taula 7.1 amb els camins de potència rebuda dels camins secundaris)

ésser un altre motiu de decisió.

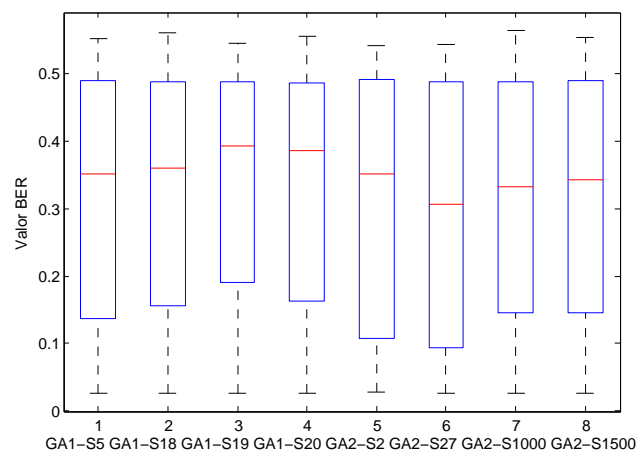


Figura 7.36: Boxplots de la BER avaluat en el camí de màxima potència instantània en recepció, per a les seqüències GA1 - 5, 18, 19 i 20 -, i per a les seqüències GA2 - 2, 27, 1000 i 1500 - on cada columna representa les dades de BER per tots els escenaris i valors de SNR simulats per a una determinada seqüència.

A la figura 7.36 s'observa que són millors les seqüències GA2, 27 i la 1000, pel que fa a termes de BER. S'observa amb claredat perquè els valors del BER d'aquestes dues seqüències GA2 arriben a 0.1 en el quartil inferior, mentre que els valors del mateix quartil per a GA1 són més alts, entre 0.1 i 0.2. També la mediana és més bona per a les seqüències GA2, en alguns casos, amb diferències substancials de 0.07. Malgrat tot, cal comentar que els valors globals de BER són dolents, evidencia que les transmissions són complicades a nivell de detecció de dades.

Finalment, només resta veure els resultats comparatius del BER amb l'estructura RAKE dissenyada. Es verificarà en aquests resultats una lleugera millora respecte als valors de BER presentats a les figures 7.35 i 7.36. Amb l'estructura RAKE es proposa fer un seguiment dels camins de forma dinàmica, considerant sempre un camí principal i la resta de camins com a secundaris (veure secció 5.7), però sense forçar que el camí principal sigui el primer. A la figura 7.37 s'observen els resultats.

A la figura 7.37 s'observen els resultats de BER comparatius, separant l'anàlisi per seqüències, entre mètodes i compilant els errors de detecció per tots els escenaris simulats i tots els valors de SNR. Es pot observar que el mètode RAKE per a les seqüències GA1 millora la BER lleugerament en totes les seqüències provades, però on millora de forma més clara és amb les seqüències GA2. Aquestes segones seqüències són les que presenten - altra vegada - millors resultats en tots els escenaris integrats per a totes les SNR. Mal-

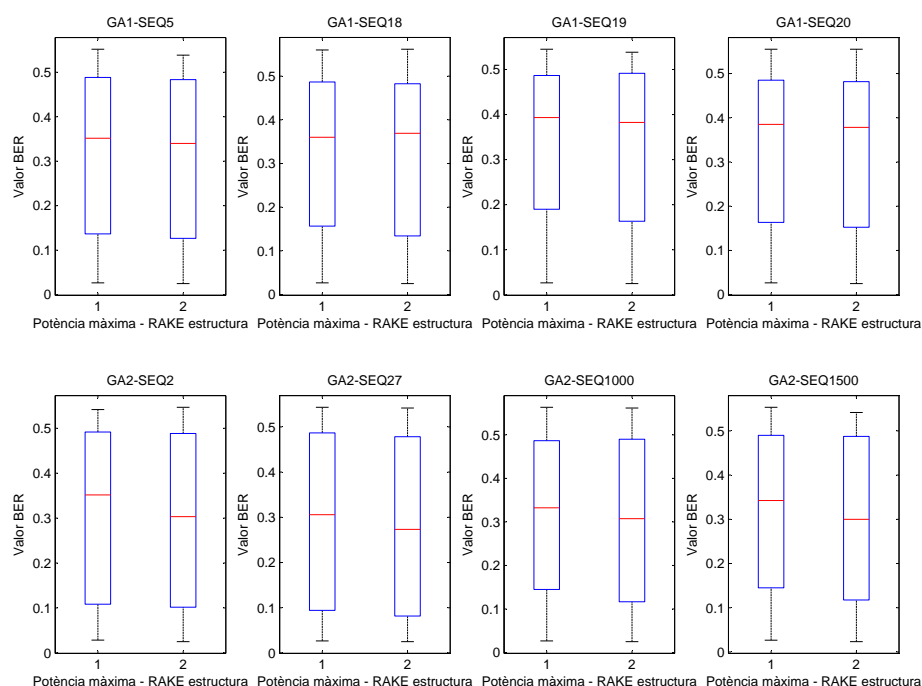


Figura 7.37: Boxplots de la BER avaluat a partir de la detecció basada en el camí de màxima potència instantània en recepció en comparació amb la BER avaluada amb l'estructura multiresolutiva amb un RAKE per a 3 camins com a màxim, per a les seqüències GA1 - 5, 18, 19 i 20 a la primera fila -, i per a les seqüències GA2 - 2, 27, 1000 i 1500 a la segona fila - per a tots els escenaris integrats. Cada columna representa la situació d'observar la BER només en el camí de màxima potència, o la BER assumint el funcionament del detector RAKE.

grat això, cal dir que la diferència de BER entre la detecció basada en el camí de potència màxima i el basat en l'estructura RAKE de guany constant és clara en tots els casos, però no molt gran. Aquesta millora del RAKE respecte al camí de màxima potència s'explica perquè en algun moment puntual el camí de màxima potència pot produir-se per excés de soroll, o per una mala SNR degut a algun *fading* [Sk188]. Si el creixement de potència és degut a un moviment dels camins, el sistema d'adquisició farà un seguiment d'aquest moviment i canviarà les posicions on es començarà a desmodular, per tant, serà suficientment dinàmic per a seguir els canvis del canal. Si en canvi, el camí de màxima potència creix momentàniament només per soroll, el RAKE té en compte l'adquisició correcta i desmodula millor que no pas el primer.

En l'apartat 7.5 es fa un anàlisi comparatiu amb blocs de dades més grans a on es podrà veure amb més claredat el mateix tipus de conclusions aplicades en aquest punt sobre la

BER.

Les millors seqüències GA De totes les simulacions i mesures realitzades fins ara n'extraïem que les millors seqüències en termes de BER són les GA2, i dins d'aquestes, la 27 i la 1000. Dins de les GA1 les dues millors (lluny de les GA2) són respectivament la seqüència 5 i 18. D'aquestes dades, juntament amb les obtingudes de l'adquisició i del *tracking*, es dedueix que la millor de les seqüències GA1 (entenen millor com aquella que presenta els resultats més anivellats) és la seqüència 18, i de les seqüències GA2 és la seqüència 1000. Alhora, també són les que presenten millor *fitness* en els termes avaluats a l'apartat 6.6.3. Per tant, aquesta avaluació ens legitima a escollir-les a partir d'ara per a realitzar les proves comparatives de resultat que es presenten en l'apartat 7.5 d'aquest treball.

7.5 Resultats de funcionament comparat

A continuació es detallen els resultats de la comparativa de funcionament entre l'estructura multiresolutiva que proposa aquest treball de tesi, amb l'estructura multiresolutiva original de Moran [Mor01], i amb les estructures adaptatives de Mohamed El-Tarhuni [ET97] i de Takki Yu [HYKH06]. En primer lloc, a l'apartat 7.5.1, es mostra un resum de les comparacions i adaptacions que ha calgut fer dels diferents algorismes usats com a referència. Cap d'ells no està pensat per a fer transmissions en un canal antàrtic de llarga distància, i per aquest motiu alguns dels paràmetres d'aprenentatge dels filtres adaptatius han estat adaptats al nou entorn de treball. D'aquest apartat s'escullen els esquemes amb millor funcionament, i es procedeix a comparar el millor algorisme de Takki i de El-Tarhuni amb l'estructura original de Moran [Mor01] i la proposta actual d'estructura. Els resultats de les simulacions s'han mesurat tal i com ja es va definir al capítol 5 en l'apartat 5.10.1.

Els resultats de les proves que es mostren a continuació no detallen els costos computacionals de cada un dels algorismes. Es tracta d'un càlcul complicat, puix que no en tots els anàlisis dels símbols els algorismes es comporten de la mateixa manera. Malgrat aquesta complexitat, se n'ha realitzat una aproximació a la taula J.1 de l'apèndix J. Amb la informació que allí s'hi proporciona s'observa que l'algorisme menys costós és el proposat per El-Tarhuni [ET97] (amb unes condicions de filtrat concretes que es fixaran a continuació - veure 7.5.1), seguit del de Takki [HYKH06] (també amb uns paràmetres concretes), del de Moran [Mor01] i finalment l'estructura multiresolutiva millorada - Ralsina -, sempre i quan no es consideri l'estalvi de cost computacional definit en l'apartat 7.4.1. Malgrat aquest ordre creixent de cost, tots els algorismes es troben en el mateix ordre de magnitud,

les desenes de *ms*. Els resultats que es mostren a continuació, però, parlen de la qualitat de l'adquisició i la detecció, i caldrà considerar el cost i la qualitat dels resultats per a fer una valoració adequada de cada algorisme.

7.5.1 Ajust previ pels esquemes de El-Tarhuni i Takki

Per tal de poder presentar uns bons resultats d'adaptació en els escenaris de simulació tractats (veure taula 2.2) caldrà veure com es comporten els esquemes de El-Tarhuni (vist amb detall a l'apartat 4.1) i de Takki (vist a l'apartat 4.3) usant els dissenys originals publicats pels seus autors. Com que els paràmetres d'ajust no van ésser dissenyats per a treballar en un entorn com el canal ionosfèric antàrtic, i per extensió, en els escenaris de simulació provats en aquest treball de tesi cal realitzar un ajust abans de procedir a la comparativa. S'han realitzat aquestes proves preliminars d'anàlisi sobre blocs de dades simulades de 2500 símbols.

Per tal de garantir-ne la convergència, s'ha realitzat un estudi comparatiu del funcionament dels algorismes en els escenaris Rayleigh provats. A la figura 7.38 s'observa els resultats comparatius de la probabilitat d'adquisició (resultats en tant per u) en els quatre escenaris simulats (veure escenaris a la taula 2.2), usant la seqüència GA1 (número 18) i la seqüència GA2 (número 1000). Es mostren tan sols els resultats comparatius de l'adquisició malgrat que s'han avaluat també el *tracking*, el temps d'adquisició i la BER, perquè tots els resultats es mostraven coherents amb aquesta primera mesura.

A la figura 7.38 es mostren, doncs, els resultats de comparar les configuracions de l'algorisme de El-Tarhuni [ET97] següents: assumint una finestra d'avitjament de $S = 10$ (que és la que proposa el treball de El-Tarhuni, indicada amb MET $S=10$), o bé una finestra de $S = 20$ (proposada per nosaltres, assumint que amb la variabilitat del canal i l'elevat soroll, pot ésser necessari un avitjament més ampli, indicada amb MET $S=20$), també un algorisme amb una finestra de $S = 20$ i una correcció del valor del paràmetre de convergència del *tracking* (s'ajusta al valor de μ_{trac} definit per l'estructura multiresolutiva millorada $\beta = 0.0001$, indicada com a MET $S=20$ $\mu = 0.0001$). En aquests tres esquemes la longitud del filtre ha estat la mateixa longitud dels filtres de Moran [Mor01] i de l'estructura millorada, és a dir, la longitud de la seqüència PN dividida per 4 (en aquest cas, una longitud de 32). Finalment, un últim esquema amb una finestra de $S = 20$, els paràmetres de convergència originals, però la longitud del filtre s'ha fixat a 128, que és la mateixa que la longitud de la seqüència PN (a la figura 7.38 es mostra com a MET $S=20$ Complet). L'objectiu de fixar aquests valors ha estat trobar la configuració per a adaptar-se millor

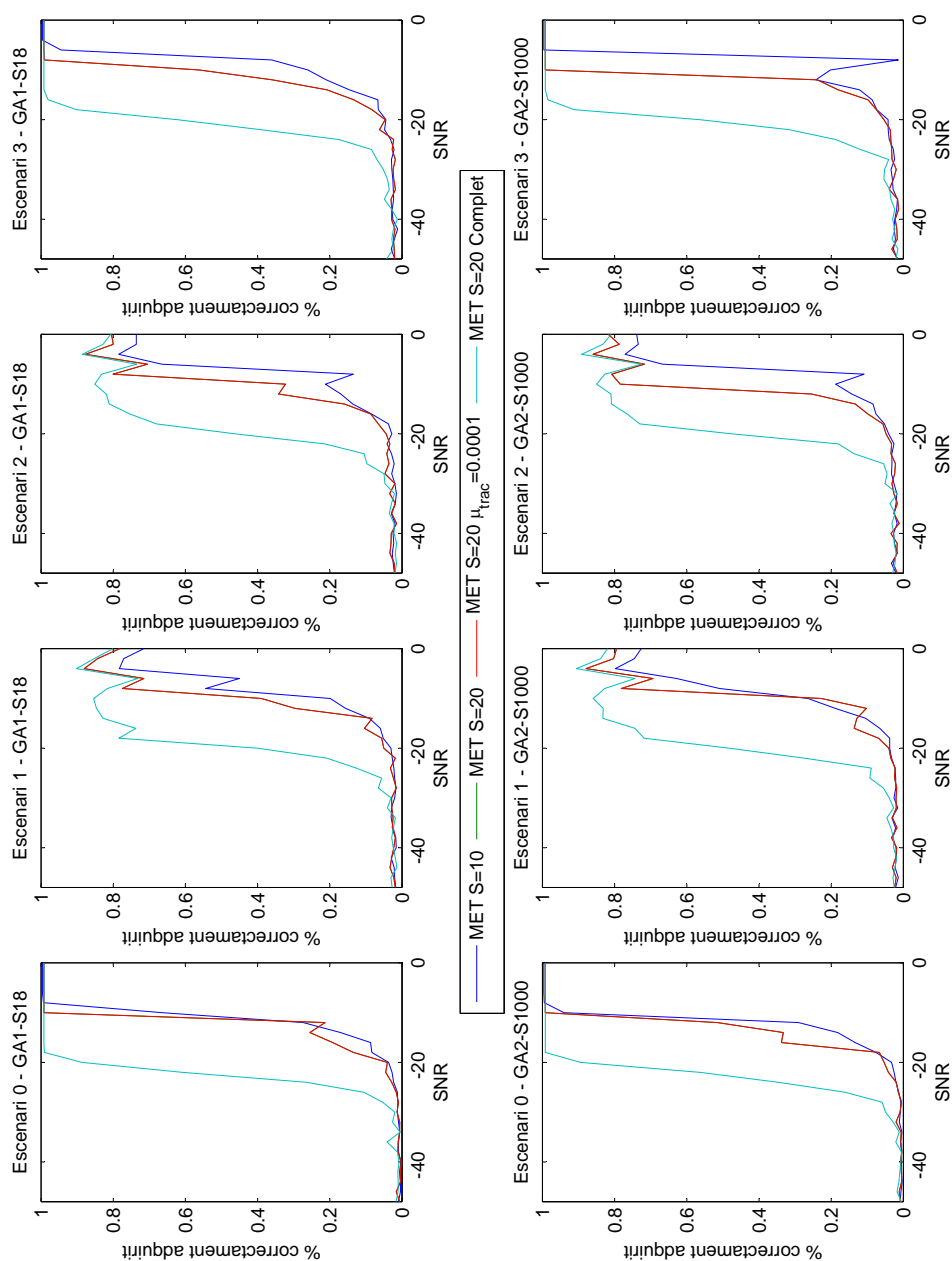


Figura 7.38: Tant per u d'estar correctament adquirits per a cada seqüència GA1-18 i GA2-1000 per als escenaris clàssics (veure taula 2.2) en el cas El-Tarhuni [ET97]. Es mostren quatre resultats: el cas MET quan la finestra és $S=10$, el cas MET amb la finestra $S=20$ i el cas MET amb la finestra $S=20$ i el paràmetre $\mu_{trac} = 0.0001$ - els seus resultats es mostren solapats en els resultats, i finalment el MET amb una finestra de $S=20$ però amb un filtre complet, que abasti tota la longitud de la seqüència PN.

als escenaris de simulació, alhora que comparar amb sistemes que siguin comparables en complexitat i de funcionament a la proposta pròpia.

En el cas de tenir filtres de longitud 32, són iguals que els que disposem a l'estructura i per tant, el seu cost computacional és equivalent. En el cas de tenir el filtre de longitud 128, el cost és molt més elevat, però garantim la convergència del filtre en un punt o un altre, perquè s'abarca tota la possibilitat d'un símbol. Per tant, aquesta última opció la contemplarem com la que ha de funcionar millor, malgrat que aquest extrem ens ho han de dir els resultats. I efectivament, si s'observa la figura 7.38, es pot comprovar un conjunt d'evidències. Primer, que l'algorisme de El-Tarhuni amb una finestra de $S = 10$, que és la que fixava el propi autor per les seves condicions de canal, és la que funciona pitjor. Amb uns resultats lleugerament millors trobem l'algorisme amb una finestra de $S = 20$, independentment de si s'usa el seu ajust original o l'ajust corresponent a l'escenari simulat (cal dir que la única diferència és el paràmetre de convergència del filtre de *tracking*). I finalment, el millor dels algorismes derivats de El-Tarhuni és el que usa una longitud de 128 mostres del filtre, perquè té una convergència molt més clara al punt correcte d'adquisició. Es prendran, doncs, aquests dues últimes aproximacions per a fer la comparativa final.

Es mostren també dels resultats d'ajust per a l'estructura proposada per Takki [HYKH06] a la figura 7.39. En aquest cas el sistema de Takki s'ha ajustat per assemblar-lo al màxim a l'estructura multiresolutiva, tal i com ja s'havia fet també per el cas d'El-Tarhuni. S'han dissenyat 4 filtres de longitud 32 de tal forma que col·locats un darrere de l'altre, conformin la longitud total de la seqüència PN. D'aquesta manera el cost computacional de l'estructura de Takki i l'estructura multiresolutiva són del mateix ordre de magnitud. També d'aquesta manera la convergència està més garantida, puix que es té en compte tots els valors possibles dins d'un temps de símbol.

Vist aquest raonament, s'ha ajustat l'algorisme de Takki en primer lloc a una finestra d'avitjament de $S = 10$ i un paràmetre $\mu = 0.04$, que són les propostes originals dels autors (s'indica com a Takki $S=10$). És l'ajust que presenta pitjors resultats. Tot seguit, s'ha ajustat la finestra d'avitjament a $S = 20$ (que s'indica com a Takki $S=20$), variant els paràmetres de convergència dels filtres: en el primer cas, fixant $\mu = 0.0001$ (anomenat com Takki $S=20$ i $\mu = 0.0001$), i acte seguit, fixant $\mu = 0.0001$ i $\beta = 0.0001$ (anomenat com Takki $S=20$ i $\mu = \beta = 0.0001$), que són uns valors més propers als usats per a l'estructura multiresolutiva i en l'entorn de simulació ionosfèric. Aquesta variació dels paràmetres de convergència pràcticament no afecta els resultats finals d'adquisició - ni els de *tracking*, ni de la BER - i es demostra altra vegada que el que més influeix és la finestra d'avitjament $S = 20$. Ens quedarem amb l'algorisme convergit a $S = 20$ i el mateix però fixant $\mu =$

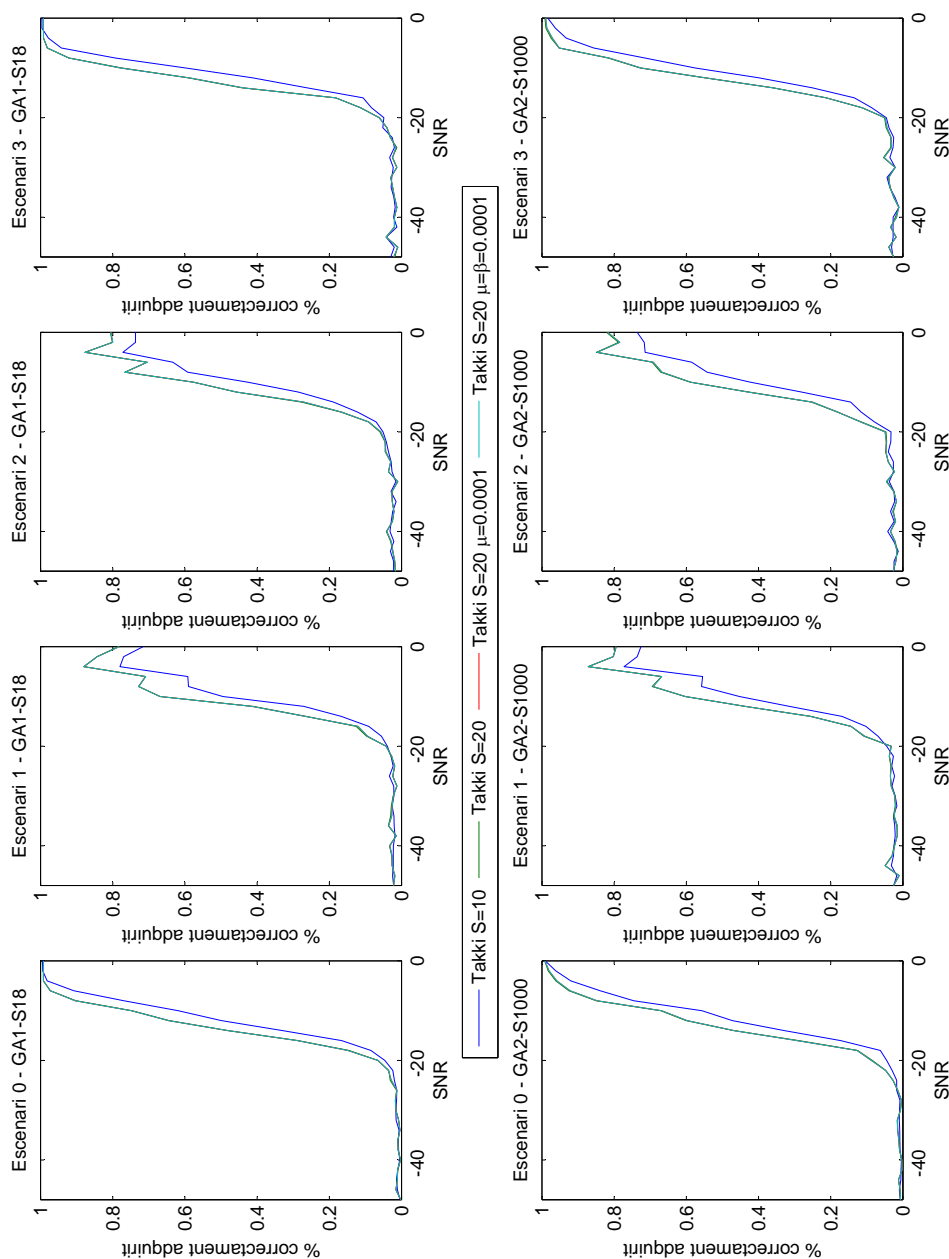


Figura 7.39: % d'adquisicions correctes per a cada seqüència GA1-18 i GA2-1000 per als escenaris clàssics (veure taula 2.2) en el cas Takki Yu [HYKH06]. Es mostren quatre resultats: el cas Takki quan la finestra és $S=10$, el cas Takki amb la finestra $S=20$ i el cas Takki amb la finestra $S=20$ i el paràmetre $\mu_{trac} = 0.0001$, i finalment el cas Takki amb una finestra de $S=20$ però amb $\mu = \beta = 0.0001$ - els tres resultats es mostren solapats en els resultats.

0.0001, que dins de la poca diferència que hi ha amb el tercer amb la mateixa finestra S , són els que presenten uns resultats lleugerament millors.

D'altra banda, acabat aquest ajust, cal aclarir que engrandir la finestra d'avitjament seria una solució per tal de poder fer l'adquisició més robusta en l'entorn dels escenaris de simulació (veure taula 2.2). Però també cal tenir present que tota expansió d'aquesta finestra és un augment en el temps d'adquisició, especialment de la primera de les adquisicions, tal i com es podrà observar a l'apartat del còmput dels temps. Un altre dels elements que ha calgut ajustar en totes les proves ha estat el paràmetre ϵ llindar. El valor proposat tant per El-Tarhuni [ET97] com per Takki [HYKH06] no eren vàlids per als escenaris de simulació provats. Ha calgut fer un anàlisi informal basat en la realització d'un escombrat de valors possibles abans de definir un llindar a partir del qual s'assumeix que el sistema està adquirit (recordar l'avitjament que ha de superar el llindar a l'apartat 4.3). Aquest paràmetre s'ha fixat ad hoc en funció del paràmetre de convergència μ dels filtres adaptatius, com de la longitud de la finestra d'avitjament S . Només després d'aquests ajustos s'han pogut presentar resultats.

7.5.2 Comparació en termes de % d'adquisició i de *tracking*

A la figura 7.40 podem observar la comparativa entre els sis algorismes comparats en termes de % d'adquisició correcta. Cal recordar que es comparen l'algorisme proposat en aquest treball de tesi (anomenat Ralsina), la proposta de Moran (anomenat Moran), la proposta de El-Tarhuni amb $S=20$ (anomenada MET $S=20$), la proposta de El-Tarhuni amb $S=20$ i amb longitud completa (anomenada MET $S=20$ Complet), la proposta de Takki amb $S=20$ (anomenada $S=20$), i finalment la proposta de Takki amb $S=20$ $\mu = 0.0001$ (anomenada Takki $S=20$ i $\mu = 0.0001$). Els resultats es presenten en tant per u, i les proves han estat realitzades en aquest cas sobre els escenaris de simulació clàssics (veure taula 2.2), i usant per una banda la millor de les seqüències GA1 (seqüència 18) i la millor de les seqüències GA2 (seqüència 1000). L'estructura multiresolutiva (anomenada a les gràfiques com Ralsina) presentada millora els resultats en tots els casos possibles: en els quatre escenaris i també en totes dues seqüències provades. Malgrat que és complex realitzar una gradació de qualitat dels algorismes en l'ús d'aquestes seqüències i en aquests escenaris, hi ha un dels esquemes que destaca per sobre dels altres cinc: l'evolució de l'estructura de El-Tarhuni, en el seu cas particular d'avitjament de 20 mostres i un filtre complet (és a dir, de longitud igual a la seqüència PN) és la segona millor en gairebé totes les proves realitzades. La interpretació d'aquest resultat és senzilla: el filtre de longitud igual a la seqüència PN abasta totes les posicions possibles d'adquisició, i li afecta poc - més o menys com a

l'estructura multiresolutiva millorada - la variabilitat de símbols transmesos. És per això que destaca sobre tota la resta d'algorismes.

Tot seguit, en pràcticament tots els escenaris provats, especialment millor en el cas de les seqüències GA2, es troba l'esquema de Moran⁵, seguit de prop de l'estructura de Takki amb un amitjanament de 20 mostres i una preconvergència del filtre a $\mu = 0.0001$. Convé que aquests resultats no ens siguin enganyosos: no estem parlant de que la proposta de Takki presenti els pitjors resultats entre els quatre sistemes. En realitat, els pitjors resultats els presenta l'algorisme de El-Tarhuni amb un filtre adaptatiu que sigui una quarta part de la longitud de la seqüència; i tot seguit vindrien en estricta competició l'algorisme de Moran i el de Takki. El que succeeix és que amb l'adaptació abans comentada dels algorismes, s'han millorat les prestacions d'alguns d'ells a costa d'augmentar-ne el cost computacional. El cost computacional de Moran i de Takki són molt semblants a la nova estructura multiresolutiva. No és així en el cas de l'algorisme d'El-Tarhuni amb la seqüència llarga, que té un cost computacional força més gran (el filtre adaptatiu és quatre vegades més llarg).

A continuació, a la figura 7.41 es mostren els resultats del % que el *tracking* és correcte per a les sis estructures. Els resultats s'assemblen força a la figura anterior (veure figura 7.40), lleugerament empitjorats respecte a les posicions d'adquisició en tots els esquemes possibles. Tal i com ja s'ha comentat en anteriors ocasions el motiu és que el *tracking* convergeix després que ho faci l'adquisició, i quan el sistema de control de cada un dels algorismes convergeix aleshores li dona pas. Per això sempre hi ha una pèrdua més gran de símbols respecte a la posició correcta d'adquisició. Si no hi hagués la validació intermèdia del control, probablement la convergència del *tracking* seria més ràpida en el cas de que l'estimació de l'adquisició fos correcta, però si no ho fos, la falsa alarma seria impossible d'evitar. En aquest sentit, pren cert avantatge en el marge d'entre [-20,-25]dB l'algorisme de El-Tarhuni amb un filtre de longitud igual que la seqüència PN. En aquest cas, la incertesa al respecte de l'adquisició és mínima, puix que només hi ha un sol valor que cal observar, que és el màxim del filtre adaptatiu únic. La informació es proporciona a la fase de *tracking* amb més celeritat i així ho mostren els resultats. Cal recordar, però, que es tracta d'un algorisme d'elevat cost computacional, força més que els altres cinc simulats.

D'altra banda, convé també comentar que ni en adquisició ni en *tracking* hi ha diferències significatives entre la seqüència GA1 (la seqüència 18) i la seqüència GA2 (la

⁵En les seqüències GA1 cal tenir present que les subseqüències s'assemblen entre elles, i l'algorisme de Moran no disposa de l'estructura RAKE per tal d'interpretar quina és la millor de les solucions possibles en cada cas. Probablement aquest sigui el motiu de la falsa alarma continuada en les seqüències GA1, puix que en les GA2 no succeeix.

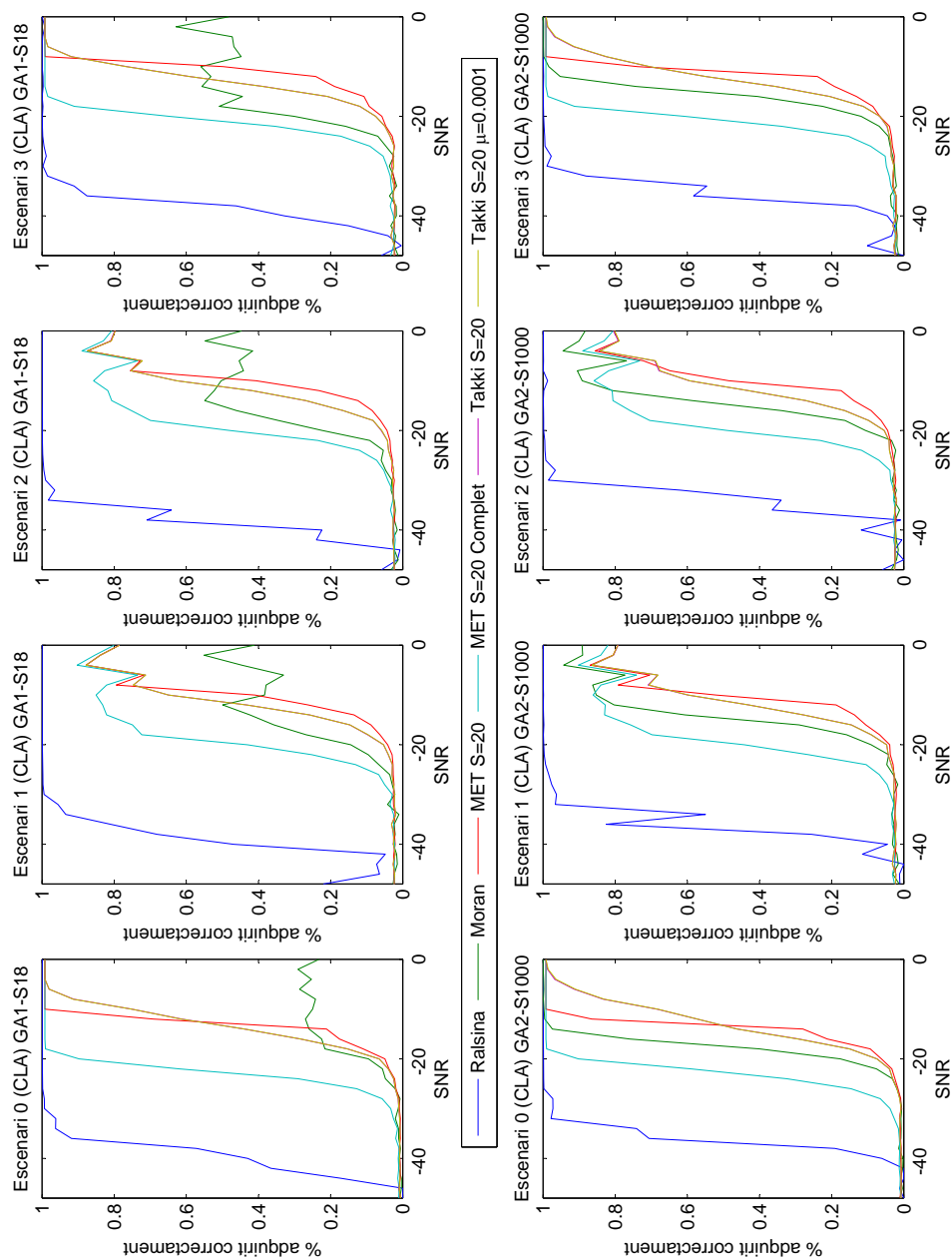


Figura 7.40: % d'adquisicions correctes per a cada seqüència GA1-18 i GA2-1000 per als escenaris clàssics (veure taula 2.2). Es mostren els resultats per el cas Ralsina, el cas Moran, el cas MET amb finestra $S=20$, el cas MET amb finestra $S=20$ amb un filtre complet, i finalment el cas Takki amb finestra de $S=20$ i l'últim dels casos, cas Takki amb $S=20$ i $\mu = 0.0001$ - aquests dos últims presenten els mateixos resultats.

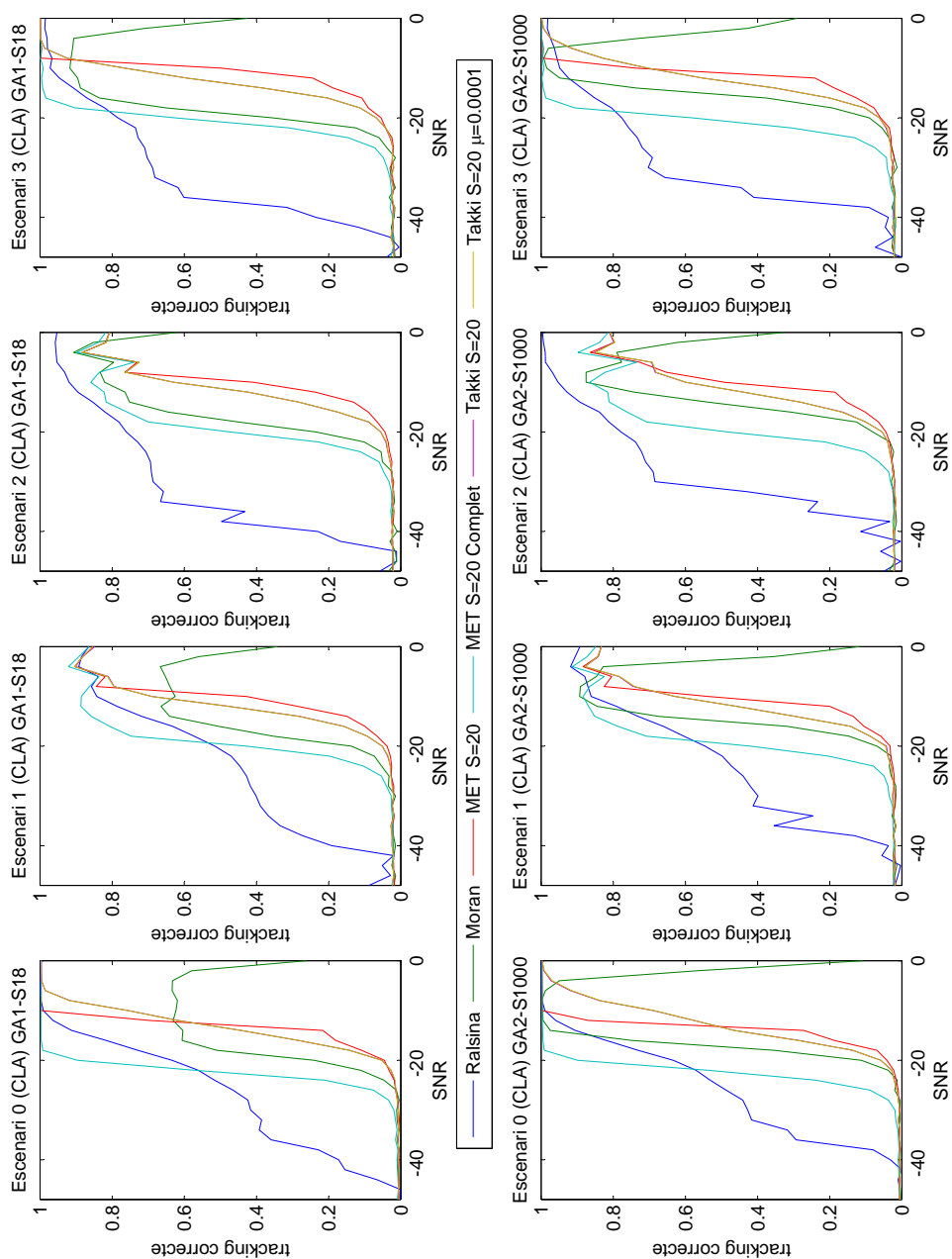


Figura 7.41: Tant per u de posicions de *tracking* correcte per a cada seqüència GA1-18 i GA2-1000 per als escenaris clàssics (veure taula 2.2). Es mostren els resultats per el cas Ralsina, el cas Moran, el cas MET amb finestra $S=20$, el cas MET amb finestra $S=20$ amb un filtre complet, i finalment el cas Takki amb finestra de $S=20$ i l'últim dels casos, cas Takki amb $S=20$ i $\mu = 0.0001$ - aquests dos últims presenten els mateixos resultats.

seqüència 1000). Pel que fa només a adquisició la seqüència 18 presenta uns valors lleugerament millors que la seqüència 1000, però els resultats s'anivellen amb els valors del *tracking*.

7.5.3 Comparació en termes de temps que triga en adquirir-se

A continuació es presenten els resultats en termes de temps d'adquisició. És una mesura interessant, malgrat que també molt variable i es mostra clarament a la figura 7.42. El temps que pot trigar un sistema qualsevol a adquirir-se pot anar des d'un sol símbol - si l'adquisició és clara i el sistema és ràpid - fins als 2500 símbols dels que consten aquestes simulacions. I com que el resultat final es tracta d'un amitjanat amb el nombre de vegades que s'adquireix en un bloc de simulació, els resultats no conformen una corba constant. Per tal d'interpretar correctament la figura 7.42, cal tenir clar que s'han retallat els resultats majors de 150 símbols, molts d'ells corresponents a situacions en les que els algorismes no han aconseguit convergir mai. La discussió es centrarà, doncs, en marges de valors menors, que alhora també parlen de possibilitats més grans d'adquisició i desmodulació correctes.

Cal tenir en compte també que per a les estructures de El-Tarhuni [ET97] i Takki [HYKH06], el mateix sistema fixa un paràmetre mínim d'amitjanaments per sota dels quals, en inici, el sistema no es pot declarar com a adquirit. En totes les simulacions mostrades a la figura 7.42 aquest valor val 20. Com que la convergència d'aquests algorismes es mesura amb un còmput de l'error comparat amb un llindar, no es pot realitzar la comparativa abans d'assolir aquest valor. És per això que els resultats d'alguns d'aquests esquemes mostrats fixen el nombre mínim de símbols exhaurits per a la convergència a 20 si només hi ha hagut una sola adquisició - que acostuma a ser així per a valors de SNR propers a zero - però alhora, es dona la paradoxa que quan empitjora la SNR i per un marge reduït de dB, el temps d'adquisició millora. Això es dona perquè de cop i volta, ha succeït que en un sol bloc de dades s'han donat dues o més adquisicions. Per les adquisicions següents no caldrà esperar a tenir 20 mostres de mesura, perquè ja se'n disposen, i per tant, poden realitzar-se amb menys temps. Aquest valor, però, empitjora ràpid, a mesura que també empitjora la SNR.

Observant els resultats de la figura 7.42, el valor mínim de temps mig d'adquisició el presenta l'estructura multiresolutiva millorada amb diferència, fins a valors de SNR suficientment dolents (≈ 30 dB) com perquè l'estructura no arribi a convergir. El següent valor de temps mig en termes d'eficiència d'adquisició el presenta l'estructura de El-Tarhuni

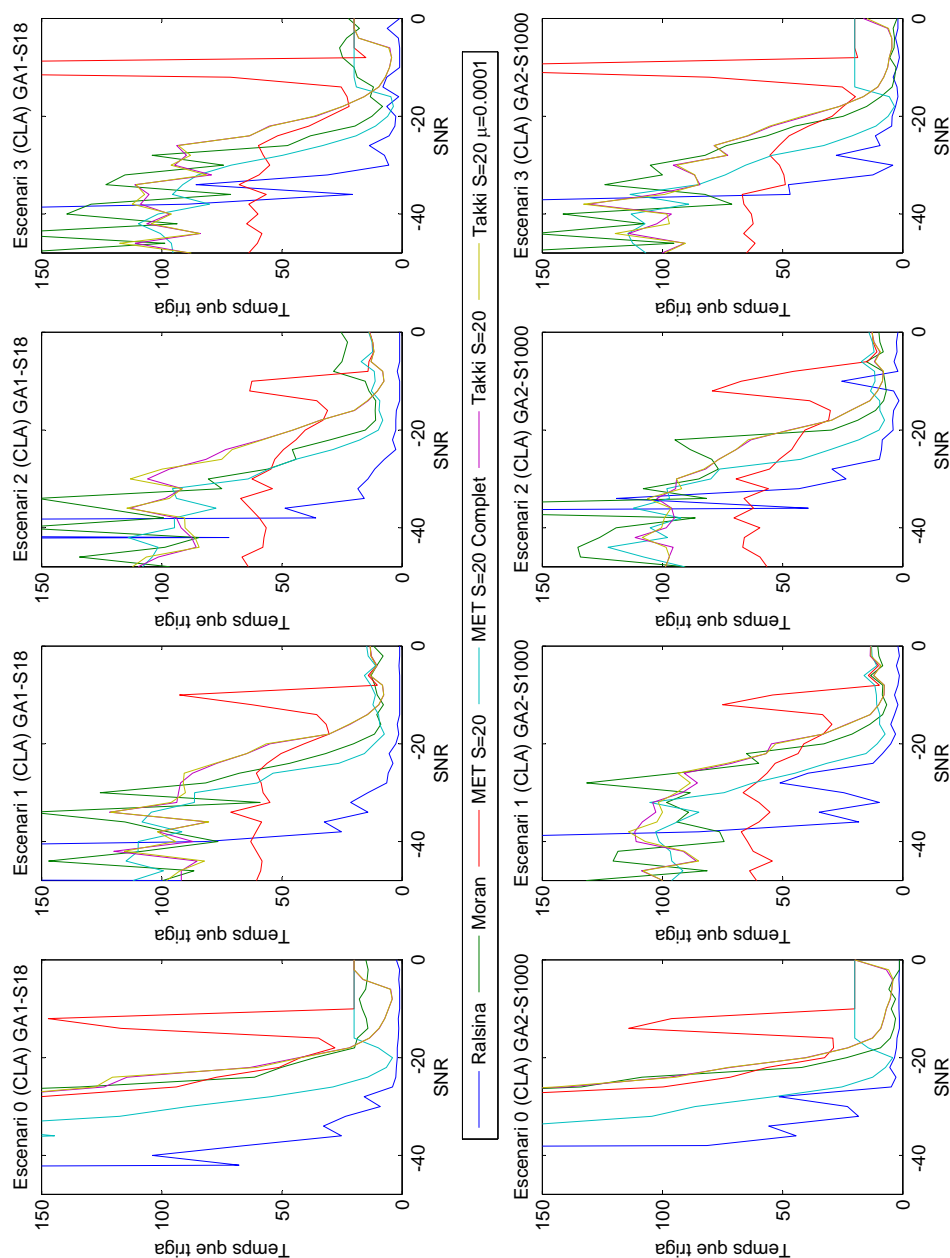


Figura 7.42: Temps que triguen a adquirir-se els algorismes per a cada seqüència GA1-18 i GA2-1000 per als escenaris clàssics (veure taula 2.2). Es mostren els resultats per el cas Ralsina, el cas Moran, el cas MET amb finestra $S=20$, el cas MET amb finestra $S=20$ amb un filtre complet, i finalment el cas Takki amb finestra de $S=20$ i l'últim dels casos, cas Takki amb $S=20$ i $\mu = 0.0001$ - aquests dos últims presenten els mateixos resultats. En aquest cas, l'eix OY es mesura en símbols mitjos que triga a adquirir-se.

funcionant amb un sol filtre adaptatiu de la longitud de la seqüència PN (MET S=20 Complet). Immediatament després es disputa el temps l'estructura multiresolutiva original de Moran [Mor01] i l'algorisme de Takki [HYKH06]. L'estructura de El-Tarhuni amb un filtre més petit (MET S=20) queda lluny dels valors dels temps d'adquisició dels sistemes anteriors.

7.5.4 Comparació en termes de BER

Finalment, la figura 7.43 mostra els valors de BER en recepció per a les sis estructures implementades. En primer lloc, cal aclarir que la BER mesurada és sobre un fitxer de 2500 símbols totals, per tant, hi ha un error remanent de la primera adquisició que no es pot eludir. D'altra banda, també cal dir que no s'ha aplicat cap tipus de codi corrector d'errors en el canal, i que per tant, la BER final seria millor si n'hi hagués algun d'implementat (en la mesura de la del guany del codi usat).

En la figura 7.43 s'observa que en termes de BER el millor comportament el presenta l'estructura multiresolutiva millorada (anomenada Ralsina en les gràfiques), seguit de l'algorisme d'El-Tarhuni, que fins i tot en algun escenari concret (Esc0) millora els resultats de Ralsina per entorns de SNR al voltant de -20dB. El BER, igual que la majoria dels resultats anteriorment presentats, segueix en valors per l'algorisme de Moran [Mor01] i de Takki [HYKH06].

En aquest cas, i malgrat que les diferències no són molt grans, sí que són suficientment significatives com per destacar-les. El BER associat a la seqüència GA2 presenta millors resultats que l'associat a la seqüència GA1, especialment en el cas de Ralsina.

7.5.5 Comentaris finals

De les proves realitzades comparant els quatre algorismes (malgrat que s'ha usat més d'una variant per a El-Tarhuni [ET97] i per a Takki [HYKH06]) se n'extreu que el que presenta millors resultats - en alguns casos molt clarament - és l'estructura multiresolutiva millorada (proposta Ralsina en les gràfiques). Cal, per ser justos, recordar que la proposta millorada funciona amb un RAKE en la desmodulació que recombina l'energia dels tres camins més energètics amb l'estratègia del guany constant, i amb un sistema difús de control. L'anàlisi del cost computacional - molt millorat per l'acció del control difús - no es mostra en aquests resultats finals per la diversitat de càrregues computacionals dels diferents sistemes; el sistema de El-Tarhuni presenta un cost força menor en les condicions que proposa [ET97] i força major en la condició de treball d'un filtre de longitud igual a la

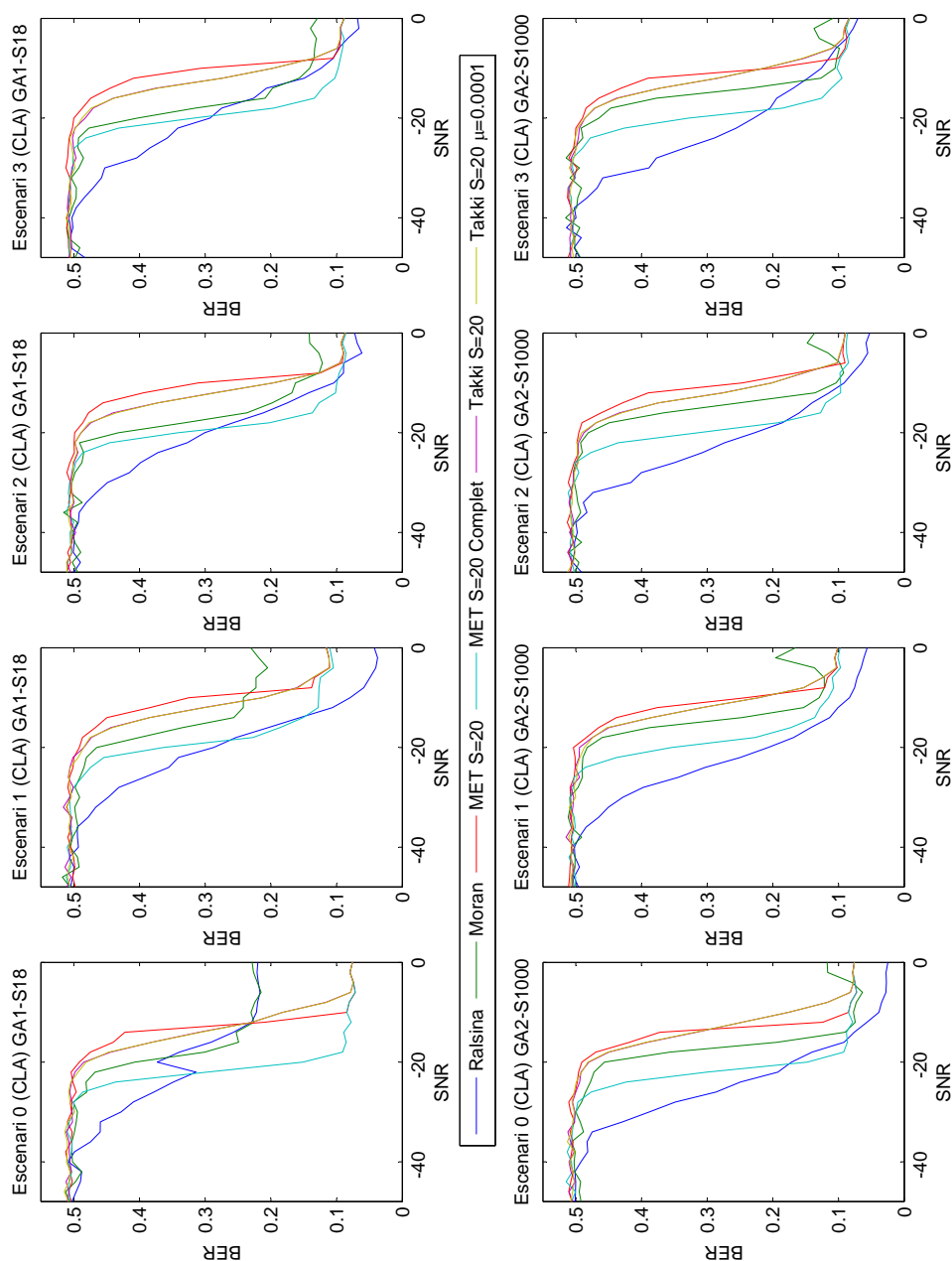


Figura 7.43: BER de la detecció en cada seqüència GA1-18 i GA2-1000 per als escenaris clàssics (veure taula 2.2). Es mostren els resultats per el cas Ralsina, el cas Moran, el cas MET amb finestra $S=20$, el cas MET amb finestra $S=20$ amb un filtre complet, i finalment el cas Takki amb finestra de $S=20$ i l'últim dels casos, cas Takki amb $S=20$ i $\mu = 0.0001$ - aquests dos últims presenten els mateixos resultats.

seqüència PN. Per tant, és raonable que els resultats de BER i de temps d'adquisició, així com els % d'adquisició i *tracking* de l'estructura que usa un filtre més llarg, apareixin força millorats respecte a la resta. Malgrat això, i observant els resultats presentats al capítol 5, les millores realitzades abans de la implementació del control i del detector RAKE ja feien que l'estructura millorada presentés resultats significativament millors que l'estructura original de Moran [Mor01].

D'altra banda, és de justícia plantejar-se perquè en alguns casos, tant l'estructura d'El-Tarhuni [ET97] com la de Takki [HYKH06] no presentin bona convergència per a SNR no dramàticament baixes. Com a resposta, i després d'observar-ne el comportament, es conclou que ni un sistema ni l'altre no estan dissenyats pensant en la delmació com ho està l'estructura multiresolutiva. Per tant, la optimització a la que s'han sotmès respectivament les seqüències GA1 i GA2 no afavoreixen per a res a aquests dos algorismes, malgrat que d'entrada tampoc no els han de perjudicar. Com a proposta per a la seva millora en termes de seqüències GA caldria optimitzar la correlació creuada entre subseqüències, enteses en aquest cas com a una part de la seqüència, no com la seqüència delmada. És possible, doncs, que l'autocorrelació o la correlació creuada en la fracció de seqüència que s'ha pres per a simular aquests dos esquemes no fos la òptima o fins i tot que presentés probabilitat d'equívoc per algun màxim lateral de l'autocorrelació. Alhora, al tractar-se de sistemes que no funcionen amb la filosofia RAKE - tot i que també hi seria adaptable, a un determinat cost computacional - és possible que en alguns escenaris amb camins secundaris amb força presència s'hagi provocat l'error del sistema d'adquisició, fent que es mantingui adquirit en un màxim local en comptes d'un màxim global.

Per acabar, fer notar també que tant el sistema de Moran [Mor01] com l'estructura multiresolutiva millorada presenten un avantatge molt clara respecte als altres dos sistemes, i que s'observa amb claredat a la figura 7.42. El fet que tant el sistema de El-Tarhuni [ET97] com el de Takki [HYKH06] necessitin de comparació amb un llindar provoca dues situacions: en primer lloc, que si l'adquisició és bona, el sistema està dissenyat per a esperar un determinat nombre de símbols en inici de trama, i això en alguns casos pot ser una pèrdua estèril de dades. I en segon cas, que es troben lligats a les condicions de canal. Per exemple, en el cas que ens ocupa, s'ha hagut de reavaluar els llindars que s'han usat per a l'adquisició, però arribat un determinat valor de SNR aquests ja es confonen amb el soroll, no tenint clar el que està succeint amb la possible adquisició. En aquest sentit, l'estructura multiresolutiva té un avantatge ja de disseny; sempre escollirà la posició que sigui més probable d'adquisició, i no farà referència a cap valor residual que pugui confondre's amb el nivell de soroll del canal.

7.6 Conclusions

En aquest capítol s'han exposat els passos seguits per tal de dissenyar el controlador difús en un entorn ionosfèric, com s'ha usat en l'estructura global i finalment, també s'han realitzat les proves de l'estructura RAKE descrit a l'apartat 5.7. Els objectius bàsics d'aquest capítol es centren en disminuir el cost computacional de l'estructura, donar fiabilitat a les dades desmodulades i alhora, millorar la BER en detecció mitjançant l'ús de diversitat multicamí en recepció amb un detector RAKE. Seguint els càlculs mostrats en l'annex J, s'ha demostrat com a prova de concepte que el disseny del sistema difús economitza el cost computacional a canvi d'un increment del cost mitjà comparable als altres sistemes de control de les altres propostes.

En primer lloc, es detalla una primera aproximació del sistema difús a l'apartat 7.2. En aquest punt es fa el primer disseny difús per a adaptar-se a un canal amb soroll blanc i gaussià, però amb variacions instantànies de SNR (amb esvaïments molt ràpids). D'aquesta prova de concepte, amb els seus resultats publicats [AMS09], se n'extreu un parell de conclusions: en primer lloc, el controlador difús és molt més precís que no pas el control per estabilitat en determinar si el sistema està adquirit o no ho està. La fiabilitat és, doncs, molt més elevada. D'altra banda, no és despreciable l'increment de cost computacional causat al sistema per l'ús d'un sistema de control difús.

En segon lloc, en l'apartat 7.3 es descriu com s'ha ajustat la proposta inicial del controlador difús per al funcionament en un entorn ionosfèric amb multicamí i amb variacions de tipus Rayleigh. S'ha partit de la definició d'unes variables d'entrada, en aquest cas uns ràtios que descriuen amb detall el que estava succeint al canal. La descripció matemàtica d'aquests ràtios es pot observar a l'apartat 7.3.1. Va ser precís un estudi previ acurat per tal de determinar si aquests valors eren suficientment significatius com per portar-nos a conclusions de la situació d'adquisició del sistema en cada moment. Aquests ràtios es calculen a partir dels valors dels filtres adaptatius, per tant, van variant en funció del temps i aporten informació rellevant de com es troba l'adquisició en cada un dels filtres. A partir dels valors que prenen aquests ràtios s'han definit els conjunts difusos d'entrada a l'apartat 7.3.2. Ha calgut també un estudi del seu comportament per a determinar el significat de cada un dels ràtios en cada un dels trams de valors que prenen; a quin tram correspon l'adquisició certa, i en quin punt comença la possibilitat d'estar adquirits, però aquesta no està garantida. S'han dissenyat les regles difuses del sistema en base al comportament dels ràtios avaluats i coneixent en cada cas l'adquisició o no adquisició del sistema, que porten a la única variable de sortida (*Acquisition*) a prendre un valor entre zero i la unitat emulant

la probabilitat d'estar adquirits. Finalment, es mostren els resultats per a un canal variant amb adquisició en un sol camí - malgrat el canal sigui multicamí - en l'apartat 7.3.5.

En el punt 7.4 s'ha validat la prova de concepte presentada a l'apartat 7.2. Ha estat possible ajustar un sistema difús per a un entorn dispersiu en temps, i que aquest sistema difús fes un seguiment correcte - excepte per a valors de SNR molt baixos - de l'adquisició de l'estructura multiresolutiva. Això ens ha permès de definir un procediment per tal de reduir el cost computacional del sistema, tot aturant alguns dels filtres adaptatius en recepció quan l'adquisició sigui molt probable segons el sistema difús, i alhora, a engegar un sistema decisional que, usant la probabilitat de falsa alarma que suposa la variable *Acquisition*, activi l'estructura RAKE quan sigui precís. La precisió dels valors de sortida de l'estructura difusa ens fa confiar que no es perdran dades per males estimacions de l'adquisició.

Un cop descrits ja els casos d'aplicació del sistema difús en l'estalvi de cost computacional del sistema, se'n presenten els resultats a l'apartat 7.4.1. S'observa que en funció de quina és la SNR del canal, es pot estalviar més o menys computacional en recepció, avaluat en aquest cas com a temps de càlcul dels filtres adaptatius d'adquisició. Per tal de mantenir en rendiment adequat del sistema multiresolutiu, quan pitjor és la SNR menys estalvi és possible, perquè més indecisió hi ha respecte l'adquisició en el sistema.

També és la variable *Acquisition* que dona pas a l'activació de l'estructura RAKE descrita anteriorment a l'apartat 5.7. L'aplicació del RAKE es detalla en l'apartat 7.4.2; s'avalua en primer lloc, quina de les famílies de seqüències descrites al capítol 6 és millor des del punt de vista del BER. I s'obtenen algunes sorpreses, perquè en el capítol 6 s'obtenia que els millors índex de posició d'adquisició eren sempre - i per una diferència clara - per a les seqüències de la família GA1. En canvi, en termes de BER, hi ha una millora clara d'algunes de les seqüències de la família de seqüències GA2. Es conclou que aquest fet pot ser degut a que aquest conjunt de seqüències que compleix de forma fixada una baixa autocorrelació entre les subseqüències, i per tant, la similitud de la seqüència PN sencera amb sí mateixa és més baixa; en resum, l'autocorrelació de la seqüència sencera és lleugerament millor. És per això que de cara als resultats finals mostrats a l'apartat 7.5 s'han tingut en compte les dues famílies de nou.

Tot seguit, després de la comparativa entre seqüències GA en termes de BER, es realitza una comparativa del BER obtingut per l'anàlisi del camí amb més potència, contra l'anàlisi realitzat sobre el sistema RAKE implementat. Malgrat els resultats no mostren una millora molt gran, la BER és lleugerament millor en el cas de l'estructura multiresolutiva amb el RAKE implementat. Aquests resultats es conclouen del fet que, si l'augment de potència

en un camí és a causa del soroll, l'estructura multiresolutiva segueix proporcionant el punt d'adquisició correcte; i si per contra és a causa d'una variació del canal, l'estructura multiresolutiva anirà convergint cap al nou punt d'adquisició. En canvi, el fet de fixar-se només en la potència màxima augmenta la probabilitat de falsa alarma en la desmodulació. Per tal de validar de forma clara els resultats comentats, les proves finals de comparació s'han realitzat amb un nombre de símbols més elevat, per a comprovar de forma més clara el seu funcionament en règim permanent.

Finalment, a l'apartat 7.5 es mostra la comparativa del disseny incloent ja el nou sistema de control, presentat per a l'estructura multiresolutiva millorada, mesurant la seva qualitat amb l'estructura original de Moran [Mor01], l'estructura adaptativa de El-Tarhuni [ET97] i els subfiltres d'adquisició de Takki [HYKH06]. El primer estudi realitzat ha estat l'anàlisi del funcionament dels diferents algorismes aplicats al model de canal ionosfèric descrit als escenaris de simulació (veure taula 2.2). Aquí s'han ajustat els paràmetres de funcionament per a l'algorisme de El-Tarhuni i de Takki, puix que els valors predeterminats proporcionats en la bibliografia no estan pensats per a un funcionament sobre el tipus de canal ionosfèric en que s'ha treballat en aquesta tesi. Un cop realitzat l'ajust i la selecció dels millors paràmetres, s'ha disposat la competició entre tots els sistemes.

El sistema que presenta millors resultats a nivell global és l'estructura multiresolutiva millorada (proposta Ralsina). Tant en qualitat d'adquisició i de *tracking*, com en temps d'adquisició, com també en BER, presenta els millors resultats pràcticament en la totalitat de les mesures realitzades. Cal recordar, però, que funciona amb RAKE i que per tant, algunes de les mesures és raonable que siguin força millors gràcies a l'aprofitament de la diversitat del multicamí. D'altra banda, però, cal destacar el bon funcionament de l'adaptació de El-Tarhuni [ET97] en el cas de tenir un sol filtre adaptatiu de longitud igual que la seqüència PN. En aquest cas, però, el problema es centra en el cost computacional de l'algorisme.

Cal destacar el gran avantatge que suposa que els algorismes de Moran [Mor01] i l'estructura millorada no necessitin mesurar-se amb cap llindar intern; això els dona més graus de llibertat a la hora de decidir si es tracta d'una situació d'adquisició, no estan subordinats al funcionament del canal en tot moment -almenys no en termes comparatius-. És per això, i per l'ajust de les seqüències GA i del bloc de control difús, que l'estructura multiresolutiva presenta uns resultats clarament millors que els altres esquemes.

També cal destacar que el valor del BER mesurat (veure figura 7.43) presenta valors no acceptables en força valors de SNR (especialment, els intervals més baixos), però que les mesures han estat realitzades sense l'ús de cap codi corrector d'errors, i que per tant,

són millorables. D'altra banda, però, també cal dir que malgrat presentar valors alts de BER, l'estructura multiresolutiva presenta millors valors que la resta de les estructures, treballant en les mateixes condicions de propagació.

Part III

Conclusions

CAPÍTOL 8

CONCLUSIONS I LÍNIES DE FUTUR

A continuació es realitza una valoració de l'assoliment dels objectius d'aquesta tesi doctoral, així com una reflexió sobre els resultats presentats. Alhora, es plantegen algunes línies de treball per a futures implementacions de l'estructura multiresolutiva aplicada al projecte en curs.

8.1 Acompliment d'objectius

A la secció 1.3 d'aquest treball de tesi es detallaven tres grans objectius de treball per a desenvolupar en aquest document. Es revisarà l'acompliment de tots ells amb el major detall possible. En primer lloc, es plantejava com a objectiu el refinament de l'estructura multiresolutiva per al seu millor funcionament, així com la seva adaptació a les noves condicions de canal, tot seguit, el disseny de les seqüències PN (basades en algorismes genètics) i finalment, el disseny d'un control difús per a l'estructura multiresolutiva. Aquests objectius de treball han estat provats en els escenaris de simulació (definites a la taula 2.2), escollits gràcies a l'anàlisi del comportament del canal [Vil07] i que serviran per a validar el disseny realitzat per a les noves condicions de transmissió del canal antàrtic.

8.1.1 Refinament de l'estructura multiresolutiva

Aquest ajust tenia tres punts forts: en primer lloc, el disseny d'un filtre antialiasing (veure secció 5.4.1). S'ha escollit convenientment l'ordre del filtre i la seva amplada de banda

per tal de rebutjar tot aquell espectre que esdevindria solapat un cop s'hagués realitzat la delmació. En les gràfiques demostratives de la secció 5.4.1 es mostra com hi ha una component d'espectre que és necessari filtrar per evitar el solapament. Tot seguit, s'ha ajustat el valor dels paràmetres μ dels filtres LMS adaptatius, i el paràmetre β de velocitat del filtrat *exponential smoothing*. Tant en els resultats sintetitzats que es troben als apartats 5.5.1 i 5.6.2, com a l'apèndix dedicat als resultats complets (veure apèndix C), s'observa que els nous marges de paràmetres obtinguts com a μ i β milloren la resposta de l'estructura multiresolutiva quan aquesta actua en els escenaris de simulació usats (veure taula 2.2). S'ha trobat, doncs, els millors paràmetres μ i β possibles per l'estructura i per el canal d'interès. Cal aclarir que els valors de μ i especialment el valor de β són valors estabilitzadors del comportament del sistema d'adquisició. L'elevada variabilitat que poden presentar els filtres adaptatius LMS convergits a un sol temps de símbol, amb la influència que pot suposar el soroll o el multicamí en el canal s'atenuen en la mesura en que el valor de β escollit és petit. S'observarà més tard que aquest fet facilita molt el disseny d'un sistema de control.

Pel que fa al tercer dels punts forts del capítol 5, les bases de l'aprofitament de la diversitat temporal s'han posat en aquest capítol, en l'apartat 5.7. Malgrat el detall teòric en aquest capítol, la mesura de la millora d'aquesta aportació es realitza al capítol 7, per ser exactes, en l'apartat 7.4.2. I aquests resultats mostren una millora en la BER en el cas d'usar l'estructura multiresolutiva com a receptor RAKE. Per tant, no només s'ha pogut arribar a dissenyar l'estructura RAKE de forma senzilla usant el banc de filtres LMS sinó que s'ha pogut observar la millora que aquest disseny ha suposat en desmodulació. Finalment, hi ha una última millora explicada també en el capítol 5, i és l'ajust del conformador de pols amb un *raised cosine* que es troba a l'apartat 5.9. Cal dir, però, que aquest ajust es realitza sobre les dades enviades, i no sobre l'estructura multiresolutiva. Un dels criteris fonamentals de l'ajust és la relació entre el lòbul central i els lòbuls laterals en la funció del conformador de pols.

Finalment, la integració de tots aquests ajustos es contrasta amb l'estructura multiresolutiva original, de Moran [Mor01]. Els resultats es presenten a l'apartat 5.10.2 en termes simulats, i ja es comprova en els quatre escenaris de simulació que la millora és molt notable respecte a l'estructura original. D'altra banda, però, en l'apartat següent, el 5.10.3, la comparativa es realitza també sobre dades reals del canal antàrtic, de la campanya del febrer de 2008. També en aquest cas els resultats són molt millors: millora el % d'adquisició, i també el de *tracking*, és substancialment millor el temps que el sistema roman adquirit sense pèrdua d'adquisició, així com es redueix el temps que triga en adquirir-se. Una altra de les bones mesures en termes d'estabilitat - malgrat que cap dels dos sistemes funcionen

amb control en aquest cas - és el nombre de vegades que s'adquireix en una seqüència de dades transmises. L'interès és sempre el mínim nombre d'adquisicions i que aquestes siguin molt estables, i aquest objectiu és el que aconsegueix l'estructura multiresolutiva millorada.

En aquest sentit convé destacar alguns dels valors presentats a l'apartat 5.10.2. En les dades simulades, la probabilitat d'adquisició en l'ús de l'estructura multiresolutiva arriba per sobre del 90% fins a -20dB en els casos més favorables (l'escenari 0, per exemple), quan en el cas de l'estructura original de Moran [Mor01] ho fa tan sols fins als -10dB. El comportament en la resta d'escenaris és similar, però disminuint la probabilitat d'adquisició per a SNR millors. Aquesta valoració més molt clara si s'observa el nombre de vegades que s'adquireix en cada una de les proves. D'altra banda, en les proves realitzades sobre les dades reals, també mostra millors resultats l'estructura multiresolutiva millorada. Aconsegueix convergència estable en totes quatre mostres estudiades en inici - a diferència de l'estructura multiresolutiva original [Mor01], que només s'adquireix amb estabilitat en la millor de les seqüències -. En l'estudi posterior de tots els blocs de dades reals, aconsegueix minimitzar distàncies amb el millor punt d'adquisició (cal recordar que és el punt proporcionat per la correlació) en la gran majoria dels blocs respecte a l'estructura original [Mor01], que porten a la conclusió que està adquirit un nombre molt més elevat de vegades. Aquesta millora en la probabilitat d'adquisició es tradueix d'una forma o altra en tota la resta de paràmetres mesurats; el temps que triga a adquirir-se i el nombre de vegades que s'adquireix.

Cal dir que una revisió més detallada de l'acompliment dels objectius de la millora de l'estructura multiresolutiva es dona en l'apartat 5.11, que correspon a les conclusions del capítol 5. En aquest apartat es revisen amb precisió els canvis efectuats sobre l'estructura multiresolutiva de Moran [Mor01] i els efectes que han tingut en la millora d'aquesta per a la seva aplicació en canal ionosfèric.

8.1.2 Disseny de les seqüències GA

Els resultats del disseny de les seqüències PN basades en algorismes genètics (GA) adaptades a l'estructura multiresolutiva es presenten al capítol 6. Es demanava en els objectius de la tesi que per tal de dissenyar les seqüències es tingués en compte, apart de les quatre característiques pròpies de les seqüències PN (balancejat, *run property*, autocorrelació i correlació creuada en el cas de ser una família de seqüències), l'autocorrelació i la correlació creuada de les seqüències delmades. Els requisits detallats de l'estructura es detallen

a l'apartat 6.2. Després de revisar les propostes inicials basades en estratègies evolutives, la proposta final d'algorisme genètic es detalla a l'apartat 6.4. Però el planteig de la solució final es fa per partida doble, usant dues funcions de *fitness* per a trobar la família de seqüències GA; la primera demana la minimització de la correlació creuada mitjana entre subseqüències excepte quan aquestes estan en fase (assumint $\tau = 0$), i la segona demanant una correlació creuada mitjana entre subseqüències mínima, independentment de la fase que presentin. És a dir, les seqüències GA1 poden estar formades per seqüències delmades semblants entre elles només quan les dues subseqüències estan perfectament en fase (té un cert sentit de càlcul d'autocorrelació) i en canvi les seqüències GA2 demanen incorrelació mitjana total de les diferents subseqüències.

En l'apartat 6.5 es mostra com les famílies de seqüències satisfan les restriccions de l'estructura multiresolutiva, avaluant-ne el *fitness* però també l'autocorrelació mitjana i la correlació creuada. En l'apartat 6.6 es realitza un estudi exhaustiu del comportament de l'estructura amb les noves seqüències i amb els quatre escenaris de simulació (veure taula 2.2), per tal de validar si les dues funcions de *fitness* han estat correctament definides. Davant de l'evidència de les dades es demostra, que malgrat que moltes de les seqüències dissenyades tenen un bon funcionament, el seu funcionament no empitjora amb l'empitjorament del *fitness*. És aquest resultat que féu pensar que calia cercar noves mesures sobre les seqüències GA dissenyades, que poguessin aportar més informació sobre el comportament de les seqüències amb l'estructura multiresolutiva. Calia identificar aquestes noves mesures i incorporar-les a una nova funció de *fitness* per al disseny de futures seqüències GA.

És en aquest punt que es proposen un conjunt de característiques de les seqüències (màxims laterals d'autocorrelació, màxims laterals de correlació creuada, *runs*) que no han estat tinguts en compte per no complicar en excés la funció de *fitness* però que poden tenir un pes important en el mal funcionament puntual d'algunes seqüències amb bon *fitness*. I els resultats (veure apartat 6.6.4) validen aquesta hipòtesi, de forma especialment clara en la família de seqüències GA1. Caldrà tenir en compte el *run property* i també els màxims laterals de les correlacions per tal que els resultats de l'estructura presentin una bondat afí al resultat del *fitness*.

S'han comparat les seqüències dissenyades amb algorismes genètics (GA1 i GA2) amb les famílies de seqüències PN com les Gold, Walsh-Hadamard i *m*, amb l'objectiu de validar els resultats del disseny realitzat. I per a realitzar aquesta comparativa s'han escollit les millors seqüències GA1 i GA2 en funció dels nous *fitness* definits (veure apartat 6.6.3). Tal i com es pot observar a l'apartat 6.7, els resultats amb les seqüències GA noves són molt

millors que per a qualsevol de les altres famílies provades. D'altra banda, havia d'ésser així, puix que les seqüències GA s'han dissenyat ad hoc per al funcionament de l'estructura multiresolutiva.

L'objectiu de disposar d'una família de seqüències GA que millorés el funcionament de l'estructura multiresolutiva ha estat acomplert, i s'han pres les millors seqüències de cada una de les famílies per a realitzar les proves que resten i per tal d'ajustar el control difús en recepció. De l'acompliment d'aquest objectiu se'n destaca la millora de la probabilitat d'adquisició en tots els escenaris de simulació en la comparativa de l'apartat 6.7. Les millors seqüències GA (la seqüència 18 en el cas de GA1 i la seqüència 1000 en el cas de GA2) presenten una millora clara en probabilitat d'adquisició respecte a la seqüència m , que es la millor de les seqüències de la literatura. Millora el seu funcionament en un marge del voltant de 8dB de SNR, a més de presentar millors resultats en tot el marge de SNR per a l'escenari 3, en el qual les seqüències m presenten més dificultats. Malgrat aquest fet, les seqüències m presenten bons resultats especialment en l'escenari 0. Les seqüències Gold són la segona família millor en termes de probabilitat d'encert, però presenta uns resultats molt llunyans de qualsevol de les seqüències GA mostrades. Aquests resultats en probabilitat d'encert es tradueixen de prop en el temps d'adquisició, i especialment en el nombre de vegades que s'adquireix. Aquesta última mesura és un bon termòmetre de l'estabilitat d'un sistema, i l'estabilitat que presenten les seqüències GA és molt superior a les seqüències de la literatura per un marge de SNR. També cal dir que les seqüències GA presenten resultats més uniformes en els quatre escenaris de simulació, i aquest n'és un altre dels punts forts.

En l'apartat 6.8 del capítol 6 es detallen més minuciosament totes les característiques tècniques dels resultats obtinguts, tant des d'un punt de vista dels algorismes evolutius usats com de la qualitat de les seqüències per al seu funcionament en l'estructura multiresolutiva.

8.1.3 Control de l'estructura multiresolutiva

Finalment, caldrà observar l'acompliment dels objectius pel que fa al control de l'estructura multiresolutiva al capítol 7. Malgrat que en origen es plantejà una possibilitat de comparació entre un control difús [AMS07, AMS09, APMSB12] i un generat amb xarxes neuronals [AMSD08], en aquest treball de tesi tan sols s'ha descrit l'evolució del control difús; aquesta decisió es prengué per la facilitat que presenten les estructures difuses a la modificació de les regles en funció de les variacions a les que s'hagués de sotmetre el sis-

tema. Tot control difús respon amb més facilitat a regles lingüístiques definides a partir de l'experiència, i aquest és el nostre cas amb el canal ionosfèric.

Així doncs, i després de descriure els treballs previs d'ajust usant canal no selectiu en freqüència i amb variacions sobtades de SNR, a l'apartat 7.3 es pot observar l'ajust realitzat en un canal selectiu en freqüència o amb dispersió de multicamí, seguint els quatre escenaris de simulació que s'han descrit a la taula 2.2. En aquest punt es mostren els resultats de les proves realitzades tenint en compte un sol camí (veure apartat 7.3.5). Es mesura la qualitat de l'adquisició mitjançant la variable de sortida *Acquisition*, i s'observa en els resultats que les estimacions són molt bones en la gran majoria de valors de SNR. Per tant, la variable *Acquisition* no només ens permet conèixer si estem adquirits o no, sinó que ens serveix de termòmetre de la qualitat de l'adquisició en tot moment.

I és aquesta certesa sobre la qualitat de l'adquisició la que permet, per una banda realitzar un estalvi important del cost computacional de l'estructura en el cas de tenir una bona adquisició. Aquest estudi s'ha mostrat en l'apartat 7.4.1, on es veu clarament que en funció de si la proposta d'estalvi és més o menys agressiva, l'estalvi en l'avaluació dels filtres adaptatius pot ésser molt gran. Caldria poder definir clarament les necessitats d'estalvi de cost per part del receptor, que funcionés a temps real amb les dades rebudes per tal de poder escollir quina seria la millor de les propostes.

D'altra banda, també a partir del valor de la variable *Acquisition* s'activa el funcionament del receptor com a RAKE. I en l'apartat 7.4.2 se'n mostren els resultats. I és en aquest punt en el que s'ha decidit que el control difús s'aplicaria sempre només al camí de més potència, puix que aplicar-se a tots els camins possibles incrementa el cost computacional de forma important i no aporta massa coneixement nou, perquè l'adquisició la marcarà sempre el camí de més potència.

Dit això, s'ha observat el comportament del sistema funcionat com a estructura RAKE, amb un nombre màxim de 3 *fingers* i estratègia de recombinació d'*equal gain*. Hi ha una millora del valor del BER quan l'estructura funciona com a RAKE. Per tal de poder-ho observar amb més deteniment, s'han definit uns escenaris nous (veure taula 7.1 i 7.2), seguint els mateixos temps que defineix el canal ionosfèric però variant-ne la ubicació dels camins i de la seva amplitud, per tal d'enriquir les proves. I també aquestes han demostrat que l'estructura RAKE millora la detecció. D'altra banda, cal dir que totes aquestes proves han estat realitzades amb la millor de les seqüències GA1 i la millor de les seqüències GA2, però no hi ha pràcticament cap gran diferència en els resultats d'una i de l'altra.

Un cop tot el sistema integrat, s'ha realitzat una bateria de proves comparatives amb els algorismes que considerem *baselines* i que són comparables al nostre sistema. L'algoris-

me de El-Tarhuni [ET97], l'estructura multiresolutiva original de Moran [Mor01] i el banc de filtres paral·lels de Takki [HYKH06] s'han ajustat a les noves condicions de canal (veure apartat 7.5.1) i tot seguit, se n'ha analitzat el comportament en adquisició i *tracking*, el temps que triguen a adquirir-se i la BER en recepció (apartat 7.5). S'observa que el comportament de l'estructura multiresolutiva millorada és clarament més favorable, amb tants per cent d'adquisició més alts (excepte en el cas concret del El-Tarhuni quan funciona com a filtre complet) i temps d'adquisició més baixos. En aquest sentit, els algorismes de El-Tarhuni i de Takki tenen el desavantatge que necessiten un mínim de símbols convergits per a començar a funcionar.

La probabilitat d'adquisició correcta és molt més elevada (per sobre del 90% fins als -38dB aproximadament) en el cas de l'estructura multiresolutiva millorada (Ralsina), especialment en els escenaris més favorables (escenari 0) i en aquests resultats, les seqüències GA1 (en aquest cas, la seqüència 18) es veu afavorida respecte a la seqüència 1000 de la família GA2. Malgrat aquesta petita diferència, el seu comportament és clarament millor - del voltant de 10-12dB millor - que en la millor de les estructures de la competència, que resulta ésser l'estructura proposada per El-Tarhuni funcionant amb un filtre adaptatiu de la mateixa longitud que la seqüència PN. Els resultats en probabilitat de *tracking* correcte també són molt favorables, però en alguns escenaris l'estructura MET amb filtre complet millora els resultats de l'estructura multiresolutiva (Ralsina), fet que no havia succeït quan s'observava només la probabilitat d'adquisició. Aquests mateixos resultats es mostren referents a temps d'adquisició; l'estructura multiresolutiva millorada presenta un temps d'adquisició més baix, causant més diferència encara en relacions SNR adverses. Comentar finalment les corbes de la BER; altra vegada predomina la qualitat de l'estructura multiresolutiva millorada, seguida de l'estructura MET amb filtre complet, però a certa distància en la majoria d'escenaris. Un altre dels trets a destacar de l'estructura multiresolutiva millorada és que el seu BER no empitjora ràpidament a partir d'una certa SNR - al voltant dels -20dB en el millor dels casos - sinó que segueix una corba més suau, i per tant, manté valors *millors* fins a pitjors SNR. Cal dir, però, que els valors de BER mostrats són de baixa qualitat en tots els sistemes, i que caldria aplicar entrellaçat i codificació per a millorar-los.

En l'apartat 7.6 del capítol 7 es donen més detalls de les conclusions extretes del disseny del control difús, així com de l'ús del detector RAKE per a obtenir els bits rebuts.

8.2 Reflexions i línies de futur

Dels resultats i conclusions d'aquest treball de tesi n'extraïem un conjunt de reflexions, que ens porten a plantejar la necessitat d'ampliar la recerca que projecten aquestes contribucions.

8.2.1 Millora de l'estructura multiresolutiva

Malgrat l'estructura multiresolutiva presenta uns resultats molt millors en l'entorn de treball que no pas la original proposada per Moran [Mor01], encara presenta alguns detalls de disseny que creiem que poden ésser millorats. En comptes de dissenyar un filtre passa-baixes en recepció i de transmetre els símbols conformats amb un *raised cosine*, es podria provar si la generació de les dades amb un *root raised cosine* en emissió i el seu posterior filtratge en recepció amb el seu filtre complementari milloraria el comportament del receptor. El fet que el filtre de transmissió i el de recepció estiguin perfectament ajustats hauria de minimitzar els problemes generats per l'arrissada a la banda de pas i a la de rebuig i per tant, millorar les dades.

Un altre dels punts no del tot resolts és la forma com s'ajusta el *tracking* en l'estructura multiresolutiva, especialment si aquesta funciona com a receptor RAKE. S'ha comprovat que generar un filtre adaptatiu per a cada un dels camins possibles a vegades causa que els filtres es confonguin a la hora de convergir al camí que se'ls demana; això succeeix especialment si els diferents camins són propers en el temps. Com a línia de futur proposem generar un sol filtre de *tracking*, però de longitud més gran, que pugui abastar tots els camins que arriben en el receptor. Caldria estudiar la longitud d'aquest filtre en funció de la diversitat del multicamí del canal, i alhora, canviar el sistema de detecció de màxims, que ara tan sols mira el valor màxim per a cada filtre de *tracking*. Una altra de les solucions possibles en el cas de tenir camins pròxims és mantenir l'estructura actual de tres filtres de *tracking*, però dotant al sistema decisional de la informació de la distància estimada entre els dos camins crítics - informació obtinguda a partir de l'adquisició -. Amb aquesta informació el sistema decisional podria discriminar els màxims malgrat es trobessin tots dos dins del mateix filtre de *tracking*.

Un altre dels punts que es poden millorar en l'estructura és el funcionament de l'estructura RAKE de detecció. Una de les millores ja esmentades en el text d'aquest treball de tesi és la incorporació d'un llindar variable per a la consideració de camins secundaris. En el treball mostrat s'han obtingut uns resultats que demostren clarament que en funció de quina és la SNR del canal, la possibilitat de detecció de camins secundaris varia. Quan la

SNR és alta, la possibilitat de trobar camins secundaris és molt gran, fins i tot quan aquests camins secundaris tenen una relació energètica amb el camí principal no gaire alta. En canvi, quan la SNR baixa, la probabilitat de falsa alarma puja i per tant, és més senzill creure trobar un camí secundari que en realitat només és fruit del soroll. Poder adaptar aquest llinar en funció de les condicions del canal - assumint que és una informació coneguda, puix que es troba implícitament en els ratios dissenyats per al sistema de control difús - donaria més llibertat al sistema RAKE per a activar-se sense restriccions en situacions de bones condicions de canal. Alhora, es podria tenir en compte també com a línia de futur la inclusió de la filosofia MRC (*Maximal Ratio Combining*) en lloc de l'EGC, puix que el fet de tenir en compte la SNR per a la contribució de cada un dels camins, assumint que és mesurable en recepció, permet una ponderació més adequada per al comportament d'aquests camins en el canal.

8.2.2 Disseny de seqüències GA

Els resultats ens han mostrat amb claredat que hi ha uns objectius de futur molt clars amb el disseny de les seqüències GA. El primer que caldria fer és redissenyar les seqüències PN aplicant els algorismes genètics usant funcions de *fitness* noves, que tinguin en compte el *run property* i els màxims laterals de les correlacions (autocorrelació i correlació creuada), no només els seus valors mitjans (que no s'han de deixar de tenir en compte). Els valors dels pesos obtinguts són suficientment clars com per a veure que indiquen uns costos que cal que es tinguin en compte en una futura funció de *fitness*. Malgrat tot, caldria no menysprear la possibilitat d'ampliar l'estudi estadístic a alguna altra funció d'error (FE), que s'han definit per tal d'identificar els nous costos o mesures que s'havien d'incorporar a la funció de *fitness*. En aquest treball s'han plantejat funcions d'error que penalitzaven els errors en els escenaris més complicats i per a les SNR més baixes. Caldria estudiar si el fet de no afegir aquesta penalització modificaria en alguna mesura les conclusions sobre les noves mesures a incorporar.

D'altra banda, cal donar un pas més en el disseny de famílies de seqüències GA, és a dir, de famílies de 2, 4, 8 individus o més, assumint tot el coneixement ja adquirit de les seqüències monousuari. La transmissió per *signalling* [Vil07] és una bona manera d'incrementar la velocitat de transmissió de dades, i convindria tenir preparades les famílies per a la seva aplicació al projecte antàrtic. En aquest treball de tesi tan sols se n'ha realitzat una prova de concepte, per comprovar-ne la viabilitat, a l'espera d'ajustar la funció de *fitness* per a una sola seqüència. Caldrà realitzar un estudi exhaustiu del conjunt de famílies que es poden dissenyar, amb quins atributs, i de quina forma es realitzarà la transmissió per

tal de poder adaptar l'estructura multiresolutiva - assumint un increment en el seu cost computacional-. També caldrà validar si en el cas de les famílies de seqüències preparades per a funcionar com a multiusuari tenen un funcionament millor aquelles dissenyades amb el criteri de GA1 (veure equació 6.12) o per contra, funcionen millor les que disposen del criteri de GA2 (veure equació 6.13).

També cal considerar que no està resolta la comparativa entre les famílies generades amb seqüències GA1 i les famílies amb GA2. Caldria expandir les proves a les dades reals (d'altra banda ja obtingudes en la campanya antàrtica 2011-2012) per comprovar en situacions reals, quina de les famílies respon amb millors resultats. És possible que la resposta a aquesta pregunta sigui que depèn de quin sigui l'entorn de treball, si és un sol camí o per contra, és multicamí.

8.2.3 Control de l'estructura multiresolutiva

Un altre dels objectius de futur és fer més eficient i més eficaç el control de l'estructura. Des d'un punt de vista de control difús, caldrà depurar amb detall si tots els ratios usats són determinants o algun és lleugerament redundat amb la informació que aporten els altres. De la mateixa manera caldrà revisar minuciosament si es poden simplificar d'alguna forma les regles lingüístiques del control - malgrat que per a la última versió del control ja va ésser un paràmetre tingut en compte [Zad73, SY93]-, puix que quantes menys regles, més senzill és el control i per tant més barat computacionalment.

I d'altra banda, caldrà estudiar altres tècniques (com per exemple les xarxes neuronals, o cadenes de Markov) per comprovar si alguna d'elles fa un ús encara més eficient del cost computacional. La lògica difusa fa un molt bon servei perquè és capaç de plasmar el coneixement sobre el canal en la interpretació dels ratios, però té un cost elevat d'implementació. La possibilitat de plasmar l'experiència en un control de forma senzilla és important, però un cop ja dissenyat el control necessari, esdevé més destacable el fet que aquest sigui senzill d'implementar i que no afegeixi cost computacional innecessari. És per això que una de les propostes de futur que resten obertes d'aquest treball és usar la informació que proporcionen els ratios avaluats, que ja s'ha observat que és distintiva respecte al comportament del sistema, amb l'aplicació d'alguns dels altres mètodes no lineals de control. Ja s'ha realitzat alguna prova de concepte al respecte [AMSD08] amb resultats que motiven a seguir el treball en aquesta línia. Aquesta comparativa es realitzà sobre un canal senzill, un canal amb soroll blanc gaussià i additiu, però els seus bons resultats ens alenta a realitzar el mateix estudi en un canal dispersiu i variant en el temps com la

ionosfera.

8.2.4 Adaptació a la recepció en temps real de dades del canal antàrtic

En aquest treball s'ha adaptat el treball de l'estructura multiresolutiva d'adquisició i *tracking* al receptor d'un sistema d'espectre eixampliat de seqüència directa d'un canal ionosfèric antàrtic [BAPVR12]. Per tal que aquest objectiu sigui realitat cal que l'estructura multiresolutiva pugui donar resposta no només a l'adquisició i al *tracking*, i a la detecció, tal i com està fent a hores d'ara, sinó que és precís que tingui una estructura més modular per tal de poder-ne variar alguns dels paràmetres.

Les seqüències PN de longitud 128 són habituals en les transmissions, però altres longituds són possibles. Caldrà que l'estructura s'adapti a les noves longituds, ja sigui canviant les longituds dels filtres adaptatius, o canviant el nombre de delmacions (i per tant, de M branques d'adaptació) necessàries per a l'adquisició. També caldrà adaptar l'estructura a un nombre de mostres per xip variable, malgrat que el més usat és un *up factor* de 16, que és el contemplat en aquest treball.

En aquest sentit també seria convenient estudiar com influeix l'elecció dels paràmetres M , N i N_c com a longitud de la seqüència PN en el rendiment de l'estructura multiresolutiva, tant a nivell de probabilitat d'adquisició com a nivell de BER total. Aquest treball de tesi ha mostrat tan sols el cas particular de $M = 4$ i $N_c = 128$, assumint un *up factor* habitual de $N = 16$.

Alhora, a partir de l'adquisició i detecció que s'obté de l'estructura multiresolutiva es poden donar resposta a necessitats actuals del projecte antàrtic. Ja des de la campanya 2010-11 s'han rebut les dades provinents de l'Antàrtida amb diversitat d'antenes, concretament, amb 3 recepcions alhora. S'està treballant en la diversitat espacial que aporten aquestes dades rebudes amb tres antenes distintes, i l'estructura multiresolutiva podria proporcionar les dades bàsiques perquè aquesta informació fos constructiva en la desmodulació de les dades enviades. Una possible aplicació de futur dins del projecte antàrtic podria ésser donar servei a una estructura SIMO (*Single Input Multiple Output*).

Finalment, cal tenir en compte que el projecte demana obtenir fitxers desmodulats amb un marge de dades errònies baix; la situació desitjable seria obtenir un fitxer de dades diari ben detectat, fixant un BER objectiu. Amb aquest objectiu caldria tractar les dades usant entrellaçat i codificació per a que la BER obtinguda en aquest treball decreixés fins a valors acceptables en un sistema funcionant en temps real. El gran avantatge que presenta l'estructura multiresolutiva és que la observació del comportament dels filtres adaptatius

d'adquisició mostren l'estat del canal en tot moment, i també aporten una estimació de la fiabilitat de les dades rebudes (mitjançant la variable *Acquisition* del control difús), per tant, permet tenir registrat i traçat en tot moment el que està succeint al canal. Si fos precís, per a tres recepcions alhora, tal i com s'ha descrit a l'apartat anterior.

Part IV

Apèndix

APÈNDIX A

PUBLICACIONS RESULTAT D'AQUEST TREBALL DE TESI

En aquest annex es detallen els articles i capítols de llibre publicats durant aquest treball de tesi doctoral. S'han estructurat en tres seccions: la primera fa referència a les millores de l'estructura multiresolutiva (veure capítol 5). La segona parla de les publicacions referents a les seqüències GA dissenyades i de la seva evolució (veure capítol 6). I la última parla del disseny del control de l'estructura multiresolutiva (veure el capítol 7).

Cal tenir present que el treball realitzat sobre la recepció d'espectre eixamplat en un canal ionosfèric no té la primera contribució en aquest treball de tesi. En el passat ja s'havia treballat en la realització d'un Treball Final de Carrera [Als00], dos Projectes Finals de Carrera [Als02, ASMS03] i el Diploma d'Estudis Avançats [Als07].

A.1 Publicacions de les millores de l'estructura multiresolutiva

[AMS01] **Títol:** Diseño de un bloque de adquisición adaptativo para un sistema DS-SS sobre canal ionosférico

Autors: Alsina R.M., Morán J.A., Socoró J.C., Sevillano X.

Tipus de participació: Presentació comunicació **Congrés:** XVI Simposium Nacional de la Unión Científica de Radio (URSI'2001) **Publicació:** Libro de actas del XVI Simposium Nacional **País:** ESPANYA **Any:** 2001

Paraules Clau: Sistemes d'espectre eixamplat, modulacions avançades de banda ampla / Comunicacions en HF, ionosfera / Receptors

En aquesta presentació de comunicació de l'any 2001 es féu la primera aproximació a un sistema d'adquisició adaptatiu, malgrat que els primers sistemes que es van provar foren sèrie i no l'estructura multiresolutiva. Aquest sistema procurava adaptar la convergència del receptor fent que el llindar a partir del qual es declara l'adquisició sigui variant en funció de les condicions del canal. Fou el primer pas, el que ens va permetre de veure que el més important era no necessitar un llindar en recepció, el que posteriorment ens empenyé a la filosofia que hi ha al darrera del funcionament de l'estructura multiresolutiva.

[AMS03] **Títol:** Multiresolution Adaptive Structure for Acquisition and Detection in a DS-SS Digital Receiver in a Multiuser Environment

Autors: Alsina R.M., Morán J.A., Socoró J.C., Sevillano X.

Tipus de participació: Pòster **Congrés:** International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA) **Publicació:** Llibre d'actes de l'ISSPA2003 **País:** FRANÇA **Any:** 2003

Paraules Clau: Detecció / Sistemes d'espectre eixamplat, modulacions avançades de banda ampla / Receptors

En aquesta comunicació de l'any 2003 es presenta ja l'estructura multiresolutiva funcionant amb el filtrat LMS, i en aquesta comunicació es combinava amb un sistema de detecció MOE, que aprofitava la convergència de l'algorisme per tal de millorar la seqüència PN amb la que es realitza l'adquisició, en un intent de forçar la ortogonalitat d'aquesta seqüència amb el subespai interferent (que és el principi de funcionament del detector MOE [Ver98]).

[AMSB05] **Títol:** Multiresolution adaptive scheme for acquisition and tracking in a DS-SS digital receiver in a multipath environment

Autors: Alsina R.M., Morán J.A., Socoró J.C., Bonet D.

Tipus de participació: Ponència **Congrés:** 6th Management Committee Meeting **Publicació:** <http://cost289.ee.hacettepe.edu.tr/> **País:** ESPANYA **Any:** 2004

Paraules Clau: Sistemes d'espectre eixamplat, modulacions avançades de banda ampla / Receptors

En la ponència al 6th Management Committee Meeting del COST289 es presentà l'estructura multiresolutiva adaptada per al seu funcionament multicamí en dades simulades. S'explica el funcionament del filtrat adaptatiu de les quatre branques, i com d'aquests filtres se'n poden obtenir les dades per a fer una estimació correcta dels múltiples camins que s'han derivat del canal. S'aclareix que es fixa un llindar d'un 40% sobre la potència del camí principal per a qualsevol camí secundari sigui acceptat.

[ABSD09] **Títol:** Multiresolutive Acquisition Technique for DS-SS Long-Haul HF Data Link

Autors: Alsina R.M., Bergada P., Socoro J.C., Deumal M.

Tipus de participació: Presentació comunicació **Congrés:** Ionospheric Radio Systems and Techniques (IRST2009) **Publicació:** Proceedings de IRST2009 **País:** ANGLATERRA **Any:** 2009

Paraules Clau: Comunicacions HF avançades / Ionosfera / Comunicacions en HF, ionosfera / Sistemes d'espectre eixamplat, modulacions avançades de banda ampla

En la presentació de la comunicació a l'IRST2009 es mesura el bon funcionament de l'estructura multiresolutiva provada sobre dades reals del canal ionosfèric amb l'Antàrtida. Es mesura la seva convergència sobre els diferents camins del canal i com convergeixen també els filtres adaptatius a cada un d'aquests camins. Es mesura la qualitat de l'adquisició comparant-la amb la que proporciona la correlació, que com ja s'ha descrit, és la millor de les mesures possibles (veure [YKH06, YCH08]).

A.2 Publicacions del disseny de les seqüències GA

[ABM05] **Títol:** Evolution Strategies for DS-CDMA Pseudonoise Sequence Design

Autors (p.o. de signatura): Alsina R.M., Morán J.A., Bernadó E.

Revista: Frontiers in Artificial Intelligence and Applications Artificial Intelligence Research and Development

Volum: 131 **Pàgines, inicial:** 189 **final:** 196 **Any:** 2005 **Lloc de publicació:** PAÏSOS BAIXOS **ISSN:** 0922-6389 **ISBN:** 1-58603-560-6

En la primera de les publicacions al Frontiers in Artificial Intelligence es descriu la primera aproximació al disseny de les seqüències GA. En aquell moment es tractava de famílies de seqüències, per tant, calia tenir en compte també la correlació creuada entre seqüències perquè així ho exigia la necessitat del projecte - es pretenia realitzar transmissions usant seqüències de *signalling*, i per tant, en feia falta més d'una. La primera proposta es realitzà usant estratègies evolutives.

[AFSB07] **Títol:** Multiobjective Evolutionary Algorithm for DS-CDMA Pseudonoise Sequence Design in a Multiresolutive Acquisition

Autors (p.o. de signatura): Alsina R.M., Formiga L., Socoró J.C. and Bernadó E.

Revista: Frontiers in Artificial Intelligence and Applications Artificial Intelligence Research and Development **Volum:** 163 **Pàgines, inicial:** 384 **final:** 391 **Any:** 2007 **Lloc de publicació:** PAÏSOS BAIXOS **ISSN:** 0922-6389 **ISBN:** 978-1-58603-798-7

La segona de les publicacions al *Frontiers in Artificial Intelligence* descriu l'evolució de la primera de les propostes, i com que s'han incrementat les condicions a complir per part de les seqüències, és més complicat descriure'n una funció de *fitness* única i s'opta per una proposta multiobjectiu.

A.3 Publicacions del disseny del control de l'estructura multiresolutiva

[AMSS02] **Títol:** Diseño de un sistema de adquisición basado en lógica difusa para un sistema DS-SS sobre canal ionosférico

Autors: Alsina R.M., Morán J.A., Socoró J.C., Sevillano X.

Tipus de participació: Presentació comunicació **Congrés:** XVII Simposium Nacional de la Unión Científica de Radio (URSI'2002) **Publicació:** Libro de actas del XVII Simposium Nacional **País:** ESPANYA **Any:** 2002

Paraules Clau: Sistemes d'espectre eixamplat, modulacions avançades de banda ampla / Comunicacions en HF, ionosfera / Receptors

En aquesta comunicació es presenta el primer disseny d'una estructura difusa per a control d'un sistema d'adquisició d'espectre eixamplat. En aquest cas, però, es tractava d'un sistema d'adquisició sèrie i no es tractava encara de l'estructura multiresolutiva.

[AMS05] **Títol:** Sequential PN Acquisition Scheme Based on a Fuzzy Logic Controller

Autors (p.o. de signatura): Alsina R.M., Morán J.A., Socoró J.C.

Revista: Lecture Notes in Computer Science 8th International Workshop on Artificial Neural Networks

Volum: 3512 **Pàgines, inicial:** 1238 **final:** 1245 **Any:** 2005 **Lloc de publicació:** ESTATS UNITS D'AMÈRICA **ISSN:** 0302-9743 **Base de dades d'indexació:** Science Citation Index (SCI) **Factor d'impacte:** 0,402 **Àrea i posició dins d'ella:** COMPUTER SCIENCE, THEORY & METHODS: 62 de 71

En aquest article es presenta la primera proposta d'estructura difusa per a realitzar un control en un sistema d'adquisició per a espectre eixamplat. És la primera de les publicacions que conté definició de ratios sobre els valors dels filtres adaptatius, i aquests es relacionen directament amb el comportament del canal en cada moment. Aquí es posen, doncs, els ciments per al disseny dels ratios que serviran en un futur per a estimar l'adquisició i per a controlar el sistema d'adquisició.

[AMS07] **Títol:** Multiresolutive Adaptive PN Acquisition Scheme with a Fuzzy Logic Es-

timator in Non Selective Fast SNR Variation Environments

Autors (p.o. de signatura): Alsina R. M., Mateo C., Socoró J.C.

Revista: Lecture Notes in Computer Science 9th International Work-Conference on Artificial Neural Networks

Volum: 4507 **Pàgines, inicial:** 367 **final:** 374 **Any:** 2007 **Lloc de publicació:** ESTATS UNITS D'AMÈRICA **ISSN:** 0302-9743

Aquest article és una evolució del Lecture Notes acabat de presentar. En aquest article es mostren uns ratios sobre el canal més depurats, que permeten estimar millor el comportament de l'estructura en cada moment. En aquest article es presenta l'estructura de control en una fase prèvia de disseny, prenent només que realitzi l'estimació de com està l'adquisició del sistema i també, de la relació SNR que hi ha al canal. De moment, s'estan realitzant les proves tan sols en un canal amb soroll blanc gaussià; més endavant ja es realitzaran en aproximacions Rayleigh.

[MA08] **Títol:** Nuevas técnicas para el sistema de control de un receptor multiresolutivo de DS-SS CDMA

Autors (p.o. de signatura): Mateo C., Alsina R.M.

Revista: Revista del Centro de Investigación, Universidad La Salle México

Volum: 8 **Número:** 30 **Pàgines, inicial:** 29 **final:** 49 **Any:** 2008 **Lloc de publicació:** MÈXIC **ISSN:** 1665-8612 **Enllaç electrònic:** <http://revista.ci.ulsal.mx/index.php/rci/index>

En aquest article es realitza una comparativa de funcionament entre un sistema de control basat en lògica difusa i un sistema de control basat en xarxes neuronals. Es mostren les bases d'ambdós dissenys i se'n mostren els resultats preliminars de la prova de concepte. Malgrat els bons resultats presentats per les xarxes neuronals, s'ha optat per la lògica difusa - i per tant, no s'afegeixen els resultats de les xarxes neuronals en aquest treball de tesi - perquè respon millor a un sistema que es descriu a partir de l'experiència, del coneixement sobre el seu funcionament. Resulta més senzill afegir o treure regles difuses en funció del comportament de l'estructura que no pas tornar a convergir l'estructura de xarxa neuronal.

[AMSD08] **Títol:** Neural Network Acquisition Estimator for Multiresolutive Adaptive PN Acquisition Scheme in Multiuser Non Selective Fast SNR Variation Environments

Autors: Alsina R.M., Mateo C., Socoró J.C., Deumal M.

Tipus de participació: Presentació comunicació **Congrés:** 8th IEEE International Conference on Hybrid Intelligent Systems **Publicació:** Proceedings of IEEE 8th International Conference on Hybrid Intelligent Systems 2008 **País:** ESPANYA **Any:** 2008

Paraules Clau: Sistemes d'espectre eixamplat, modulacions avançades de banda ampla /

fuzzy logic / Neural Networks

Aquesta presentació de comunicació mostra els resultats del disseny d'un sistema de control basat en xarxes neuronals per al funcionament sobre l'estructura multiresolutiva. Presenta els resultats sobre el sistema de control difús que s'ha dissenyat anteriorment i també sobre el control per estabilitat presentat a [Mor01]. Tal i com ja s'ha argumentat per l'article anterior, aquests resultats corresponents al control neuronal no s'han inclòs en el document de tesi.

[AMS09] **Títol:** Fuzzy Logic Estimator for Variant SNR Environments

Autors (p.o. de signatura): Alsina R.M., Mateo C., Socoró J.C.

Llibre: Encyclopedia of Artificial Intelligence **Editorial:** IGI Global

Pàgines, inicial: 717 **final:** 727 **Any:** 2008 **Lloc de publicació:** (ESTATS UNITS D'AMÈRICA)

ISBN: 978-1-59904-849-9 **Clau:** Capítol de llibre

Aquest capítol de llibre recull de forma esplaiada les proves realitzades per al disseny de l'estimador difús en un entorn de relació SNR variant. Es tracta doncs, dels resultats mesurats per al disseny de les regles lingüístiques i també la observació del resultat d'aquestes regles lingüístiques en un entorn de SNR variant.

[APMSB12] **Títol:** Fuzzy Logic Control for Multiresolutive Adaptive PN Acquisition Scheme in Time-Varying Multipath Ionospheric Channel

Autors (p.o. de signatura): Alsina R.M., Mateo C., Socoró J.C., Bergadà P.

Llibre: Fuzzy Logic **Editorial:** INTECH **Volum:** 2 **Pàgines, inicial:** 131 **final:** 156 **Any:** 2011 **Lloc de publicació:** (CROÀCIA) **ISBN:** 979-953-307-872-3 **Clau:** Capítol de llibre

Aquest capítol de llibre tanca - de moment - les contribucions d'aquesta tesi en matèria de control difús sobre l'estructura multiresolutiva. Explica el disseny de les variables difuses d'entrada i de sortida, i també el disseny de les regles difuses per a relacionar-les. Ha estat provada ja en canal ionosfèric simulat (en un entorn Rayleigh) i amb una SNR variant.

APÈNDIX B

ELS FILTRES ADAPTATIUS LMS

Els filtres adaptatius són dispositius que intenten modelar la relació entre diferents senyals en temps real i de forma iterativa. Es diferencien dels filtres digitals més comuns, tipus FIR o IIR, en el fet que aquests són invariants en el temps, mentre que un filtre adaptatiu pot canviar la seva forma de comportar-se, és a dir, poden canviar els seus coeficients d'acord amb un algorisme adaptatiu. En realitat, no es coneixen els coeficients del filtre quan es dissenya, sinó que aquests coeficients es calculen quan el filtre s'implementa i es reajusten automàticament a cada iteració mentre dura la fase d'aprenentatge.

El bloc d'adquisició de l'estructura multiresolutiva presentada en l'apartat 5.3 està basat en filtrat adaptatiu. A la literatura [FBR81, KP82, HSR00, ET97, LW03] es pot trobar força exemples de bon funcionament de sistemes d'adquisició i *tracking* que d'una forma o altra, recolzen el seu ajust en filtrat adaptatiu. Alguns d'aquests citats són usats més tard per a comparar l'estructura multiresolutiva amb les solucions proposades amb anterioritat a problemes similars a l'entorn ionosfèric (veure apartats 4.3 i 4.1).

Per tal de comprendre el seu funcionament, cal recordar que els filtres adaptatius consten d'una entrada, d'una referència i d'un senyal error de sortida, i que la finalitat de la convergència sol ser que l'error sigui el més petit possible, idealment zero, però serà impossible per la interferència i el soroll. Cal tenir present també, que pel fet de ser filtres adaptatius, els coeficients del filtre (per tant, la resposta impulsional) serà modificada a partir de la informació del senyal error per tal que el filtre s'adapti a les possibles variacions del senyal tractat, dins dels límits que li és possible.

El sistema d'estructura multiresolutiva té M filtres adaptatius, un per a cada branca.

Usen la magnitud de l'error per a corregir l'estimació del senyal de referència, ponderat amb una constant d'aprenentatge que permet modular la velocitat de convergència així com l'error final assolit.

B.1 Diferents tipus de filtres adaptatius

Cal veure quin dels diferents filtres adaptatius (LMS, RLS i Lattice) és més adequat per a l'estructura multiresolutiva [Mor01]. S'han realitzat estudis previs sobre la mateixa estructura multiresolutiva en entorns de variacions de SNR ràpides, en el treball [Als03] pel que fa als filtres RLS, i en el treball [Bon04] per als filtres lattice. La conclusió és que el filtre que equilibra el cost computacional i el bon funcionament sobre les seqüències PN és el filtrat LMS. Apart dels estudis propis sobre el millor funcionament possible, a la literatura també hi ha estudis comparatius. Al treball d'Akhter [AFJN10] es realitza la comparació entre filtres adaptatius basats en aquests tres algorismes (LMS, RLS i Lattice) per a la seva aplicació al problema de la predicció lineal, i se n'extreu la conclusió que el millor filtre adaptatiu és l'LMS.

Els motius de la decisió són diversos, però tots ells basats en el funcionament dinàmic comparatiu dels filtres, i ajustant de forma diferent els paràmetres de convergència que tots tres filtres utilitzen, per tal de donar peu a diferents velocitats de convergència. Les conclusions del treball [AFJN10] diuen que el filtre que millor convergeix en temps i en cost computacional és l'LMS. Per a treure aquesta conclusió es basa en l'estudi comparatiu amb els altres dos algorismes - RLS i Lattice -. Per tal de fer el més generalista possible l'estudi, Akhter realitza les proves amb diferents tipus de senyals: senyals de sincronització, senyals chirp, senyal dent de serra i finalment, senyal de veu, i realitza la comparativa final en termes de temps.

D'altra banda, aquesta conclusió és comú a la comunitat científica que usa algorismes adaptatius en comunicacions. En diversos treballs ja citats en aquest treball de tesi s'usen algorismes LMS per tal de realitzar l'adquisició o altres fases de la recepció de senyals d'espectre eixamplat. Per a més referències, es pot consultar els treballs [ET97], [FS04] o [HYKH06], entre tants d'altres.

B.2 Longitud dels filtres adaptatius

Un altre terme d'estudi ha estat la longitud del filtre adaptatiu. En la proposta inicial de l'apartat 4.2.2, la seqüència PN usada (normalment la Gold [Gol68]) era delmada en factor $M = 4$, i com que la longitud de les seqüències Gold és de $2^n - 1$, una de les branques quedava sempre amb una longitud una unitat menor. Això el perjudicava per la diferència de mostres que suposava, i alhora, perquè la seqüència de referència era sempre completa. En condicions normals, tres filtres té longitud $\left\lfloor \frac{2^n - 1}{4} \right\rfloor$ i el quart dels filtres té una longitud de $\left\lfloor \frac{2^n - 1}{4} \right\rfloor$. El que s'ha mantingut és que la longitud de cada un dels filtres sigui de $Q = \frac{N_c}{M}$, però cal que sigui un nombre sencer per a no perjudicar a cap de les M branques. Aquesta és la tercera millora sobre la proposta original de l'apartat 4.2.2: que cap dels filtres adaptatius d'adquisició estigui ni especialment perjudicat ni afavorit per a la seva convergència. Proporciona equilibri sobre les M branques de l'estructura

D'altra banda, la longitud de cada un dels filtres ha d'ésser de Q mostres; és la única manera que en cada convergència dels M filtres adaptatius es faci un escombrat sencer a tot un temps de símbol T_s , amb la longitud de la seqüència PN de N_c i un nombre de mostres per xip de M . Aquesta serà la nomenclatura que s'usarà en tot el treball per als filtres adaptatius LMS.

B.3 Convergència del filtre LMS

Després de la revisió realitzada en els apartats anteriors sobre les característiques que havia de tenir el filtre adaptatiu que donés resposta a l'adquisició, en aquest apartat es profunditzarà en l'anàlisi de la solució ideal (sense enviament de dades, només senyalització) i també s'analitzarà la convergència dels filtres, que en el cas del seu ús per a l'adquisició és dins d'un temps de símbol, en el cas d'enviar dades. En aquest darrer cas, s'ha fet un anàlisi empíric, basat en la recreació de les diferents situacions en què es pot trobar el filtre respecte del senyal rebut. En primer lloc, es veuran les respostes ideals d'un filtre de Wiener [OWS00] a les condicions possibles d'aquest treball, amb soroll i multicamí. Tot seguit, es detallarà l'algorisme d'aprenentatge (basat en l'*steepest descent*) que s'usarà per a la convergència de l'LMS en l'estructura multiresolutiva. Els vectors que s'usaran per a mostrar aquesta convergència seran els mateixos que l'estructura multiresolutiva usa per a la seva convergència. La seqüència PN delmada en factor M c_{dec} pel que fa a la referència i la senyal rebuda delmada també en factor M \hat{s}_{dec} pel que fa al senyal d'entrada rebut.

B.3.1 Solució del filtre de Wiener en el cas ideal

La convergència del filtre LMS en la situació ideal (és a dir, suposant que el senyal transmès no conté dades) tendeix a la solució del filtre de Wiener [Hay96, Din97]. La solució òptima del filtre de Wiener en termes de minimitzar l'error quadràtic mitjà ve donada per l'equació següent:

$$\underline{w}^{opt} = \underline{R}^{-1} \underline{p} \quad (\text{B.1})$$

on \underline{R} és la matriu de correlació obtinguda a partir de $\underline{R} = E\{\hat{s}_{dec}[n]\hat{s}_{dec}^T(k)\}$ i el vector \underline{p} , també anomenat vector de correlació, calculat com $\underline{p} = E\{c_{dec}[n]\hat{s}_{dec}[n]\}$, on el que es pretén estimar és el senyal $c_{dec}[n]$. Aquest càlcul donaria el resultat en el vector de coeficients del filtre \underline{w} sense més preàmbuls. No obstant, el filtre LMS és una solució adaptativa i la solució final tendirà a semblar-se a la solució ideal, però a més a més a l'estructura multiresolutiva per a cada símbol es donarà un nou aprenentatge que donarà lloc a una solució diferent que canviarà en funció de com hagi variat el canal del símbol anterior a l'actual. El resultat d'aquest càlcul es pot observar a la figura B.1, on la sortida d'aquest és una delta desplaçada les mateixes unitats que ho està l'entrada $\hat{s}_{dec}[n]$ respecte a la referència $c_{dec}[n]$.

Si enviem una seqüència coneguda, la podem usar com a entrada $\hat{s}_{dec}[n]$ i la referència $c_{dec}[n]$ del filtre. La seqüència enviada ($\hat{s}_{dec}[n]$) patirà un desfasament durant el seu recorregut pel canal (precisament l'objectiu del sistema d'adquisició serà predir aquest desfasament), mentre que la seqüència de referència ($c_{dec}[n]$) tindrà una fase qualsevol, però la mantindrem constant tota l'estona. Aquest cas es tracta tan sols d'un exemple, més endavant es concretarà amb models de canal més precisos.

B.3.2 Solució del filtre de Wiener en el cas de tenir soroll blanc

La solució ideal per al filtre de Wiener proposada es veurà lleugerament modificada en el cas que aparegui soroll en el canal.

Es parteix de la mateixa equació B.1, però en aquest cas l'autocorrelació del senyal d'entrada continuarà informant sobre el soroll del canal [Hay96, ET97].

$$\underline{R}_{SNR} = E\{\hat{s}_{dec}[n]\hat{s}_{dec}^T(k)\} = (1 + \sigma_n^2) \cdot \underline{I} \quad (\text{B.2})$$

El vector $\underline{p}_{SNR} = E\{c_{dec}[n]\hat{s}_{dec}[n]\}$ pot variar lleugerament el seu valor a causa del soroll que es pot afegir a $\hat{s}_{dec}[n]$. Idealment no hauria d'ésser així, puix que el soroll blanc gaus-

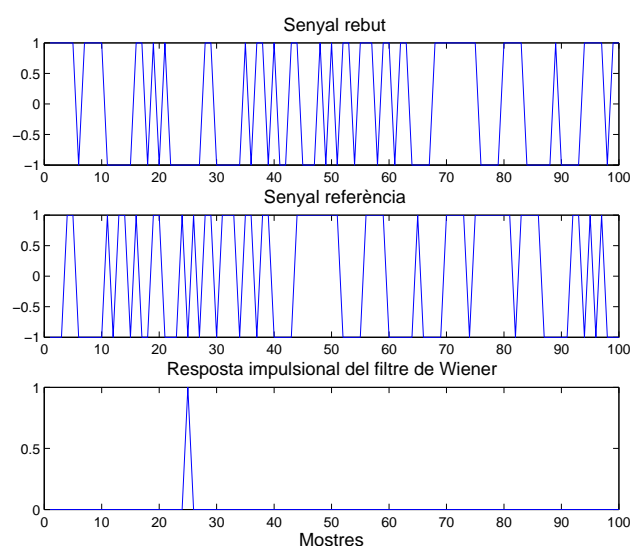


Figura B.1: Resposta del filtre de Wiener a la convergència amb una seqüència PN.

sià té mitjana zero, i per tant, les aportacions positives i les negatives s'haurien d'anar cancel·lant al llarg del temps, però en un vector de longitud limitada, és molt improbable que s'acompleixi. És per això que caldrà assumir un cert soroll en la correlació creuada p .

Així doncs, l'expressió de la resposta impulsional òptima per al cas de disposar d'un canal amb soroll blanc gaussià és la següent:

$$\underline{w}_{SNR}^{opt} = \frac{1}{1 + \sigma_n^2} p_{SNR} \quad (B.3)$$

Serà així en el cas, evidentment, que la convergència sigui possible. En el cas que la convergència no sigui possible, el vector resultant tindrà lleugeres desviacions (proporcionals a la potència del soroll) respecte al vector zero, que és el vector que correspondria a la resposta ideal.

Un exemple de matriu d'autocorrelació i vector de correlació creuada es poden observar a la figura B.2 (per un valor de $SNR = 5\text{dB}$ en (a) i per un valor de $SNR = -5\text{dB}$ en (b)). En aquestes gràfiques es comprova amb facilitat l'efecte del soroll en les correlacions. La matriu d'autocorrelació esdevé sorollosa fora de la diagonal principal, i petites similituds no desitjades incrementen l'autocorrelació en retards fora de la diagonal principal¹. També s'adjunta un exemple de resposta impulsional del filtre LMS en el cas de soroll en la

¹En aquest exemple concret, el soroll associat fora de la diagonal principal és a causa de que l'autocorrelació de la seqüència PN usada (una seqüència Gold [Gol68]) no és zero fora del màxim. Empitjora lleugerament, per tant, la matriu d'autocorrelació.

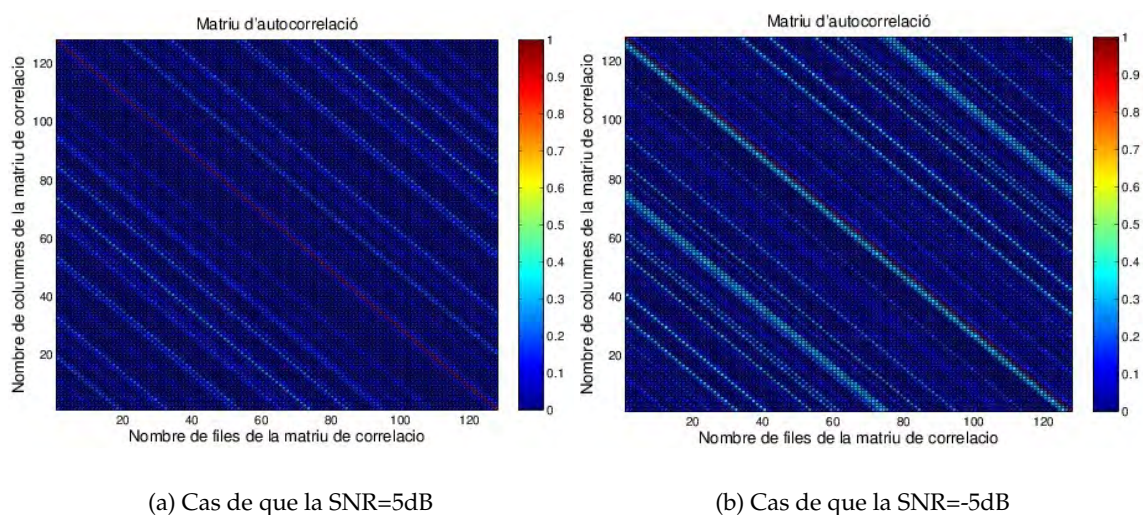


Figura B.2: Matriu d'autocorrelació de les dades d'entrada i vector de correlació creuada d'exemple en el cas de tenir un canal amb soroll

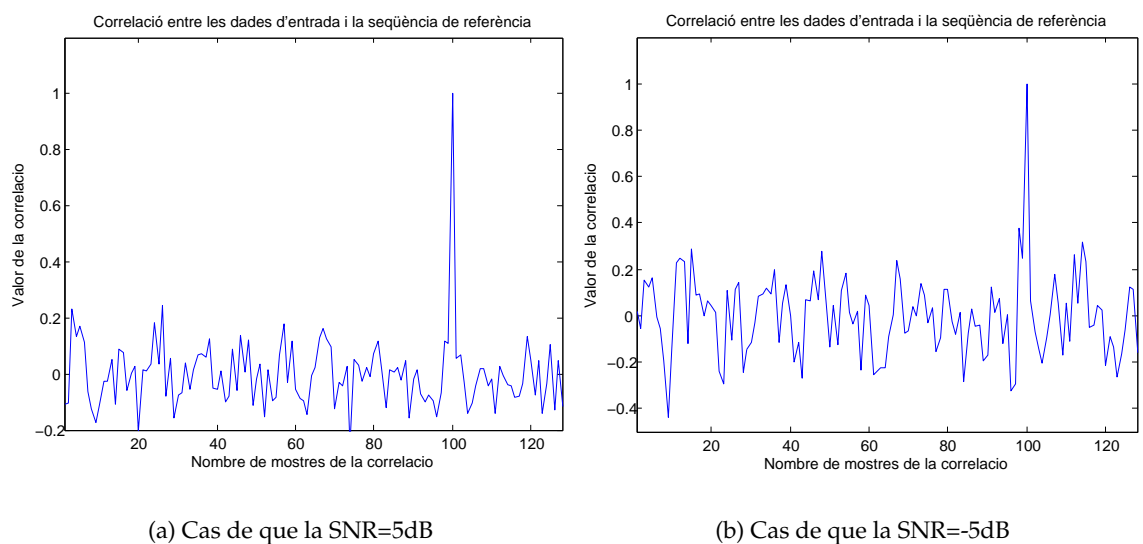


Figura B.3: Resposta del filtre LMS a la convergència amb soroll

figura B.3². En aquesta gràfica s'exemplifica que la resposta del filtre conté soroll, no n'és immune. I aquesta exemplificació es mostra amb la figura B.3.a, que té una SNR de 5dB, i la figura B.3.b, que té una SNR de -5dB; no cal dir que la segona de les correlacions mostra uns resultats molt més sorollosos.

B.3.3 Solució del filtre de Wiener en el cas de soroll i multicamí

L'últim dels casos possibles afegeix el multicamí al detall de la proposta que disposa només de soroll. Tant la matriu d'autocorrelació com el vector de correlació creuada canvien.

La matriu de correlació creuada no es podrà descomposar només en una matriu identitat, puix que hi haurà més d'una repetició del patró base que s'està transmetent [Hay96, ET97]. Es pot veure detallat a continuació:

$$\underline{\underline{R}}_{MPH} = E\{\hat{\underline{s}}_{dec}[n]\hat{\underline{s}}_{dec}^T[k]\} = (1 + \sigma_n^2) \cdot \underline{\underline{I}} + (1 + \sigma_n^2) \cdot \underline{\underline{E}} \quad (\text{B.4})$$

on $\underline{\underline{E}}$ és una matriu complementària a la identitat, que reflecteix amb més o menys diagonals diferents de zero quants camins més disposa el canal. Si apart de la diagonal principal, representada per la matriu identitat, hi ha altres diagonals que aporten un determinat valor, implica que el senyal transmès es repeteix en d'altres instants de temps més tard que el camí principal. La suma de la matriu identitat $\underline{\underline{I}}$ a la matriu $\underline{\underline{E}}$ dóna una matriu multidagonal, i tindrà més o menys ample de banda al voltant de la diagonal principal en funció de la quantitat de camins que proporcioni el canal.

El vector de correlació creuada $\underline{p}_{MPH} = E\{\underline{c}_{dec}[n]\hat{\underline{s}}_{dec}[n]\}$ també es veurà afectat per aquestes repeticions fora de sincronia, i per tant, no disposarà d'un sol valor màxim, tot i que el camí principal sempre conservarà el seu valor màxim.

Si a aquest valor li fem el producte amb el vector de correlació creuada, el resultat final queda de la forma següent:

$$\underline{w}_{MPH}^{opt} = \frac{1}{1 + \sigma_n^2} (\underline{\underline{I}} + \underline{\underline{E}}) \underline{p}_{MPH} \quad (\text{B.5})$$

En la resposta impulsional final pot haver-hi més d'un valor on el filtre hagi convergit. Uns exemples de matriu d'autocorrelació es poden observar a la figura B.4 (per un valor de $SNR = 5dB$ en (a) i per un valor de $SNR = -5dB$ en (b)). En aquestes gràfiques

²En aquest exemple concret, el soroll associat fora de la diagonal principal és a causa de que la correlació creuada de la seqüència PN usada (una seqüència Gold [Gol68]) amb les dades rebudes no és zero fora del màxim. Empitjora lleugerament, per tant, el vector de correlació creuada.

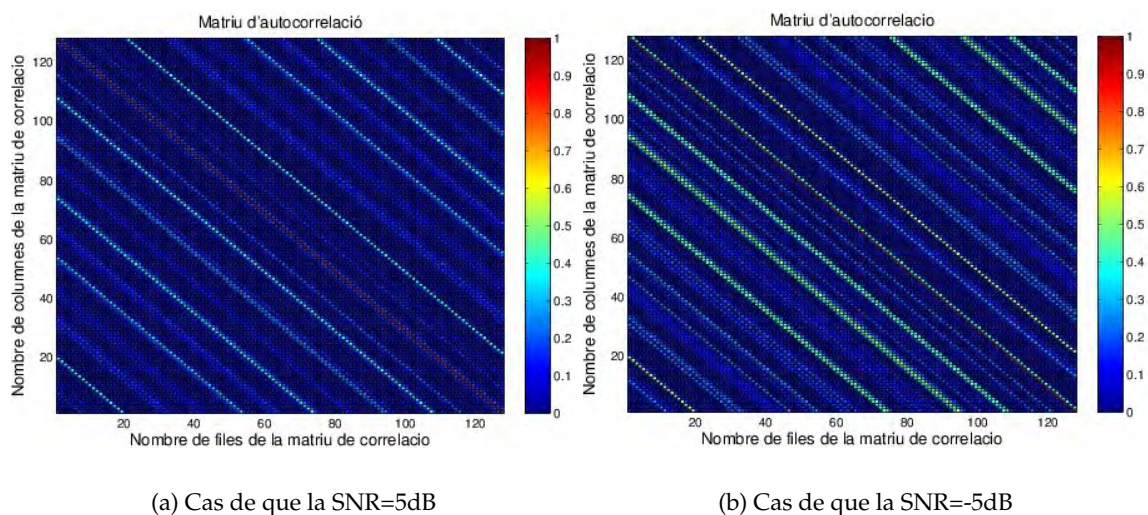


Figura B.4: Matriu d'autocorrelació de les dades d'entrada i vector de correlació creuada d'exemple en el cas de tenir un canal amb soroll i multicamí

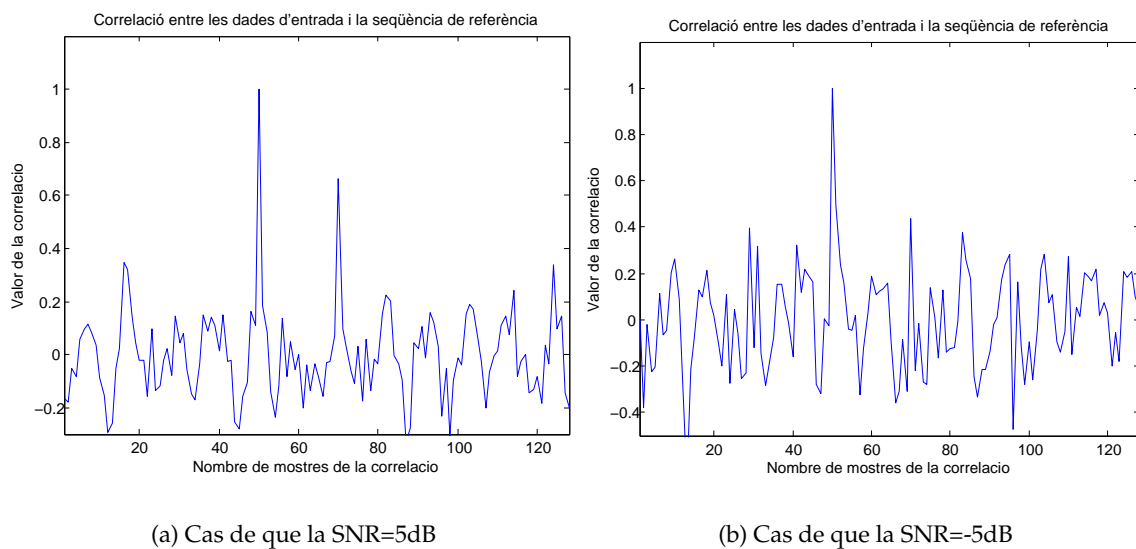


Figura B.5: Resposta del filtre LMS a la convergència amb multicamí

es comprova amb facilitat l'efecte del soroll i del multicamí en les correlacions. Hi ha repeticions múltiples de petites similituds de la seqüència enviada a una banda i altra de la diagonal principal. També s'adjunta un exemple de resposta impulsional del filtre LMS en el cas de soroll i multicamí en la figura B.5. En aquesta gràfica s'exemplifica que la resposta del filtre conté soroll i que el multicamí genera més màxims de similitud en la resposta impulsional. En aquest cas concret, es veu un camí repetit unes quantes mostres a la dreta del camí principal. Alhora, hi apareix clarament l'efecte del soroll. En aquest cas concret, s'ha simulat un canal amb dos camins, el segon té una amplitud al voltant del 60% respecte al camí principal.

B.3.4 Convergència del filtre LMS

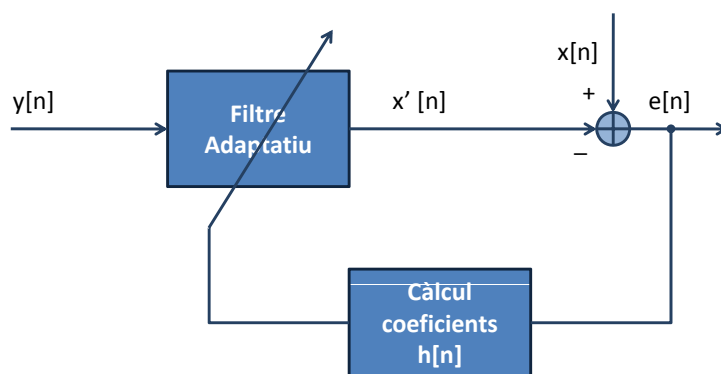


Figura B.6: Filtre adaptatiu de Wiener, que en el cas que ens ocupa serà un LMS (*Least Mean Square*)

Els filtres que s'usen a l'estructura, però, són adaptatius [Din97]. A la figura B.6 podem seguir el cas d'exemple amb el filtre adaptatiu LMS. L'algorisme de l'*steepest descent*, més detallat a l'annex B, fa una estimació de la matriu \underline{R} anomenada $\hat{\underline{R}}$, i també del vector \underline{p} , anomenat $\hat{\underline{p}}$ de tal manera que provoca la convergència del filtre a la solució desitjada.

Així doncs, les diferents iteracions del valor del filtre \underline{w} s'obtenen de la forma següent:

$$\begin{aligned}\underline{w}_{k+1} &= \underline{w}_k - \mu \hat{\underline{g}}_{wk} \\ &= \underline{w}_k + 2\mu(\hat{\underline{p}}_k - \hat{\underline{R}}_k)\underline{w}_k\end{aligned}\tag{B.6}$$

on el valor de $\hat{\underline{g}}_{w}$ representa una estimació del vector gradient de la funció objectiu

respecte als coeficients del filtre.

Una possible solució és estimar el gradient usant estimacions instantànies de \underline{R} i \underline{p} de la forma següent:

$$\begin{aligned}\hat{\underline{R}}_k &= \underline{y}_k \cdot \hat{s}_{k_{dec}}^T \\ \hat{\underline{p}}_k &= \underline{x}_k \cdot \underline{y}_k\end{aligned}\quad (\text{B.7})$$

i el gradient estimat ve donat per:

$$\begin{aligned}\hat{\underline{g}}_{wk} &= -2\underline{x}_k \underline{y}_k + 2\underline{x}_k c_{k_{dec}}^T \underline{w}_k \\ &= 2\underline{x}_k (-\underline{x}_k + c_{k_{dec}}^T \underline{w}_k) \\ &= -2e_k \underline{x}_k\end{aligned}\quad (\text{B.8})$$

L'algorisme restant està basant en el gradient, doncs, i minimitza la mitjana de l'error quadràtic, i té per equació d'actualitació la següent:

$$\underline{w}_{k+1} = \underline{w}_k + 2\mu e_k \underline{x}_k \quad (\text{B.9})$$

on cal escollir adequadament el paràmetre μ . En condicions ideals, com es detalla en aquest apartat, sense presència de soroll ni de cap altra alteració del senyal arribant, l'algorisme del gradient ha d'arribar a la mateixa solució que es detalla en l'equació B.1, i que es representa gràficament a la figura B.1. L'algorisme de convergència és vàlid pels casos que la convergència sigui possible, és a dir, pels casos que el senyal d'entrada $\hat{s}_{dec}[n]$ i el de referència $c_{dec}[n]$ tinguin algun tipus de similitud possible. Si no és així, el resultat de l'execució de l'algorisme no serà el que es reflecteix en la gràfica B.1, sinó que serà un vector resultat \underline{w} tot fixat a zeros, puix no hi haurà cap valor de la resposta impulsional del filtre que pugui posar el senyal c_{dec} en relació amb el senyal \hat{s}_{dec} .

D'altra banda, cal aclarir que en el cas de tenir una situació no ideal, sinó amb soroll o amb altres alteracions de canal com el multicamí, l'algorisme de convergència a seguir serà el que s'acaba de proposar igualment; el que canviarà serà la solució ideal cap a la que convergeix, tal i com s'ha presentat anteriorment a les equacions B.3 i B.5. És evident que les respostes impulsional d'aquests dos casos, ja siguin calculades en un entorn estàtic com si són aconseguides usant un algorisme iteratiu, seran més sorolloses i confuses en

la seva interpretació, però malgrat això, se'n podrà obtenir la informació per a realitzar l'adquisició.

Dos exemples de respostes impulsionalen casos de soroll o multicamí respectivament es poden observar a les figures B.3 i B.5 respectivament. En el cas d'afegir-hi soroll, s'observa la resposta \underline{w} del filtre amb un màxim clar, que és la posició de les dades d'entrada $\hat{s}_{dec}[n]$ respecte al senyal de referència $\underline{c}_{dec}[n]$ que disposa el filtre LMS, però també cal dir que la resta de mostres de la resposta impulsional són sorolloses, i no valen zero. En el cas de tenir multicamí, com s'observa a la figura B.5, no hi ha només un sol punt on es pugui dir que s'alinea la seqüència de referència, sinó tants com camins disposi el canal de comunicació. Així doncs, en la figura B.5 s'observa un camí principal i un de secundari, desplaçat unes quantes unitats més tard. En aquest sentit, s'ha pogut garantir a priori que els dos camins tinguin una diferència temporal menor que un temps de símbol T_s , per tal que apareguin dins de la mateixa resposta impulsional del filtre adaptatiu amb el mateix símbol d'informació. D'altra banda, com que el canal multicamí també disposa de soroll, s'observa com la resta de les mostres són sorolloses, com el cas de la figura anterior, on es disposava només de soroll (veure figura B.3).

Convergència del filtre LMS en el cas d'estar entre dos símbols

Un dels problemes que es planteja a l'estructura multiresolutiva és que els filtres adaptatius hagin de convergir enmig de dos símbols distints. Si aquesta és la circumstància, es pot donar el cas que en una part del filtre convergeixi a la referència durant una part del temps, i l'altra part del filtre convergeixi a la referència inversa. Les proves han estat realitzades per un filtre de longitud 128, i la referència és directament la seqüència PN $c[n]$.

Segons la convergència detallada en l'apartat anterior, si la similitud en les dades d'entrada i la referència és just complementària, és a dir, aproximadament en la meitat del filtre hi ha un canvi de signe del símbol d'entrada, la convergència del filtre es dificulta; l'aportació d'una convergència es veu decrementada per l'aportació de l'altra seqüència, i el resultat final és que el punt d'adquisició correcte no té una distinció clara, i es veu sorollós respecte al seu entorn. Es pot observar detalladament en la figura B.7, on s'ha fet una simulació d'aquest succés per a una seqüència PN de longitud 128, amb un filtre LMS de longitud 128, però on la referència $c[n]$ i les dades rebudes $\hat{s}[n]$ estan retardades un retard τ , que és mesurable en funció de la ubicació del màxim de cada un dels set filtres adaptatius. Els màxims decreixen en amplitud a mesura que s'acosten més al punt central del filtre, i el motiu és perquè els dos símbols consecutius que contenen el senyal $\hat{s}[n]$ dificulten la convergència al màxim. No serà així, en canvi, si els símbols consecutius són

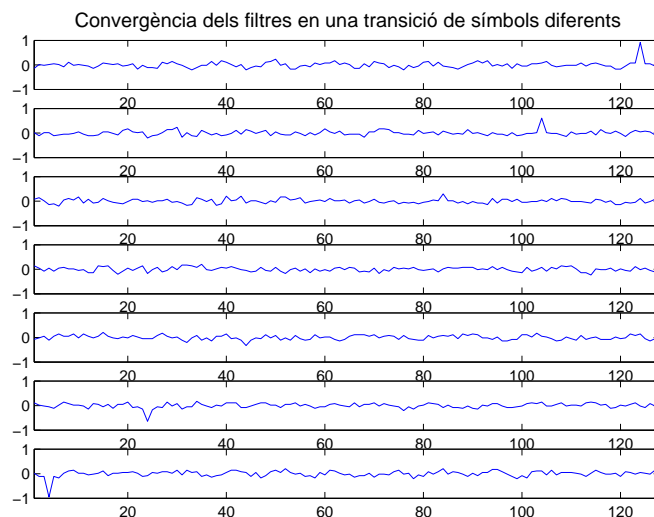


Figura B.7: Resposta del filtre LMS a la convergència entre dos símbols diferents. A les set figures es mostren les respostes impulsional dels filtres LMS convergits en set desplaçaments distints τ_i , i s'hi pot observar si aquest desplaçament afecta a la qualitat de la convergència.

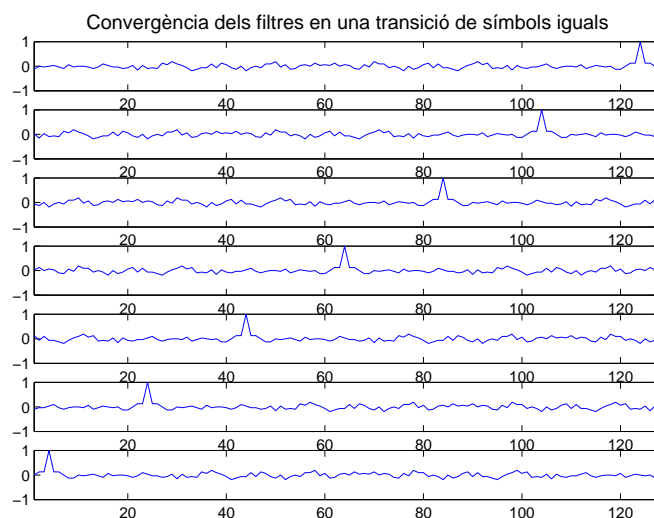


Figura B.8: Resposta del filtre LMS a la convergència entre dos símbols iguals. A les set figures es mostren les respostes impulsional dels filtres LMS convergits en set desplaçaments distints τ_i , i s'hi pot observar si aquest desplaçament afecta a la qualitat de la convergència.

iguals (veure figura B.8), es detallarà a continuació.

Aquest fet dóna motiu a la necessitat del filtrat d'*exponential smoothing* que es dissenya a l'apartat 5.6 i que ja se n'ha detallat la necessitat a l'apartat 4.2.2. Estadísticament, només la meitat de les dades contigües seran diferents, i per tant, davant del fet de que el sistema d'adquisició es trobi en aquesta posició crítica on l'adquisició resulta més difícil, trigaria el doble del temps mitjà a definir el punt d'adquisició amb precisió, i aquesta definició vindrà donada per l'estabilització realitzada amb el filtre d'*exponential smoothing*.

Per tal de completar la sincronització dels filtres adaptatius en el cas de situar-se entre dos símbols, a continuació s'adjunta una figura amb el comportament del filtre en el cas de situar-se entre dos símbols consecutius, però que aquest cas són iguals.

Tal i com s'observa a la figura B.8, en el cas de situar-se en la transició entre dos símbols iguals, aquest fet no afecta la convergència dels filtres adaptatius d'adquisició; el màxim dels filtres adaptatius no es mourà de lloc. És per aquest motiu que, estadísticament, com que els símbols enviats són equiprobables, en el cas de situar-se el punter d'adquisició en la pitjor situació possible, el que succeeix és que es duplica (aproximadament) el temps que triga el sistema en adquirir-se.

En canvi, si el punter d'adquisició es situa aleatòriament – cal tenir clar que, a priori, es desconeix el punt d'adquisició – en una posició més avantatjada, el temps d'adquisició no es veu demorat, com en el cas que els símbols consecutius siguin diferents. Malgrat tot, és important remarcar que la pitjor de les situacions possibles no impedeix l'adquisició – a no ser que sigui per problemes de *fadings* o SNR –, només el retarda lleugerament. Si es considera que t_{adq} és el temps que triga un filtre adaptatiu a convergir en la situació ideal (suposant que els símbols consecutius són iguals, i que el punter encerta accidentalment el punt correcte d'adquisició); la probabilitat de que el punter resti en una *zona de baixa adquisició*³ és de $1 - p_{adq \neq}$, aproximadament; els altres $p_{adq \neq}$ disposen d'una adquisició desigual en funció de la proximitat amb la transició, però l'adquisició es realitza. Els càlculs del temps mitjà que triga l'estructura a convergir respon a:

³Definim zona de baixa adquisició aquella que presenta més problemes de definició del màxim quan els símbols consecutius són diferents.

$$t_{adq}^{=sim} = p_{(1,1)}t_{adq} + p_{(-1,-1)}t_{adq} \quad (\text{B.10})$$

$$t_{adq}^{\neq sim} = \frac{1}{p_{adq\neq}} \left[p_{(1,-1)}t_{adq} + p_{(-1,1)}t_{adq} \right] \quad (\text{B.11})$$

$$\begin{aligned} t_{adq}^- &= t_{adq}^{=sim} + t_{adq}^{\neq sim} = \\ &= \left[p_{(1,1)}t_{adq} + p_{(-1,-1)}t_{adq} \right] + \left[\frac{1}{p_{adq\neq}} \left[p_{(1,-1)}t_{adq} + p_{(-1,1)}t_{adq} \right] \right] = \\ &= \frac{1}{4}t_{adq} + \frac{1}{4}t_{adq} + \left[\frac{1}{p_{adq\neq}} \left[\frac{1}{4}t_{adq} + \frac{1}{4}t_{adq} \right] \right] = \\ &= \frac{1}{2}t_{adq} + \frac{1}{p_{adq\neq}} \frac{1}{2}t_{adq} = \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{p_{adq\neq}} \right) t_{adq} \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

El valor final tancat de temps d'adquisició depèn de quin límit es posi a la zona de baixa adquisició, però està clar que aquest succés puja lleugerament el temps que triga el sistema a adquirir-se. Per tant, el temps d'adquisició mitjà final t_{adq}^- és més elevat que el temps d'adquisició en les millors condicions. Exactament, el temps mitjà final que s'obté és de $\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{p_{adq\neq}} \right) t_{adq}$. En funció del valor que prengui $p_{adq\neq}$, el temps amigitanat final serà més gran o més petit. Per posar un exemple, si la probabilitat d'adquisició en el cas que els símbols siguin distints és $p_{adq\neq} = 1/2$, el temps final d'adquisició esdevé $\frac{3}{2}t_{adq}$, és a dir, s'incrementa en el 50%.

B.4 Adaptació de nomenclatura per a l'estructura multiresolutiva

Tots els detalls donats fins ara cal adaptar-los a nivell de nomenclatura a l'algorisme de l'estructura multiresolutiva. L'algorisme s'escriurà, doncs, de la forma següent:

- $\underline{h}_{inst}^i = \underline{0}$
- mentre $k \geq 0$
 - $e(k) = \underline{c}_{dec}[k] - \underline{s}_{dec}^T[k] \cdot \underline{h}_{inst}^i(k)$
 - $\underline{h}_{inst}^i(k+1) = \underline{h}_{inst}^i(k) + 2\mu e(k)\underline{s}_{dec}[k]$

Parlarem, doncs, d' \underline{h}_{inst}^i , entenent com que correspon a la resposta impulsional instantània de cada un dels M filtres adaptatius, tal i com s'explica a l'apartat 4.2.2. Aquests

filtres s'inicialitzaran a zero a cada temps de símbol. Aquesta inicialització es realitza perquè res del que hagi pogut succeir amb anterioritat no afecti les decisions futures d'aquest filtre. En la seva convergència, si es tracta del filtre que convergirà, si el bit enviat és un +1 o un -1, el filtre adaptatiu convergirà cap a un màxim o un mínim respectivament. Malgrat el signe, el sistema es fixarà només en la forma del filtre i màxim del valor absolut. En la primera proposta [Mor01], el valor de μ que defineix la convergència dels filtres es fixa a $\mu = 0.3$, per considerar que troba un equilibri entre la velocitat de convergència i l'estabilitat.

El paràmetre μ és, però, clau per a determinar la bona convergència dels filtres, i per tant, per a garantir l'adquisició. Ha calgut realitzar un estudi exhaustiu dels valors que pot prendre $\mu \in [0, 1]$, emmarcat en els escenaris de simulació que imiten el comportament de l'entorn ionosfèric. Serà la quarta de les millores aportades a l'estructura. L'estudi del paràmetre μ es portarà a terme en aquest mateix treball, a l'apartat 5.5.1.

APÈNDIX C

RESULTATS COMPLETS DE LA CONVERGÈNCIA DE μ I β

C.1 Optimització del paràmetre μ

A continuació es presenten els resultats complets per a les longituds 100 i 600 de les simulacions d'optimització del paràmetre μ . La $\beta = 0.001$ en totes aquestes simulacions.

C.1.1 Resultats per a la longitud 100

A continuació es mostren a les figure C.1, C.2, C.3 i C.4 les gràfiques resum de l'escombrat del paràmetre μ per a una longitud de 100 símbols. Cada bloc de gràfiques consta de les dades següents:

- El % d'adquisició correcta
- El % de *tracking* correcte
- El % de màxims de correlació creuada que encerten el lloc correcte d'adquisició (segons el lloc estimat, puix que es tracta de simulació podem assumir que coneixem el lloc d'adquisició correcte)
- El temps mig que triga en adquirir-se
- El temps mig que roman adquirit
- El temps que triga en adquirir-se, si és que s'aconsegueix adquirir

- El nombre de vegades que s'adquireix
- El temps total que roman adquirit
- El temps total que triga en adquirir-se

Aquesta bateria de dades han estat necessària per tal de determinar quins són els millors valors de μ per al cas que es mostra.

C.1.2 Resultats per a la longitud 600

A continuació es mostren a les figure C.5, C.6, C.7 i C.8 les gràfiques resum de l'escombrat del paràmetre μ per a una longitud de 600 símbols. Cada bloc consta de les mateixes mesures realitzades en la longitud 100.