

Nuevas técnicas para el sistema de control de un receptor multirresolutivo de DS-SS CDMA¹

Clàudia Mateo Segura¹ y Rosa Maria Alsina Pages²,
Grupo de Investigación en Procesado Multimodal (GPMM),
Enginyeria i Arquitectura La Salle,
Universitat Ramon Llull, Barcelona, España
E-mail: cmateo@salle.URL.edu / ralcina@salle.URL.edu

Recibido: Febrero 20, 2008. Aceptado: Junio 25, 2008

RESUMEN

Este trabajo nace de la necesidad de encontrar nuevas soluciones para la etapa de control de un receptor multirresolutivo de espectro ensanchado de secuencia directa (DS-SS) que trabaja en un entorno multiusuario (CDMA) sobre canal ionosférico. El canal ionosférico presenta unas características inherentes a su naturaleza que provocan que las comunicaciones vía ionosférica sean complicadas por lo que a estabilidad y robustez se refieren. La finalidad de este trabajo es presentar el uso de un sistema de control específico para el receptor multirresolutivo, que puede aumentar su fiabilidad de demodulación, dotándolo de herramientas para discriminar las situaciones favorables de las críticas y haciendo predicciones sobre la bondad de los datos demodulados. Por lo tanto el receptor será capaz de dar mejores resultados en términos de BER (*bit error rate*) para entornos con SNR cambiante y entornos multiusuario.

Palabras clave: sistema de control, receptor multirresolutivo, control inteligente, redes neuronales, fuzzy logic.

ABSTRACT

In this work, new proposals for the control stage of a direct sequence spread spectrum (DS-SS) receptor in multiuser time - varying environments (CDMA) are presented. Fine variant channels present some inherent features which difficult communications in terms of robustness and stability. In this paper, the use of specific controllers for the multi-resoluteness receptor is proposed, rather than using general schemas. Specific controllers increase demodulation reliability, giving the receptor some tools to discriminate favourable situations from critical ones, and moreover, making predictions about the goodness of the demodulated data. The aim of using new controller stages is to provide better results in terms of BER (*bit error rate*) in multiuser time-varying environments.

Key Words: control system, multi-resolutive receptor, intelligent control, neuronal networks, fuzzy logic.

1. Introducción

La etapa de adquisición es una de las fases más sensibles en un receptor de espectro ensanchado de secuencia directa (DS-SS) [1,2]. Existen diferentes esquemas para lidiar

¹ Trabajo ganador de la Medalla "Hno. Salvador González 2008", Nivel: Licenciatura, Categoría: Avanzada, Área: Ingeniería y Tecnología, XV Jornadas de Investigación, Universidad La Salle, Mayo 2008.

con este problema, como son la búsqueda serie y los algoritmos paralelos. Los algoritmos de búsqueda serie requieren una coste computacional baja pero su velocidad de convergencia es lenta. Por otro lado, los sistemas paralelos tienen una convergencia rápida pero requieren una carga computacional elevada. Como compromiso, en este trabajo se usa la estructura multirresolutiva, que aúna una carga computacional baja y una velocidad de convergencia alta, presentada en [3].

Sin embargo, es importante diseñar adecuadamente la etapa de control ya que supone un factor clave en el comportamiento global del sistema. Esto llega a ser todavía más crucial cuando se trabaja en canales variantes en el tiempo, donde la relación señal a ruido (SNR) no es constante. Diversos factores contribuyen al comportamiento del sistema de adquisición [4]: la incertidumbre sobre la fase del código, la distorsión del canal y sus variaciones, el ruido y la interferencia, y la aleatoriedad de los datos. Por lo tanto, el uso de herramientas avanzadas como la lógica difusa [5] o las redes neuronales [6] deberían usarse para solventar la compleja estimación de la posición de adquisición. El estimador basado en lógica difusa usado en este trabajo se presentó en [7]. Además, se ha usado para controlar un algoritmo de búsqueda serie y una estructura multirresolutiva [8,9]. En trabajos previos de investigación se puso énfasis en el desarrollo de sistemas de adquisición para canales no selectivos en frecuencia con variaciones rápidas de la SNR [3,10]. En este trabajo se presenta una nueva propuesta para el sistema de adquisición usando redes neuronales, mejorando así investigaciones previas realizadas en este campo [3,8].

Este artículo se estructura de la manera siguiente: primero, en el apartado 2 se marcarán los objetivos. En la sección 3, se hace un pequeño resumen de los conceptos básicos de espectro ensanchado y de la estrategia de adquisición multirresolutiva. El estimador basado en lógica difusa y el basado en redes neuronales, diseñados para la etapa de adquisición, se presentan en el apartado 4. En el apartado 5 se muestran algunos de los resultados obtenidos en relación con la fiabilidad de la estimación para la adquisición y para la SNR en canales con variaciones rápidas de la SNR. Las valoraciones sobre los resultados y sobre las líneas de futuro se detallan en la sección 6, de conclusiones.

2. Objetivos

La idea básica de este trabajo es demostrar cómo un sistema de control inteligente puede mejorar el comportamiento de un receptor de DS-SS. Para poder responder esta pregunta, tenemos que conocer en qué ámbito trabajamos, cuáles son sus características y estudiar cuáles son las posibles soluciones que se nos plantean.

Por lo que respecta al ámbito de trabajo, estudiaremos las características de las señales de espectro ensanchado de secuencia directa, su aplicación en entornos multiusuario y veremos en detalle el funcionamiento de uno de los receptores que actualmente da mejores resultados: el multirresolutivo.

En relación con las alternativas planteadas, veremos cómo funcionan diferentes sistemas de control no lineal. A continuación utilizaremos estos esquemas sobre el receptor multirresolutivo, proponiendo alternativas y diseños nuevos.

Una vez que nos hayamos situado en el entorno de trabajo y hayamos planteado las diferentes soluciones que tenemos al alcance, será el momento de probar el comportamiento de estos controladores. Finalmente, extraeremos conclusiones sobre si el hecho de utilizar un sistema de control más complejo del que ya estaba implementado, nos aportaría mejoras al comportamiento global del receptor.

Por lo tanto, al finalizar este trabajo deberíamos ser capaces de valorar si podemos mejorar los resultados del receptor multirresolutivo incorporando un sistema de control

específico de diseño innovador, dando como evidencia pruebas en diferentes entornos contrastadas con el comportamiento de un controlador que actúe como referencia.

3. Marco teórico y estado del arte

En primer lugar se presentará el sistema de transmisión de información que se utiliza en el trabajo, que es el espectro ensanchado. Acto seguido, se hablará del sistema de adquisición utilizado, y que requiere del sistema de control que se ha diseñado. Finalmente, se desarrollará un breve resumen de la teoría de controladores que se utilizan, desde el controlador lineal por estabilidad usado, hasta un breve resumen de los métodos de lógica difusa y redes neuronales.

3.1. El espectro ensanchado

En este punto se comentan las bases del espectro ensanchado², cuáles son sus características, sus ventajas y sus inconvenientes, así como sus aplicaciones más usuales.

3.1.1. Conceptos generales

Los sistemas de espectro ensanchado se caracterizan porque utilizan un ancho de banda muy superior al que estrictamente se necesitaría para enviar la información a la velocidad deseada. Para conseguir este ensanchamiento se utilizan códigos que son independientes de la información a enviar. Estos códigos se conocen con el nombre de secuencias seudo aleatorias o secuencias PN, están formadas por un conjunto de pulsos binarios llamados chips de amplitud $+1/-1$. Se llaman de esta manera ya que sus características de auto correlación dentro de un periodo básico son muy similares a las del ruido gaussiano. [1,11]

En función de cómo utilicemos estos códigos para modular nuestra señal tendremos diferentes tipos de espectro ensanchado: [2,12]

- **Señales de secuencia directa (DS-SS):** se utiliza una secuencia PN para modular directamente los bits a enviar. Ver figura 1.

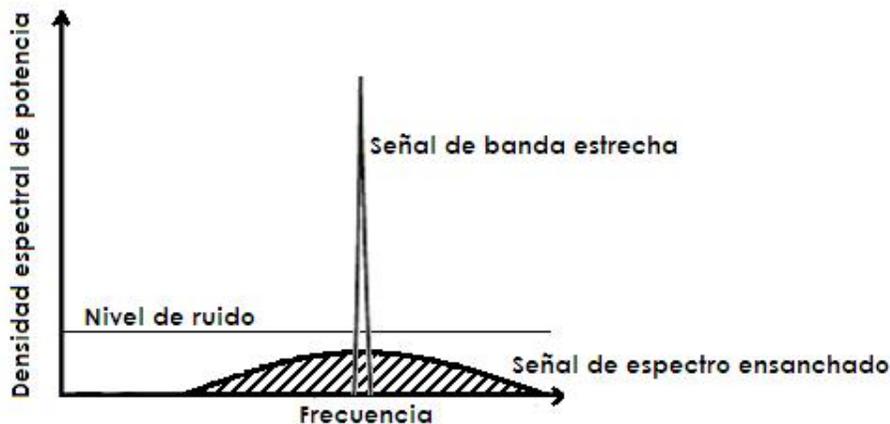


Figura 1. Comparación del espectro ocupado por una señal SS y una señal modulada de banda estrecha.

- **Señales de salto frecuencial (FH-SS):** la secuencia PN determina los intervalos de frecuencias donde se transmite la señal. Ver figura 2.

² Espectro ensanchado es la traducción para *Spread Spectrum*.

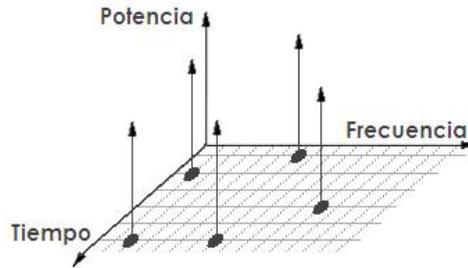


Fig. 2. Representación de una señal modulada con salto frecuencial.

- **Señales de salto temporal (TH-SS):** la secuencia PN determina los instantes temporales donde se transmite la señal. Ver figura 3.

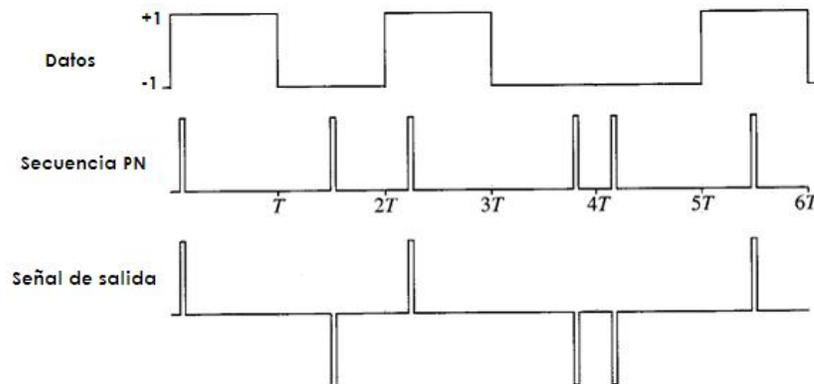


Fig. 3. Filosofía de funcionamiento de las señales de salto temporal.

3.1.2. Características del espectro ensanchado

El uso del espectro ensanchado reporta diversas ventajas, entre ellas cabe citar la robustez a las interferencias y la mejora de la SNR. En recepción se tiene la señal de interés juntamente con una interferencia de banda estrecha y de gran potencia. El hecho que la señal interferente no esté codificada con la secuencia PN, provoca que cuando se desensancha la información deseada mediante esta secuencia, la interferencia quede ensanchada. Por lo tanto, si se aplica un filtro paso banda para quedarse con la información, sólo interferirá la porción de la señal interferente que se ha ensanchado y que caiga dentro del ancho de banda del filtro. [1,11]

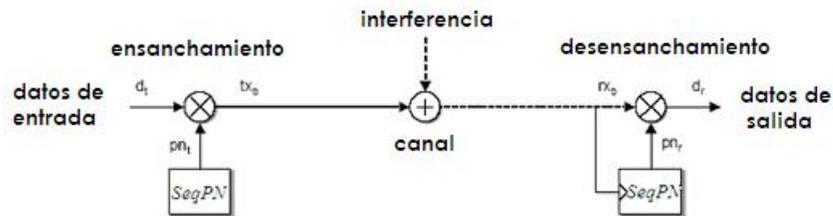


Fig. 4. Robustez a las interferencias.

Esto mismo puede aplicarse a la interferencia multicamino. Cada uno de los rebotes que nos llegan en recepción, por el hecho de no estar sincronizados con la onda directa, se convertirán en una interferencia más del canal cuando los desensanchemos.

Otra de las ventajas importantes que nos ofrecen los sistemas de espectro ensanchado tiene que ver con la privacidad de los datos. La resistencia a la interceptación

es debida al hecho de que un receptor no autorizado canal no podrá decodificar la señal ensanchada si no conoce la secuencia PN con la que se ha codificado el mensaje original. [4,12]

Después de enumerar algunas de las ventajas de este tipo de sistemas, también debemos hacer hincapié en algunos inconvenientes. Entre ellos nos encontramos con el aumento de la complejidad de los sistemas de recepción, ya que los receptores de espectro ensanchado requieren estar perfectamente sincronizados con el transmisor para poder decodificar los datos de manera correcta, con lo que presentan una complejidad añadida. También citar el efecto *near-far*, que se produce por la diferencia de niveles de potencia en recepción cuando existen diversos usuarios en el canal situados a diferentes distancias del receptor. Esto produce que las interferencias provocadas por los demás usuarios sobre el usuario de interés sean de amplitudes diferentes. La solución para este problema es usar controles de potencia que avisen a los usuarios del nivel de potencia detectado para que lo reajusten. [2,13]

3.1.3. Aplicaciones de los sistemas de espectro ensanchado

A raíz de las ventajas que hemos citado, muchas son las aplicaciones que usan espectro ensanchado, se pueden nombrar algunas de ellas. [2,11] Un primer grupo de aplicaciones aprovecha la robustez a las interferencias para suprimir o evitar los efectos perjudiciales de las interferencias provocadas por la utilización conjunta del canal con otros usuarios, por la propagación multicamino o bien por interferencias provocadas intencionadamente. [14] Otras aplicaciones, usan la característica de privacidad para esconder una señal transmitiéndola a poca potencia y haciendo que ésta sea difícil de detectar por otros receptores, o bien, simplemente, para conseguir privacidad en la transmisión de mensajes incluso con más interlocutores. [1,14]

3.1.4. Elementos de un sistema de comunicaciones DS-SS/CDMA

El emisor típico de espectro ensanchado de secuencia directa contiene un generador de secuencias PN. Esta secuencia se multiplicará por cada uno de los bits de información que queremos enviar y se transmitirá por el canal. [13,14]

El receptor realiza tres funciones principales: detectar la presencia de la señal, desensancharlo y demodular el mensaje. Para poder hacerlo necesita conocer la secuencia PN con la que se ha modulado la señal en transmisión. Por eso, en el receptor también tenemos un generador de secuencias PN.

La fase más crítica está en conseguir la sincronización emisor-receptor, ya que de lo contrario la información será recodificada en lugar de decodificada. Para tal efecto, la fase de sincronización se resuelve mediante la adquisición y el *tracking*. [1,2]

- **Adquisición:** realizamos una búsqueda inicial del punto correcto de sincronización, dada la alta dimensionalidad del espacio de búsqueda, con esta fase se pretende reducir la incertidumbre temporal para que el problema se pueda resolver de forma lineal. Existen diferentes técnicas que suponen un compromiso entre el coste computacional y el tiempo necesario para encontrar el punto de sincronismo.
 - **Técnicas paralelas:** usan un banco de correladores con diferentes valores de desplazamiento que dan una primera aproximación de la posición correcta. Es un sistema rapidísimo pero muy costoso computacionalmente.
 - **Técnicas serie:** buscan el punto de sincronismo de forma secuencial. Se inicializan aleatoriamente y realizan una búsqueda exhaustiva. Es un método lento, pero su coste computacional es aceptable.

- **Tracking:** esta fase hace un ajuste del punto exacto de sincronización mediante un bucle de control lineal. Las técnicas más usadas, *delay-locked loop* y *tau-dither loop*, hacen estimaciones de la correlación de la secuencia incidente con versiones desplazadas de la secuencia interna para poder determinar la posición exacta de sincronismo. [15]

Después de la fase de sincronismo, el detector se encarga de decidir el valor del bit recibido.

3.2. El receptor multiresolutivo

El objetivo de esta estructura [16] es conseguir un algoritmo que presente la velocidad de convergencia de un sistema paralelo con la carga computacional de un serie (ver figura 5) que, además, resuelva simultáneamente el problema de la adquisición y el *tracking*.

En primer lugar, el receptor diezma la señal recibida en un factor igual a las muestras por chip que contenga (M). De este modo, la señal resultante sólo contiene una muestra por chip y se elimina la información redundante, simplificando la complejidad de las etapas posteriores. También se hace lo mismo con la secuencia PN que utilizamos de referencia.

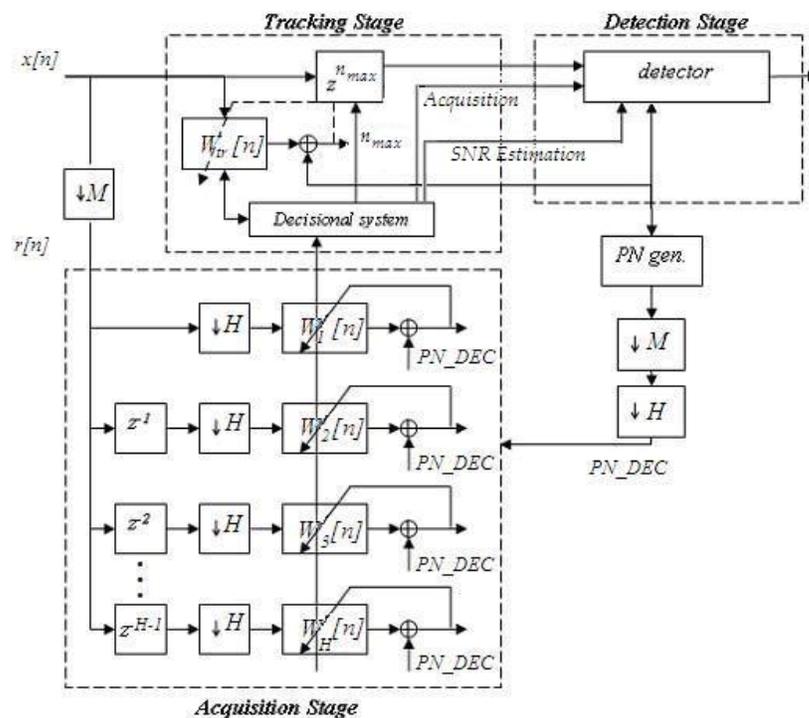


Fig. 5. Diagrama de bloques del sistema multiresolutivo obtenido mediante el programa de simulación.

La fase de adquisición está formada por un conjunto de H ramas que se alimentan con diferentes versiones de la señal diezmada. Cada rama está formada por un filtro LMS [15] que se ha entrenado con versiones también diezgadas de la secuencia PN del usuario de interés. Cada una de las ramas intenta encontrar el punto correcto de adquisición dentro la señal de entrada. En condiciones ideales, uno de los filtros adaptativos convergirá a:

$$b[k] \cdot \delta[n - \text{retardo}] \quad (\text{Ec. 1})$$

donde: $b[k]$ es el bit de información que se está procesando y el *retardo* es la diferencia temporal entre la secuencia PN de la señal de entrada y la secuencia PN de la señal de referencia.

Si todo funciona correctamente, sólo uno de estos filtros adaptativos estará alineado con la señal recibida y, por lo tanto, nos dará un máximo en la salida. Los otros filtros no estarán tan correlados con la señal de entrada y por lo tanto no nos darán valores significativos en la salida. En conclusión, podemos decir que la rama que nos dé un máximo, nos dará una aproximación del punto correcto de adquisición.

La siguiente fase que nos encontramos es la de *tracking*, esta etapa hace un ajuste más preciso del punto de adquisición. Tenemos que reconstruir el punto correcto sobre la secuencia original sin diezmar. Por lo tanto, deberemos tener en cuenta el diezmo en factor H , que depende del número de filtros de la estructura, y el diezmo inicial, en factor M . Con este proceso no perdemos información, pero sí resolución sobre el punto correcto de adquisición, por eso necesitaremos otro filtro adaptativo que a partir de la posición aproximada, nos ajustará la posición exacta.

El algoritmo propuesto inicializa los filtros cada tiempo de símbolo y se aplica a cada una de las ramas. Durante este período el algoritmo no es capaz de converger a la posición deseada debido a la corta duración del tiempo de símbolo en comparación con el tiempo de convergencia. Cada tiempo de símbolo, se calcula el módulo de la mediana de los resultados de las distintas ramas de la estructura, para conseguir una estimación robusta de la secuencia PN. Una vez que los filtros han convergido se aplica un algoritmo detector de pico para localizar la posición de los máximos.

El coste computacional global es ligeramente superior al de un esquema serie, pero se justifica ampliamente por la reducción del tiempo medio que necesita para adquirirse la señal y para la robustez del esquema. También debemos tener en cuenta que la etapa de *tracking* se resuelve en el mismo esquema.

La última fase, la detección, es la que determina si el símbolo recibido vale +1/-1. En otros trabajos se ha profundizado en esta etapa. [17]

3.3. Sistemas de control

El sistema de control es una pieza clave en la estructura multirresolutiva, puesto que se trata del bloque que da estabilidad a todo el sistema, y que, por lo tanto, permitirá que el punto correcto de demodulación se fije una vez que haya indicios de que la estructura ha convergido correctamente. La estructura multirresolutiva resuelve la adquisición en casos de desvanecimientos, o en situaciones de relación señal a ruido muy adversas.

La estructura multirresolutiva original incluye un sistema de control muy sencillo por estabilidad. [11] Para poder hacer estudios posteriores y comparar los resultados con los controladores que diseñaremos, explicaremos en qué consiste, y qué resultados ofrecía. Pero los sistemas de control que se proponen en este trabajo son sistemas de control no lineal, que se utilizan cuando el comportamiento de los sistemas que queremos controlar no se puede expresar de forma lineal. En estos casos se requieren otros modelos matemáticos que responden a modelos cualitativos basados en reglas lingüísticas, modelos que dada su complejidad siguen razonamientos similares a la mente humana. A estos sistemas también se los conoce como controles inteligentes.

3.3.1. El sistema de control por estabilidad

La fase de adquisición del receptor, formada por cuatro filtros adaptativos, obtiene la posición aproximada de sincronización. Esta posición es el punto de partida para el filtro

de *tracking*, que hará un ajuste más cuidadoso de la posición correcta. El control de estabilidad interviene entre estas dos etapas. Su misión es mirar si la posición obtenida de la fase de adquisición se ha mantenido estable durante las últimas iteraciones, en caso afirmativo, actualizará la posición del filtro de *tracking*. Cuando el controlador actualiza la posición del filtro de *tracking*, se considera que el sistema está adquirido, de manera que se almacena este *flag* en una variable llamada *Adquisición*.

El objetivo de este sistema de control es dar estabilidad al receptor. Por ejemplo, en situaciones donde se puedan producir desvanecimientos de la señal, el sistema de control mantendrá el receptor en la misma posición de demodulación durante unas cuantas iteraciones, de manera que evitará la pérdida de sincronía.

En la figura 6, podemos ver el comportamiento de este controlador en un entorno donde la SNR varía de 0dB a -30dB. El gráfico superior nos muestra el porcentaje de tiempo que el receptor está adquirido en la posición correcta. Este dato se mide como el cociente entre las veces que el puntero se encuentra en la posición correcta de adquisición y el total de iteraciones de la simulación. Vemos que el porcentaje se mantiene por encima del 90% hasta los -15dB, a partir de esta SNR, empieza a decrecer rápidamente.

Por lo que refiere al gráfico inferior, nos muestra el tiempo medio en que el receptor se mantiene adquirido. Su finalidad es penalizar de manera severa las veces que el receptor pierde la sincronía. Vemos que el sistema presenta unos resultados óptimos hasta alrededor de los -14dB. A partir de ahí los resultados decaen rápidamente porque el sistema pasa de la adquisición a la no adquisición de manera repetida.

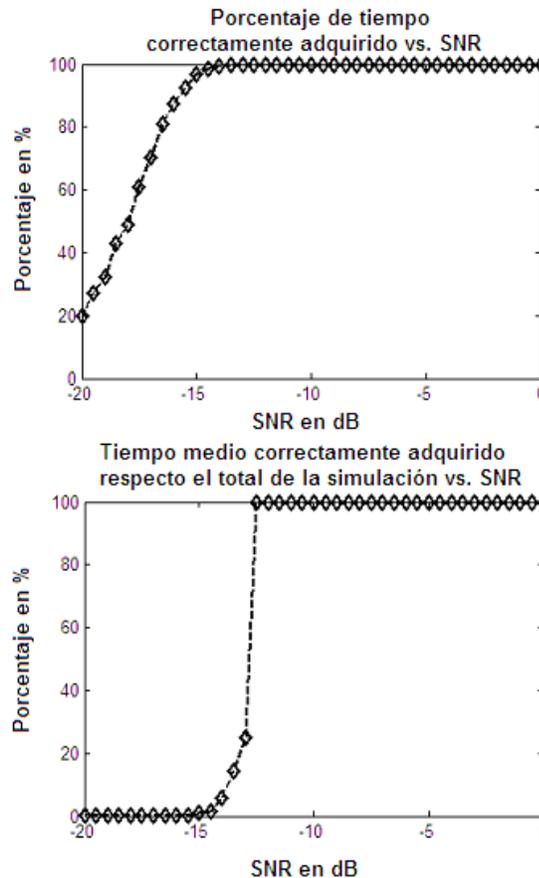


Fig. 6. Sistema de control por estabilidad en un entorno de SNR variable.

La figura 7 muestra las mismas medidas que la figura anterior pero en un entorno diferente, en este caso en presencia de varios usuarios. El porcentaje de tiempo correctamente adquirido se mantiene muy alto durante toda la simulación, que contempla de los 2 a los 15 usuarios simultáneos. Por el contrario, la medida del tiempo medio descubre que el sistema empieza a mostrar inestabilidad a partir de los 8 usuarios simultáneos.

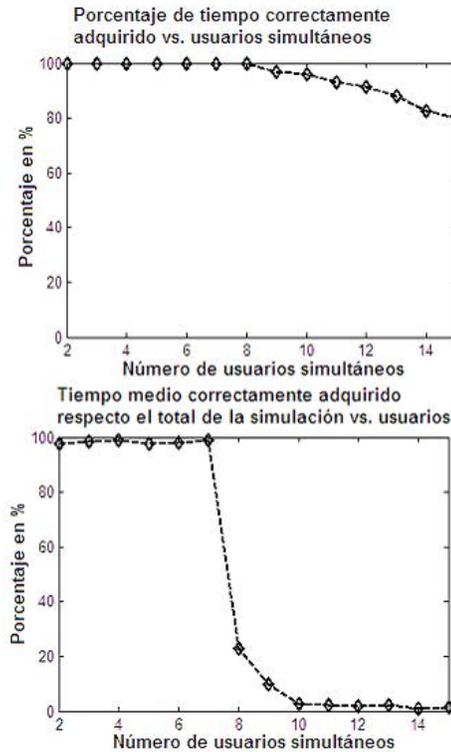


Fig. 7. Sistema de control por estabilidad en un entorno multiusuario.

3.3.2. Sistemas de control no lineal

Los sistemas de control no lineal estudiados e implementados son la lógica difusa y las redes neuronales. A continuación se habla brevemente de su funcionamiento, ventajas e inconvenientes y se detalla su implementación.

3.3.2.1. Lógica difusa

Los controladores convencionales usan la lógica binaria, de modo que sus decisiones son rígidas: verdadero o falso. Los controladores difusos utilizan la lógica difusa, que se acerca más a la manera de pensar humana y permite la implementación de sistemas donde las decisiones no son solamente '0' o '1'. [18]

Entendemos por conjuntos no difusos todos aquellos formados por elementos que claramente se pueden considerar un todo. En cambio, la pertenencia a un conjunto difuso no tiene un criterio único y puede depender de las circunstancias o del punto de vista. Por eso se define el grado de pertenencia, un valor que asigna a cada miembro del grupo una probabilidad más o menos alta de pertenecer al grupo. Si el grado de pertenencia tiene valor '1', el elemento pertenece inequívocamente al grupo, si el valor es '0', el elemento no pertenece. Para definir esta relación se definen las funciones de pertenencia. Estas funciones, dado un elemento, le asignan un valor de grado de

pertenencia. Las variables de los conjuntos difusos pueden ser algebraicas o lingüísticas, es decir, palabras o frases. [19]

Los controladores difusos están formados por tres etapas básicas:

- *Fuzzification*, encargada de convertir un dato no difuso en un valor difuso. Se utilizan las funciones de pertenencia adecuadas.
- *If – then rules*, están formadas por un conjunto de sentencias que controlan la manera de actuar del controlador. La parte *if* corresponde a la entrada del sistema, mientras que la *then*, afecta a la salida del mismo. El controlador, mediante una entrada y las diversas reglas condicionales, es capaz de sacar una conclusión o salida. Ver figura 8.

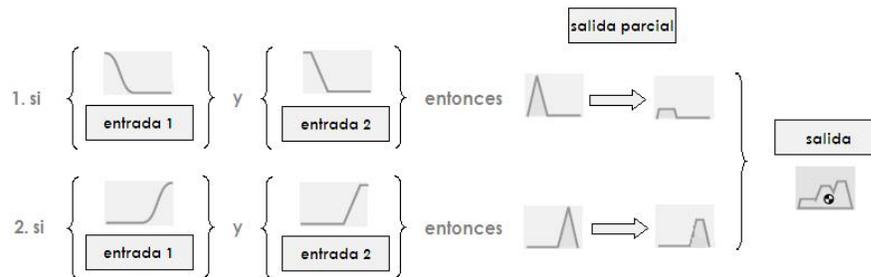


Fig. 8. If – then rules de un controlador difuso. [20]

- *Defuzzification*, encargada de convertir la salida del controlador en un dato no difuso. Se utilizan diferentes métodos como el del centroide, que suma todas las contribuciones en la salida y calcula el centro del área bajo la curva de la función de pertenencia final.

3.3.2.2. Redes neuronales

Una red neuronal se define como un procesador masivo paralelo y no lineal, formado por una distribución de neuronas, que son los elementos básicos. La función de la red depende de las conexiones entre las diferentes neuronas que la forman. Estas conexiones se pueden ajustar mediante ponderaciones que otorgan a las redes neuronales una gran flexibilidad en su comportamiento. Para ajustar estos pesos, las redes neuronales pasan por un proceso de aprendizaje. La arquitectura de una red influye decisivamente en su capacidad de aprendizaje, pero su diseño es difícil de escoger y a menudo se aplican métodos de prueba y error. [6]

El proceso de aprendizaje de una red neuronal permite ajustar los pesos asociados a cada una de las entradas. Este proceso consiste en la presentación de diversas asociaciones entrada-salida a la red neuronal. El objetivo es que mediante algún algoritmo, la red varíe el valor de los pesos hasta imitar la respuesta deseada. Es decir, mediante el entrenamiento de la red se pretende que ésta aprenda la relación entre el patrón y la respuesta, más allá de una secuencialidad entre ejemplos, por eso, los patrones se presentan en diversos órdenes. Cada conjunto de patrones presentado a la red con un orden concreto se llama *epoch*.

Las ventajas que presentan las redes neuronales se pueden resumir de la manera siguiente:

- Capacidad de generalización, la red neuronal extrae conceptos generales a partir de los ejemplos suministrados durante la etapa de entrenamiento. De manera que es capaz de dar respuesta a problemas nuevos basándose en la experiencia adquirida.

- Adaptabilidad y versatilidad, la red neuronal puede dar respuesta a problemas diferentes si se la reentrena (cambiando los pesos de recombinación) adecuadamente, de manera que no es necesario cambiar la estructura.

Por contra, se debe tener en cuenta que el uso de redes neuronales tiene que justificarse por la complejidad del sistema, en caso contrario, el coste computacional es innecesario. [2,18]

4. Propuesta de sistema de control no lineal

Los controladores diseñados utilizan datos provenientes de la estructura multirresolutiva para poder predecir la probabilidad de adquisición y el valor de la SNR del canal en ese instante de tiempo, definidas *ad hoc* para los nuevos controladores. A continuación presentamos las variables de entrada de los controladores, así como las salidas que calcularemos en cada uno de ellos.

Variables de entrada y de salida

Se han definido cuatro variables con los datos de simulación de la estructura, utilizándose para ambos controladores. Tres de ellas hacen referencia a la media del módulo de los cuatro filtros LMS de la etapa de adquisición $W_{av_i}[n]$, especialmente al filtro LMS convergente con la secuencia diezmada (*PN_DEC*) $W_{con}[n]$, la otra hace referencia al filtro de *tracking* $W_{tr}[n]$.

- *Ratio₁*: se calcula como el cociente entre el valor de pico del filtro LMS convergente $W_{con}[n]$ y el valor medio de este, a excepción del valor máximo.

$$Ratio_1 = \frac{W_{con}[\tau]}{\frac{1}{N} \sum_{n=1; n \neq \tau}^W W_{con}[n]} \quad (\text{Ec. 2})$$

- *Ratio₂*: se calcula como el cociente entre el valor de pico del filtro LMS convergente $W_{con}[n]$ y el valor medio de los otros tres filtros en la misma posición $W_{av_i}[n]$.

$$Ratio_2 = \frac{W_{con}[\tau]}{\frac{1}{H-1} \sum_{i=1; W_{av_i} \neq W_{con}}^H W_{av_i}[\tau]} \quad (\text{Ec. 3})$$

- *Ratio₃*: se calcula como el cociente entre el valor de pico del filtro LMS convergente $W_{con}[n]$ y el valor medio de los otros tres filtros $W_{av_i}[n]$.

$$Ratio_3 = \frac{W_{con}[\tau]}{\frac{1}{H-1} \sum_{i=1; W_{av_i} \neq W_{con}}^H \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_{av_i}[n] \right)} \quad (\text{Ec. 4})$$

- *Ratio_{1tracking}*: se calcula como el cociente entre el valor de pico del filtro LMS de *tracking* $W_{tr}[\xi]$ y el valor medio de este, a excepción del valor máximo.

$$Ratio_{1track} = \frac{W_{tr}[\xi]}{\frac{1}{N} \sum_{n=1; n \neq \xi}^N W_{tr}[n]} \quad (\text{Ec. 5})$$

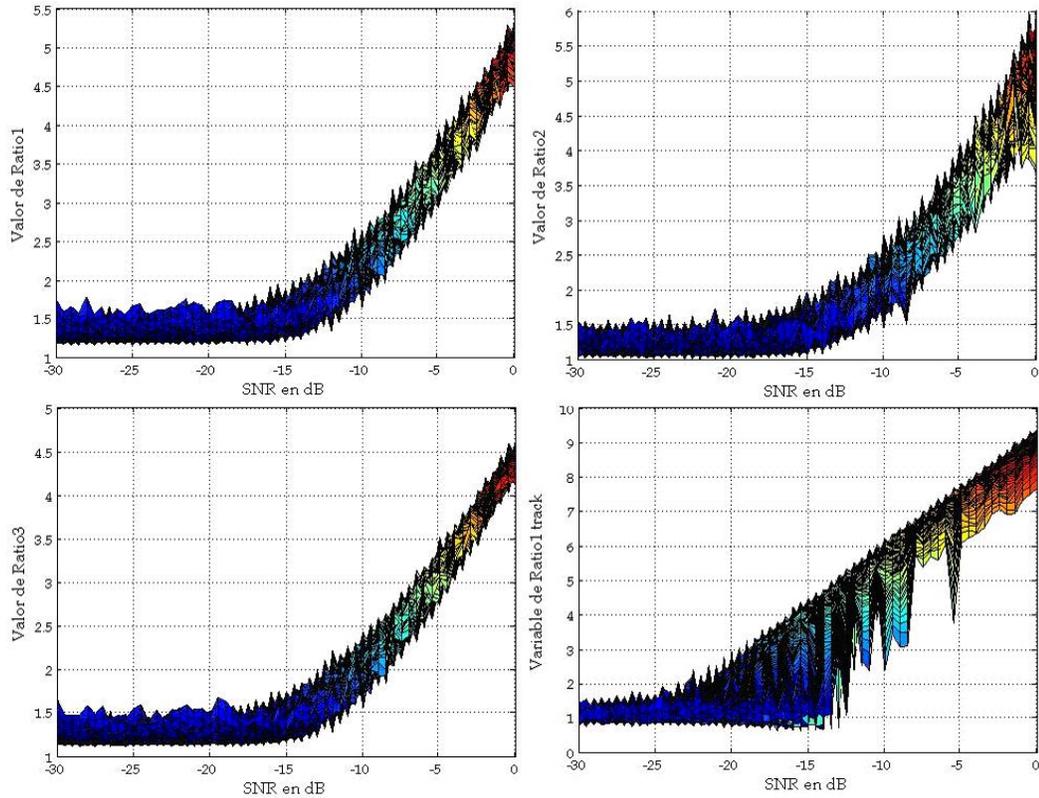


Fig. 9. Estudio de los diferentes ratios en un entorno de SNR variable.

En la figura 9, podemos ver el comportamiento de estas variables en un entorno donde la SNR varía desde 0dB hasta -30dB, en saltos de 0.5dB.

La figura 11 corresponde a los conjuntos difusos que se han extraído de las variables de entrada $Ratio_1$, $Ratio_2$, $Ratio_3$ y $Ratio_{1track}$. Como se puede observar, las tres primeras variables presentan un comportamiento muy similar y los conjuntos difusos que se han creado son los mismos. La variable $Ratio_{1track}$ difiere de las otras para no mostrar tanta estabilidad, pero como veremos más adelante, su papel será de soporte a las otras variables.

Acto seguido, en la figura 10, se puede ver el comportamiento de estas mismas variables en un entorno donde la interferencia no viene dada por el ruido del canal sino por la presencia de usuarios simultáneos. Se ha hecho un barrido que va desde los 2 hasta los 20 usuarios simultáneos.

Tal como se puede observar en la gráfica, a pesar de no representar los mismos datos, la forma de las variables de entrada $Ratio_1$, $Ratio_2$ y $Ratio_3$ se asimilan mucho en ambos escenarios, el de ruido del canal y el de multiusuario. Por eso, los conjuntos difusos creados para estas variables serán los mismos en ambos entornos (ver figura 11).

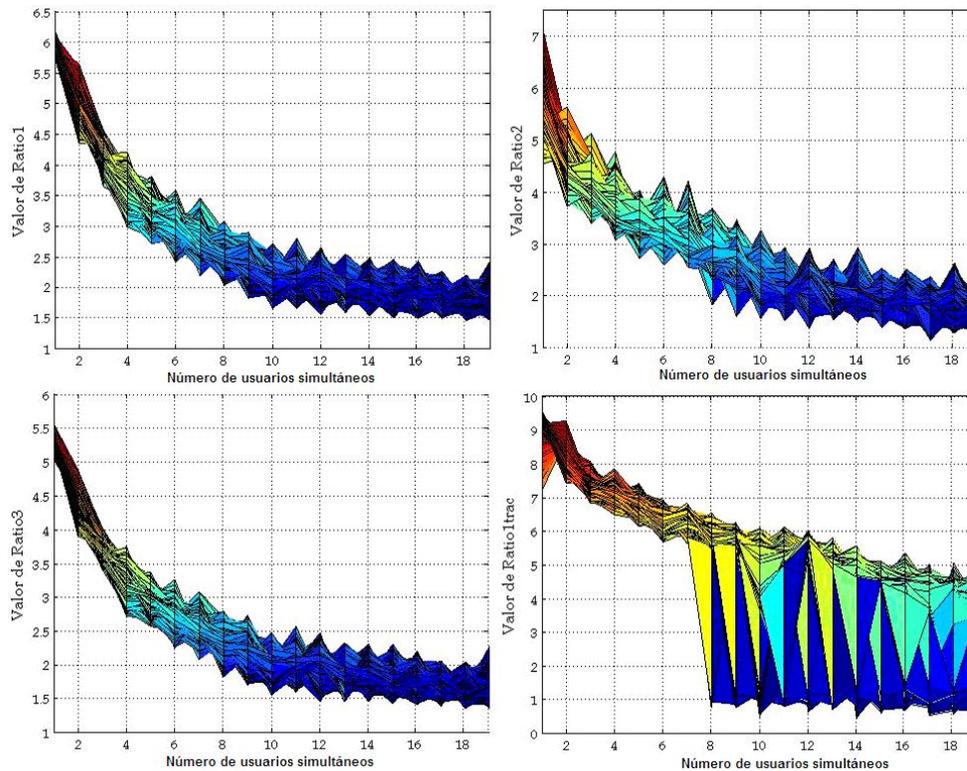


Fig. 10. Estudio de los diferentes ratios en un entorno multiusuario.

Las variables de salida de los sistemas son dos:

- **Adquisición:** esta variable puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1. Cuando toma el valor de la unidad, el sistema está *Adquirido* y cuando toma el valor cero, el sistema está *No adquirido*. El valor de la variable *Adquisición* nos muestra la fiabilidad del receptor al demodular la señal recibida, es decir, es una medida que indica si podemos fiarnos del valor demodulado o no. El receptor multirresolutivo nos da la posición aproximada de adquisición, pero es el control el que nos dirá la probabilidad de considerarnos adquiridos o no.
- **Estimación de SNR:** da un valor de la SNR estimada en el canal. En nuestro caso, un valor comprendido entre -30 y 0dB. Esta medida nos complementa la información de la variable *Adquisición*, así como también nos puede ayudar en la fase de detección.

3.4. Controlador con lógica difusa

Este controlador se ha diseñado con las variables de entrada comentadas anteriormente, agrupándolas en los grupos difusos que se observan en la figura 11.



Fig. 11. Conjuntos difusos para las diferentes variables de entrada.

Los resultados de la salida se obtienen mediante el método de *defuzzification* del centroide. [6] Calcularemos las dos salidas que se han definido ya con anterioridad, y que vemos en las figuras 12 y 13.

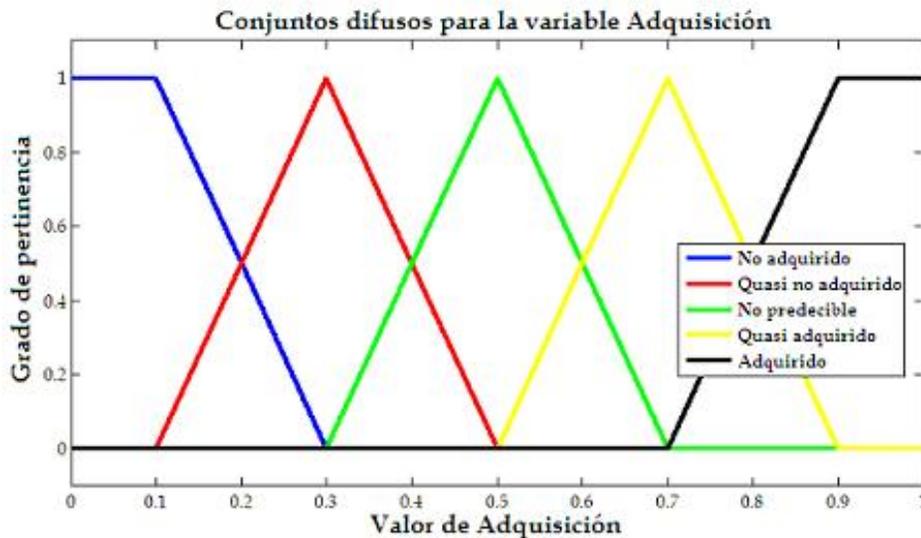


Fig. 12. Conjuntos difusos de la variable Adquisición.

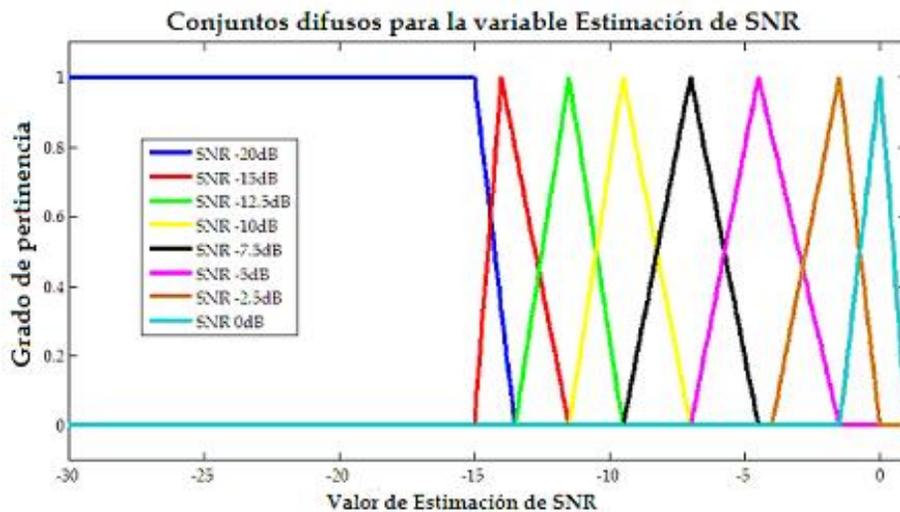


Fig. 13. Conjuntos difusos para la variable Estimación SNR.

Una vez definidas las variables y conjuntos difusos de entrada y de salida, es el momento de definir las reglas difusas que las relacionarán. Para hacerlo debemos

observar el comportamiento de las diferentes variables de entrada y ver cómo afecta a las variables de salida. En la figura 14 se puede ver un esquema general del sistema de control.

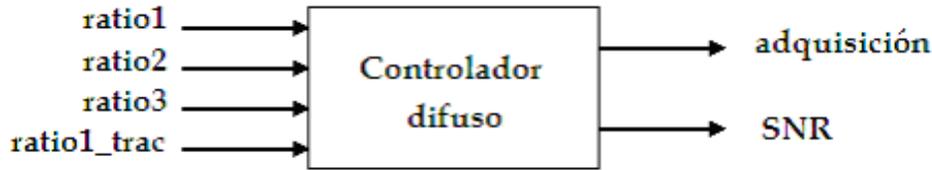


Fig. 14. Sistema de control difuso

Todas las reglas se definen de la siguiente manera, pondremos un ejemplo:

Si **Ratio1** toma el valor correspondiente a **No adquirido**

“y” / “o”

Si **Ratio2** toma el valor correspondiente a **Indeterminado**

“entonces”

el valor de la variable **Adquisición** será **No predecible**.

Para cada regla se han escogido las variables que mejor definen el sistema en aquella situación. Para estimar el nivel de adquisición del sistema (la variable de salida *Adquisición*), las mejores variables son *Ratio₁*, *Ratio₂* y *Ratio₃*, por su estabilidad, utilizando *Ratio_{1trac}* de soporte. Como ya se puede intuir, las zonas más críticas de modelar están en la zona de indeterminación. Esta zona se da en torno a los -15dB, ya que nos encontramos en un punto próximo a la pérdida de sincronía debido a la baja SNR. De todas maneras, no se puede considerar el sistema no adquirido por defecto, porque hay alguna probabilidad de que esté adquirido.

Por otra parte, para definir la variable de salida Estimación de SNR se han necesitado menos reglas difusas. A pesar de que la zona en torno a los -15dB vuelve a dar problemas y se necesitan más reglas para poder definir todos los casos.

En la figura 15 podemos ver de una manera más detallada cómo actúa el controlador dentro de la estructura multiresolutiva. Primero, la etapa de adquisición obtiene una posición aproximada de adquisición, gracias al banco de filtros adaptativos de la estructura, acto seguido esta posición (*Posición_temporal*) se pasa al filtro de *tracking*, que hará un ajuste más fino en torno a esta posición, obteniendo como resultado *Posición_real*. Este es el funcionamiento normal de la estructura. Ahora bien, mediante el sistema de control difuso, se hará una pequeña modificación. La posición calculada por los filtros de adquisición sólo se actualizará en la etapa de *tracking* si la variable de salida *Adquisición* da un valor que asegure la adquisición del sistema. Es decir, sólo se modificará la posición del filtro de *tracking* si el controlador difuso nos da garantías de que la etapa de adquisición puede estar sincronizada. El controlador difuso, mediante las variables de entrada ya comentadas, recogerá evidencias del estado del canal y será capaz de decidir si es posible encontrarnos adquiridos o no.

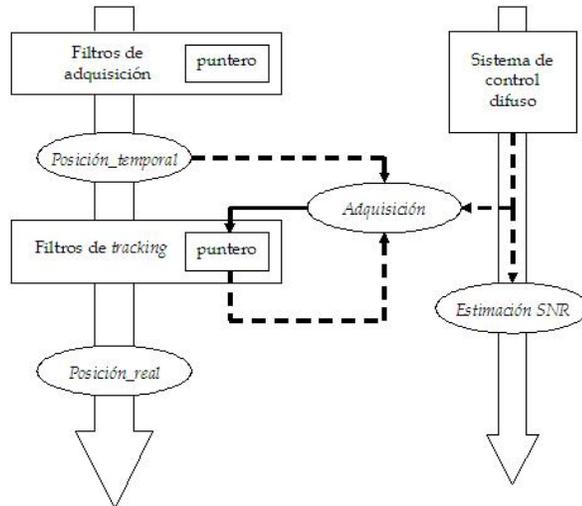


Fig. 15. Esquema detallado del controlador difuso.

3.5. Diseño del controlador basado en redes neuronales

En este caso, podemos considerar el estado de sincronización de un receptor como un problema de clasificación; así como lo puede ser la estimación de la SNR del canal. La idea se basa en poder mostrar a la red neuronal unas entradas que le permitan decidir en qué estado de salida se encuentra el receptor. Con respecto a la variable *Adquisición*, decidir si está adquirido o no; con respecto a la variable *Estimación de SNR*, discriminar el valor del ruido del canal. Ver figura 16.

El tipo de red neuronal que utilizaremos es un perceptrón multicapa. La primera capa consta de 15 neuronas y la segunda capa de 2 neuronas. Las funciones de activación que se han utilizado son la sigmoide para la primera capa y la lineal para la capa de salida. Una vez definida la red, el paso siguiente es entrenarla. El algoritmo de entrenamiento propuesto es el del *back-propagation* que intentará minimizar el error cuadrático medio entre la salida de la red y su objetivo.

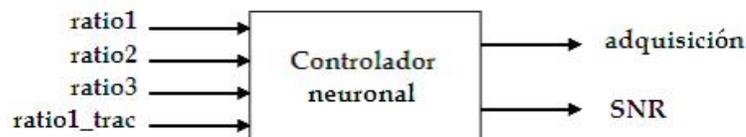


Fig. 16. Controlador neuronal

Con el fin de entrenar la red se han recogido datos procedentes de simulaciones realizadas al receptor en diferentes condiciones de simulación. De manera que se han tomado muestras de las 4 variables de entrada para diferentes SNR del canal, así como del estado del receptor (adquirido o no) para cada muestra de las variables de entrada. Es decir, por cada valor de las variables de entrada tendremos un valor de las variables *Adquisición* y *Estimación de SNR*, procedentes de simulaciones anteriores.

Se han presentado los datos a la red a fin de que ésta reajuste los pesos de las diferentes neuronas y así conseguir que la salida de la red se parezca el máximo posible a las muestras objetivo. Se han creado 10,000 *epochs*³ con los datos de entrada, para dar suficiente diversidad en el orden en que los datos se presentan a la red.

³ Mediante el entrenamiento de la red se pretende que esta aprenda la relación entre patrón y respuesta, más allá de la secuencialidad entre ejemplos, por eso, los patrones se presentan en diferentes órdenes. Cada conjunto de patrones presentado a la red con un orden concreto es llamado *epoch*.

En la figura 17 podemos observar el comportamiento de la red después del entrenamiento para la variable *Adquisición*. Con línea discontinua podemos ver la salida objetivo de la red y con línea normal, la salida que nos da la red neuronal. El eje horizontal se refiere a los símbolos de información o muestras de la salida esperada. Las primeras 100 muestras están tomadas del sistema trabajando en una SNR de 0dB, las 100 muestras siguientes del sistema a -5dB, y así sucesivamente. De manera que se puede observar que a medida que la SNR empeora, la estimación de la red neuronal es peor.

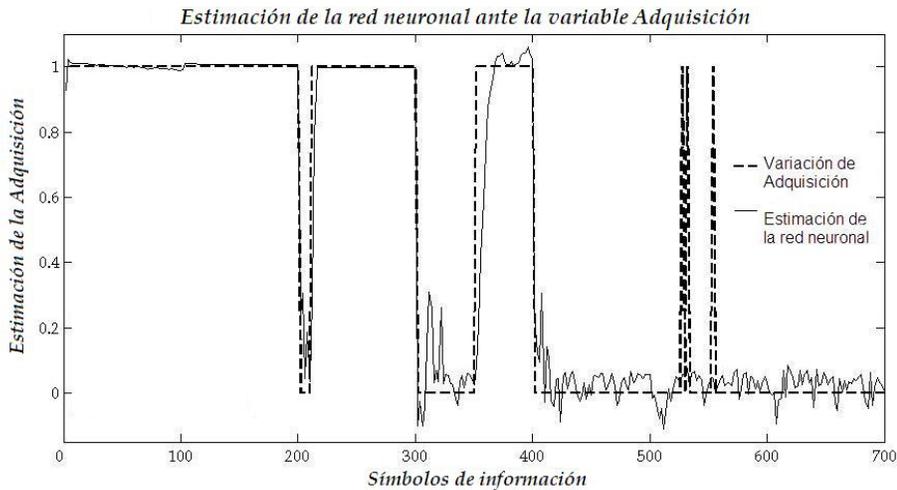


Fig. 17. Estimación de la red neuronal para la variable Adquisición.

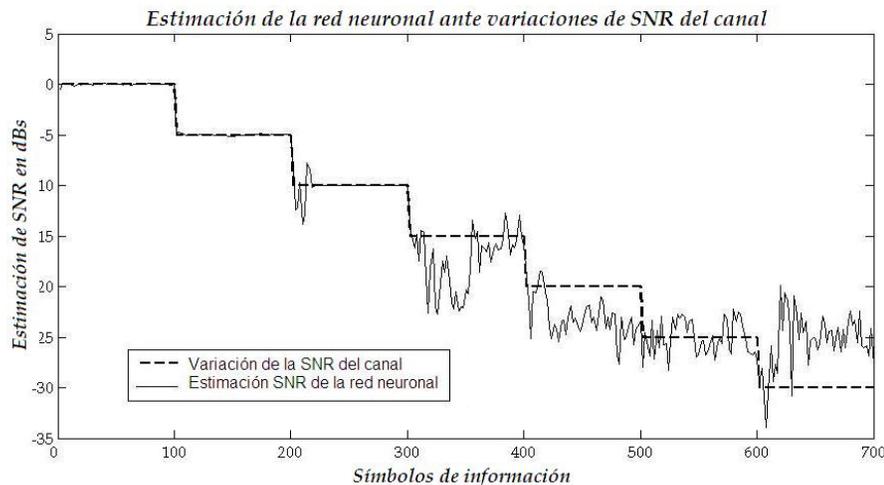


Fig. 18. Estimación de la red neuronal para la variable Estimación de SNR.

En la figura 18 podemos ver una gráfica similar a la anterior. Esta vez la variable de salida que vemos es la de *Estimación de SNR*, también después del entrenamiento de la red. Tal como hemos visto en el caso anterior, la estimación de la red empeora a medida que la SNR es más baja.

De la misma manera que con el controlador difuso, también se ha tenido en cuenta el diseño de una red neuronal para un entorno multiusuario. Como ya pudimos observar, los cuatro ratios utilizados como variables de entrada mantienen casi la misma forma y el mismo margen de valores para un entorno multiusuario que para un entorno ruidoso. Lo que se ha hecho en este caso es reentrenar la red diseñada para el caso del ruido del canal, con las variables de entrada y las variables objetivo del entorno multiusuario. De

esta manera hemos obtenido una nueva red diseñada para controlar el receptor cuando hay diversos usuarios simultáneos en el canal.

Una vez definidas las variables de entrada/salida y ver cuál es la red diseñada, debemos integrarla en el esquema del receptor multirresolutivo. El controlador neuronal variará la estructura multirresolutiva del mismo modo que el controlado difuso. Por lo que lo que se ha explicado para él sirve también en este caso.

5. Resultados

En este capítulo presentamos un resumen de los resultados que hemos obtenido a lo largo de la elaboración de este trabajo, contrastándolos con el controlador por estabilidad. Por lo que refiere al escenario simulado, nos encontramos con un sistema de comunicaciones totalmente digital y en la parte de *downlink*. Suponemos que antes de nuestros esquemas de simulación habría los bloques típicos de un receptor que nos adaptarían la señal a las condiciones de la prueba. Hemos fijado algunos parámetros de la simulación con el fin de no tener tantos grados de libertad posibles y acotar mejor los resultados obtenidos. Para tal efecto, hemos considerado que los usuarios están sincronizados y que su potencia en recepción es la misma. Las secuencias PN que hemos utilizado en las simulaciones son las MSQCC/CO [21] que minimizan la correlación cruzada entre secuencias, un parámetro que nos es muy útil en un entorno multiusuario. El receptor utilizado es el multirresolutivo. Todos los resultados que mostraremos a continuación están obtenidos de simulaciones realizadas sobre 20,000 datos enviados, de esta manera evitamos resultados erróneos debidos a transitorios y podemos medir de forma más precisa la estabilidad del receptor.

La figura 19 nos muestra la comparativa de los dos controladores diseñados y el controlador por estabilidad, en un entorno con variación de la SNR. Se ha realizado un barrido de SNR comprendidas de 0dB a -30dB en saltos de 0.5dB. El gráfico refleja el número de aciertos realizados por el controlador, es decir, contempla los casos en que su estimación es correcta, tanto si está adquirido como si no. Esto lo podemos calcular puesto que conocemos a priori la posición correcta de sincronización. Como podemos observar, ambos controladores mejoran notablemente el comportamiento del controlador por estabilidad, presentando valores de fiabilidad por encima del 90% para cualquier valor de SNR.

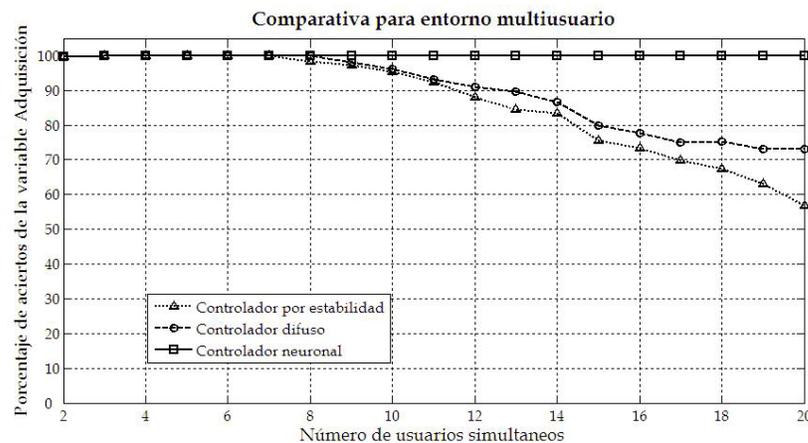


Fig. 19. Comparativa para un entorno de variación de SNR.

La figura 20 nos muestra la misma comparativa para un entorno multiusuario. En este entorno hemos estudiado el comportamiento de los controladores cuando se varía el número de usuarios simultáneos que acceden en el canal. Cada usuario que se

incorpora al canal añade ruido a la transmisión, de manera que el sistema de control verá cada nuevo usuario como una fuente de ruido más del canal, pero con algunas particularidades diferentes que el ruido aditivo blanco gaussiano, con el cual hemos realizado los estudios anteriores. Para el entorno de simulación se ha realizado un barrido de usuarios comprendido entre 2 y 20 usuarios simultáneos. La SNR se fija a 0dB durante toda la simulación. La gráfica refleja el número de aciertos realizados por el controlador. Como podemos observar, el controlador difuso mejora ligeramente el controlador por estabilidad, mientras que el controlador neuronal presenta unos resultados muy buenos, consiguiendo casi un 100% de fiabilidad.

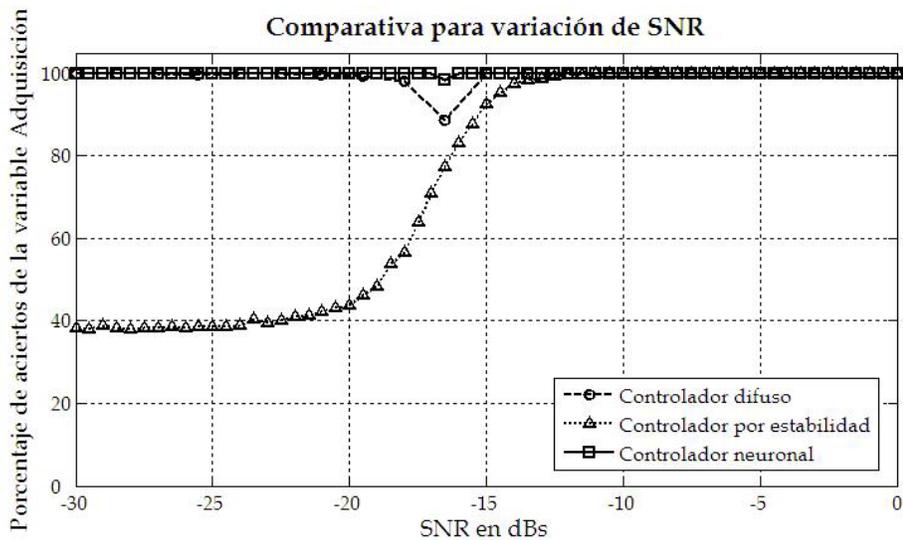


Fig. 20. Comparativa para un entorno de variación de número de usuarios simultáneos.

6. Conclusiones

En este trabajo se presenta la mejora de funcionamiento de un sistema de adquisición multirresolutivo de espectro ensanchado de secuencia directa usando controladores implementados con lógica difusa y con redes neuronales.

Se han implementado los sistemas de control con la herramienta de simulación *Matlab* para poder comparar su comportamiento y extraer conclusiones. Primero, se ha estudiado el sistema de control por estabilidad y lo hemos sometido a diferentes entornos de simulación (variación de SNR y multiusuario), de manera que ha servido como sistema de referencia para poder hacer comparaciones. Este sistema de control se comporta satisfactoriamente mientras la SNR no es demasiado baja, pero a partir de los -15dB no es demasiado fiable. De manera que las predicciones del sistema de control no nos aseguran si la información demodulada para el receptor se puede considerar correcta o no.

A continuación hemos planteado un sistema de control basado en lógica difusa. Este sistema se ha diseñado específicamente para el receptor multirresolutivo, haciendo estudios de diferentes parámetros de la estructura en diversos entornos y viendo cómo éstos afectan al comportamiento global del receptor. Los resultados que hemos obtenido para este controlador son muy positivos, ya que nos dan una mayor fiabilidad por lo que a la predicción del estado de adquisición del receptor se refiere. Nos podemos fiar un mínimo del 90% del tiempo de la variable de salida *Adquisición*, es decir, que la información remodulada podrá ser descartada o utilizada con una fiabilidad muy alta. Además, el sistema de control diseñado nos permite hacer una estimación de la SNR del

canal, este dato puede ser de mucha utilidad para otras etapas del receptor, como por ejemplo, el detector.

Por todo esto, las líneas de futuro que vemos en este campo pasan por la búsqueda de esquemas de control que nos den altos niveles de fiabilidad. Los sistemas de control implementados no tienen como objetivo principal mejorar la adquisición del sistema, sino ser capaces de dotar al receptor de la inteligencia suficiente para saber si puede fiarse de los datos demodulados o no. Por lo tanto, si el controlador es lo suficientemente autónomo podrá tomar decisiones como, por ejemplo, mantener la posición de sincronización sin usar las etapas de adquisición, si la SNR es buena y así bajar el coste computacional. La idea de fondo es globalizar la visión del receptor como un sistema con una única finalidad, por lo cual, todas las ayudas que se puedan suministrar desde cualquier nivel son totalmente válidas y útiles. Por eso, debe conseguirse diseñar controladores que den cierta autonomía, capacidad de reacción y decisión a los sistemas. Se pueden proponer otros sistemas de control inteligente, como los algoritmos genéticos, pero también trabajando en la dirección que se ha propuesto y buscando otros parámetros o técnicas que nos puedan aportar mejores resultados.

7. Referencias

- [1] Proakis, J. G. (1995). *Digital Communications*. Singapore: McGraw-Hill.
- [2] Sklar, B. (2001). *Digital Communications, Fundamentals and Applications*. New Jersey: Prentice Hall International.
- [3] Morán, J. A. *et al.* (2001). Multiresolution adaptive structure for acquisition in DS-SS digital receiver. *International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Proceedings, Utah, USA: IEEE, April.
- [4] Glisic, S. G. y Leppänen, P. A. (1999). *Code Division Multiple Access Communications*. Holanda: Kluwer Academic Publishers.
- [5] Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy Sets", *Information and control*, no. 8, pp. 338 - 353.
- [6] Paraskevopoulos, P. N. (1996). *Digital Control Systems*, Europe: Prentice Hall.
- [7] Alsina, R. M.; Morán, J. A. y Socoró, J. C. (2005): Sequential PN Acquisition Scheme Based on a Fuzzy Logic Controller, registros de la *8th International Work-Conference on Artificial Neural Networks (IWANN)*, *proceedings* en Lecture Notes in Computer Science (Springer-Verlag), Vilanova i la Geltrú, Barcelona, June 8-10, pp. 1238-1245. ISBN: 978-3-540-26208-4
- [8] Alsina, R. M.; Mateo, C. y Socoró, J. C. (2007). Multiresolutive Adaptive PN Acquisition Scheme with a Fuzzy Logic Estimator in Non Selective Fast SNR Variation Environments, *9th. International Work-Conference on Artificial Neural Networks (IWANN)*, *proceedings* en Lecture Notes in Computer Science (Springer-Verlag), San Sebastián, España: Springer, June 20-22, pp. 367-374. ISBN: 978-3-540-73006-4.
- [9] Alsina, R. M.; Mateo, C. y Socoró, J. C. (2008). *Fuzzy Logic Estimator for Variant SNR Environments*, artículo de la *Encyclopedia of Artificial Intelligence*. ISBN: 978-1-59904-849-9, IGI Global, (en publicación).
- [10] Mateo C. y Alsina, R. M. (2004). Diseño de un sistema de control adaptativo a las condiciones del canal para un sistema de adquisición de un receptor DS-SS, *XIX Congreso de la Unión Científica Nacional de Radio (URSI)*, Barcelona, España, 8-10 de septiembre.
- [11] Alsina, R. M. (2002). *Receptor intelligent d'un sistema de comunicacions DS-SS*. Proyecto Final de Carrera, Universitat Ramon Llull.

- [12] Meel, J. (1999). *Spread Spectrum. Introduction*. Hogeschool Voor Wetenschap & Kunst. De Nayer Institut. Belgium. Publicat a l'adreça d'Internet [19].
- [13] Viterbi, A. J. (1995). *CDMA. Principles of SS Communication*. Massachusetts, USA: Addison Wesley Publishing Company.
- [14] Cooper, G. R. y McGuillem, C. D. (1988). *Modern Communications and Spread Spectrum*. Singapore: McGraw-Hill International Editions.
- [15] Haykin, S. (1996). *Adaptive Filter Theory*. New Jersey: Prentice Hall International.
- [16] Morán, J. A. (2001). *Sistema rápido de adquisición para transmisión DS-SS sobre canal ionosférico*. Tesis doctoral, Universitat Ramon Llull.
- [17] Mateo, C. (2005). *Nuevas técnicas para la detección en un receptor superresolutivo de DS-SS/CDMA*. Trabajo final de carrera, Universitat Ramon Llull.
- [18] Sontag, E. D. (1998). *Mathematical Control Theory: Deterministic Finite Dimensional Systems*. New York: Springer.
- [19] Stubberud, A. J., Williams, I. J. y DiStefano, J. J. (1995). *Schaum's Outline of Feedback and Control Systems*. USA: McGraw-Hill Professional.
- [20] (2005). *Neural Networks Toolbox*, tutorials, documentació i demos del software *Matlab* de *The Mathworks*, versió 7.0.4.365.
- [21] Alsina, R. M.; Morán, J. A.; Socoró, J. C. y Sevillano, X. (2002). Diseño de un sistema de adquisición basado en lógica difusa para un sistema DS-SS sobre canal ionosférico. *XVII Simposium de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Alcalá de Henares, septiembre 11-13.

8. Bibliografía

- Alsina, R. M.; Morán, J. A. y Socoró, J. C. (2001). Diseño de un bloque de adquisición adaptativo para un sistema DS-SS sobre canal ionosférico, *XVI Simposium de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI)*, Villaviciosa de Odón, España, 19-21 de septiembre.
- Alsina, R. M.; Morán, J. A. y Socoró, J. C. (2003). Multiresolution Adaptive Structure for Acquisition and Detection in DS-SS Digital Receiver in a Multiuser Environment, *ISSPA: International Symposium on Signal Processing and its Applications*, Paris, Francia, July 1-4.
- Bonet Solà, D. (2004). *Implementació d'un receptor rake en un sistema DS-SS*. Trabajo final de carrera, Universitat Ramon Llull.
- Kärkkäinen, K. H. A. (1995). "Influence of Various PN Sequence Phase Optimization Criteria on the SNR Performance of an Asynchronous DS-SS System", *MILCOM IEEE*, pp. 641-646.
- Lluch García-Valdecasas, J. (2005). *Estudio de un sistema de adquisición y de detección de un receptor superresolutivo de DS-SS/CDMA en diferentes canales no estacionarios*. Trabajo final de carrera, Universitat Ramon Llull.
- Mamdani E. H. y Assilian, S. (1975). An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzylogic Controller, *International Journal of Man-Machine Studies* no. 7, pp. 1-13.
- Verdú, S. (1998). *Multiuser Detection*, USA: Cambridge University Press.
- Yager, R. R. y Filev, D. P. (1995). *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*, USA: Wiley-Interscience.
- (2005). *Fuzzy Logic Toolbox*, tutorials, documentació i demos del software *Matlab* de *The Mathworks*, versió 7.0.4.365.