



Diseño e Implementación de Algoritmos de Sincronismo para DTMB

Dariel Pereira Ruisánchez, Reinier Díaz Hernández, Ernesto Fontes Pupo

RESUMEN / ABSTRACT

En este trabajo, se proponen las implementaciones de dos modelos completos de sincronismo de trama y un esquema de sincronismo de frecuencia para TDS-OFDM, técnica que emplea la norma DTMB. El primero de los esquemas de sincronismo de trama se basa en la autocorrelación de la propia señal recibida, mientras que el segundo está basado en la correlación de esta señal con una PN generada localmente. De esta forma, se presentan dos soluciones diferentes al mismo problema, con respectivas singularidades en cuanto a métodos de implementación y características de desempeño. El método de sincronismo fino de frecuencia presentado, emplea el algoritmo de autocorrelación de PN alternantes, el cual aprovecha la característica de máxima similitud existente entre ellas. Las comprobaciones se realizan sobre diferentes modelos de canal con presencia de AWGN y atenuaciones por multitrayecto o Efecto Doppler, lo cual evidencia el carácter práctico de estas implementaciones. Se consigue la validación de los esquemas anteriores a través de los resultados obtenidos en simulaciones en la plataforma MatLab/ Simulink y su comparación con la literatura científica. Se realiza una breve presentación al estándar DTMB, prestando especial atención a las etapas de sincronismo, la estructura de su trama de señal y el empleo de las secuencias PN como cabeceras de trama.

Palabras claves: Sincronismo, DTMB, correlación, TDS-OFDM.

In this paper, two frame synchronization schemes and one frequency synchronization scheme are proposed for TDS-OFDM, technique that DTMB uses. The first frame synchronization model is based on the value of the autocorrelation of the received signal. The second uses the result of the correlation of this signal with locally generated PN. This way, two solutions for the same problem are presented, each one with its own singularities on implementation method and performance characteristics. The fine frequency synchronization model uses the alternating PN autocorrelation algorithm. It enjoys the maximum length of identical PN between non-consecutive guard intervals. The tests are realized over different channel models with AWGN and multi-path fadings or Doppler Effect fadings. The validation of the schemes is gotten through the simulation results in MatLab/Simulink models and its comparison with the scientific literature. A brief introduction to DTMB standard is realized and a special attention is given to synchronization stages, signal frames structure and the use of PN sequences as frame header.

Key words: Synchronization, DTMB, correlation, TDS-OFDM.

Design and Implementation of Synchronization Algorithms for DTMB.

1. –INTRODUCCIÓN.

DTMB (*Digital Television/Terrestrial Multimedia Broadcasting*) es la norma para TDT (*Terrestrial Digital Television*) que es implementada en Cuba. DTMB, según se define en [1], determina las bases de un transmisor por las cuales se rige el funcionamiento de un sistema Modulador-Demodulador propio de este estándar. El esquema de sincronismo es una etapa inicial en un sistema de demodulación. Esto quiere decir que, basado en su correcto funcionamiento, se desempeñan el resto de los bloques que componen al receptor. Por tanto, a efectos de representar una comunicación lo más cercana posible a

condiciones reales, es necesario disponer de un esquema de sincronismo que sea robusto antes los efectos del canal sobre la transmisión, y que sea capaz de entregar, en estas condiciones, una señal correctamente sincronizada.

Un sistema de sincronismo completo debe estimar y corregir tanto los corrimientos de frecuencia, como los corrimientos de tiempo de muestreo y los retardos de trama. Para ello debe contar con un bloque de sincronismo de frecuencia, un bloque de recuperación de temporización de símbolos y un bloque de sincronismo de trama, los cuales constituyen sus tres etapas fundamentales.

Como se aprecia en [2], la principal estrategia de DTMB para lograr del sincronismo en la etapa receptora empieza desde la transmisión, donde son insertadas como parte de la trama de señal secuencias PN (*Pseudo-random Noise*) que sirven como series de entrenamiento o información de señalización. Con esta técnica, los procesos anteriores pueden realizarse independientemente de la modulación empleada en la transmisión de datos (generalmente *Orthogonal Frequency Division Multiplex*), lo que favorece el carácter práctico del sistema y su modularidad. La información para el sincronismo y la estimación de canal, es transmitida en los intervalos de guarda separada de la carga útil. Según [3] y [4], TDS-OFDM (*Time Domain Synchronization-OFDM*) posee mejor desempeño en términos de rápida sincronización, precisión en la estimación del canal y eficiencia espectral, respecto a otras soluciones basadas en OFDM.

En [5] se propone un esquema de sincronismo bastante completo. El bloque de Sincronismo de Trama cuenta con un módulo de enganche en el tiempo que le permite ajustarse a los cambios constantes en los retardos. Para esta etapa se proponen dos métodos: uno basado en la autocorrelación, y otro, en la correlación diferencial cruzada entre la señal de entrada y una PN localmente generada. El primero resalta por la sencillez del hardware, mientras que el segundo es más robusto. Estos modelos, por ser previos a la etapa de Estimación de Canal, deben ser funcionales ante los efectos que provoca el medio de comunicación sobre la señal transmitida, como pueden ser atenuaciones por multitrayecto o Efecto Doppler. Además, tanto en [5] como en [6], se propone el desarrollo de un bloque de Determinación del Tipo de Cabecera como complemento previo al bloque de sincronismo. Este bloque permite un ajuste directo de los parámetros a cada uno de los tipos de cabecera que emplea DTMB y, por tanto, un mejor desempeño. Una parte importante de todos los esquemas, tanto de sincronismo de trama como de frecuencia o recuperación de temporización de símbolos, aprovechan las características especiales de las secuencias PN y su función de correlación. En otros casos menos comunes, como en [3] se proponen soluciones basadas en análisis en el dominio de la frecuencia. En [7] se presenta el algoritmo de Sincronismo de Frecuencias basado en la Autocorrelación de PN alternantes, que mejora el desempeño respecto al modelo basado en la autocorrelación de secuencias PN pertenecientes a tramas de señal consecutivas.

Los resultados investigativos que se proponen en este trabajo están orientados a las etapas de sincronismo de trama y sincronismo de frecuencia para un sistema de demodulación compatible con la norma DTMB. En este artículo se presentan el diseño y la implementación de un modelo de Sincronismo Grueso de Trama basado en la Autocorrelación de las PN y un modelo de Sincronismo Grueso de Trama basado en la Correlación con una PN local. Además, un modelo de Sincronismo Fino de Trama basado en la Correlación con una PN local y un modelo de Sincronismo Fino de Frecuencia basado en la Autocorrelación de PN alternantes. La funcionalidad de estos esquemas se evalúa en un grupo de modelos de canal que representan condiciones de comunicación real. Para la simulación de presencia de ruido blanco gaussiano, se emplea el bloque AWGN Channel. Además, se emplearon tres bloques de MatLab/Simulink del tipo Multipath Rayleigh Fading Channel para simular los modelos de canales multitrayectos estandarizados Brasil B, según está definido en [7], y TU6, según [5], y un bloque de trayecto único con presencia de Efecto Doppler.

En base a lo expuesto anteriormente, y buscando una aproximación gradual a las implementaciones y los resultados obtenidos con ellas, se divide el presente trabajo de la siguiente forma: en la sección 2 se presentan los problemas de sincronismo propios de los esquemas de comunicación y las posibilidades que ofrece TDS-OFDM para su solución. En la sección 3, se presentan los algoritmos empleados y las propuestas de esquemas de implementación. La sección 4 demuestra la validación de estos modelos a través de los resultados obtenidos mediante simulaciones en MatLab/Simulink. A modo de conclusión, se presenta la sección 5, donde se resume las principales contribuciones del artículo.

2.- SINCRONISMO EN TDS-OFDM Y FUNCIONES DE CORRELACIÓN.

Los problemas de sincronismo son comunes a todos los sistemas de comunicación. Estos se manifiestan fundamentalmente como corrimientos de frecuencia, corrimientos de tiempo de muestreo o retardos de tramas. Los corrimientos de frecuencia son resultado de las pequeñas diferencias existentes entre las señales de referencia del transmisor y el receptor. Esto introduce más efectos negativos en un sistema OFDM que en uno de portadora única, pues no solo atenúan la amplitud de la señal útil, sino que además causan ICI (*Inter-Carrier Interference*), la cual destruye la ortogonalidad de las subportadoras. Estos corrimientos de frecuencia representan desplazamientos acumulativos en las fases de las constelaciones de cada una de las tramas de señal, los cuales provocan errores en la identificación y demapeo de los símbolos [8].

Los corrimientos de tiempos de muestreo de los relojes y la entrada asincrónica de datos, pueden crear problemas en el funcionamiento o la fiabilidad de un sistema. Es fundamental conocer cuándo empieza y termina un símbolo para identificar el adecuado intervalo de integración, es decir, el intervalo sobre el cual la energía es integrada antes de definir el valor de un símbolo. Si se integra sobre un intervalo de inadecuada longitud, o uno que incluye dos símbolos, la habilidad para identificar los valores correctamente se ve notablemente degradada. Estos errores pueden manifestarse de tres formas fundamentales: a-) detección errónea de bit, confundir un '0' con un '1' (error de sustitución); b-) muestreo lento, un bit es dejado de muestrear y por tanto la información que contiene se pierde (error de borrado); y c-) sobremuestreo, un bit es muestreado más de una vez agregando falsa información a la trama (error de inserción) [8].

En los sistemas de radiodifusión inalámbrica, el transmisor se encuentra idealmente enviando datos de forma continua, pero el receptor debe ser capaz de sincronizarse y procesar la señal a partir de cualquier instante. En DTMB, las tramas tienen una estructura predefinida (cabecera de trama + cuerpo de trama) y un grupo de bits que ocupan una posición específica. Por esto, es imprescindible para la correcta demodulación, identificar el inicio y el fin de las tramas de señal. Esto es la capacidad de estimar el retardo de trama.

La técnica TDS-OFDM, empleada en DTMB, propone la inserción de tres formatos diferentes de intervalos de guarda en cada una de las tramas de señal, cuyas propiedades conocidas permiten conseguir la sincronización a partir de su procesamiento. Los tres formatos de cabecera según [1] son: PN(420), PN(595) y PN(945). Estas son m -secuencias de extensión cíclica implementadas por un LFSR (*Linear Feedback Shift Register*). La PN(420) y la PN(945) tienen la característica común de que están estructuradas como "prefijo+secuencia cíclica+sufijo", donde el primer grupo de bits de la secuencia es idéntico al último. Por otra parte, la PN(595) es solo un segmento de la secuencia de máxima longitud, por tanto, no cuenta ni con prefijo ni con sufijo.

Las PN son ampliamente usadas en comunicaciones digitales. En una secuencia realmente aleatoria el patrón de bits nunca se repite. Las secuencias pseudo-aleatorias son semialeatorias, en el sentido de que parecen cumplir con ello durante su longitud fundamental, pero este período principal se repite infinitamente. Las secuencias PN tienen numerosas propiedades interesantes, algunas de las cuales aparecen en [9], y son explotadas en variedad de aplicaciones. Debido al alto grado de autocorrelación de dos PN similares, estas pueden ser fácilmente sincronizadas en fase, favoreciendo su empleo en esquemas con este propósito. Una secuencia PN es una señal de prueba ideal, ya que simula las características aleatorias de las señales digitales y es de fácil generación. La propiedad de las secuencias PN, sobre la cual se basan los algoritmos propuestos en este artículo, se conoce como propiedad de la correlación. La función de correlación permite determinar cómo cambia una señal en el tiempo, teniendo en cuenta las similitudes para diferentes intervalos temporales. Esta información es muy útil cuando se modelan sistemas y existen periodicidades en las señales. Se distinguen entonces dos operaciones: la autocorrelación, cuando se analiza una sola señal, y la correlación cruzada, cuando se analizan dos secuencias diferentes.

Para una señal discreta $x[n]$, en [10] se define como su autocorrelación, la secuencia obtenida de la siguiente expresión:

$$R_x[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]x[n-l] = R_x[-l] \quad (1)$$

La función de autocorrelación tiene aplicaciones en modelos de sincronismo no coherente, pues aprovecha las características periódicas de la propia señal recibida. Permite diseñar esquemas más simples, donde se ahorra en hardware y en demoras de procesamiento relativos a la generación de una señal de referencia local.

La correlación cruzada para dos señales $x[n]$ y $y[n]$, en [10] se define como:

$$R_{xy}[l] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n+l]y[n] \quad (2)$$

La correlación cruzada es la base de los modelos coherentes. Estos son más robustos, pues la señal generada localmente no sufre las afectaciones que provoca el medio de comunicación sobre la señal recibida.

3.- ALGORITMOS E IMPLEMENTACIONES PROPUESTOS.

Con base en las propiedades de las secuencias PN insertadas como intervalos de guarda en la transmisión de DTMB y las características de sus funciones de correlación, se desarrollan los módulos presentados en este trabajo. Los esquemas de sincronismo de trama que se proponen se separan en dos grupos: esquemas de sincronismo grueso y esquema de sincronismo fino. Los esquemas de sincronismo grueso se clasifican de este modo, pues con ellos se consigue una primera

aproximación al sincronismo. El esquema de sincronismo fino de trama se basa en esta primera aproximación para alcanzar el sincronismo completo, que solo se consigue cuando el retardo en símbolos es de valor 0. De manera similar, el esquema de sincronismo fino de frecuencia se clasifica de este modo ya que la exactitud de las estimaciones que consigue es elevada, aunque esto represente un sacrificio en cuanto al rango de trabajo. Es necesario definir que, tanto las propuestas de algoritmos como sus implementaciones, están orientados al trabajo con PN(420). La PN(420) consiste en un prefijo de 82 símbolos, una secuencia PN de 255 y un sufijo de 83, donde el prefijo y el sufijo son extensiones cíclicas de la PN255. Esta característica cíclica es aprovechada por los algoritmos de sincronismo propuestos.

Por consideraciones prácticas las simulaciones fueron realizadas para tramas de señal con cabecera PN 420. Para PN 945 los algoritmos a emplear son similares, siendo los cambios mayores en cuanto a los parámetros numéricos que se emplean: tamaños de ventanas de correlación (L), retardos (D), umbrales (U).

3.1- SINCRONISMO GRUESO DE TRAMA POR AUTOCORRELACIÓN.

Esta primera propuesta para un modelo de sincronismo de trama, presentada en la Figura 1, se basa en el algoritmo de autocorrelación de la señal recibida con una copia retardada de ella misma. (A partir de aquí, en azul oscuro los subsistemas implementados, y en azul claro, los bloques propios de MatLab/Simulink). El diseño contiene dos bloques fundamentales, que son el subsistema de DETECCIÓN y el subsistema de CAPTURA, donde el primero es la activación del segundo. Además, contiene un grupo de bloques auxiliares para el tratamiento y adaptación de la señal recibida.

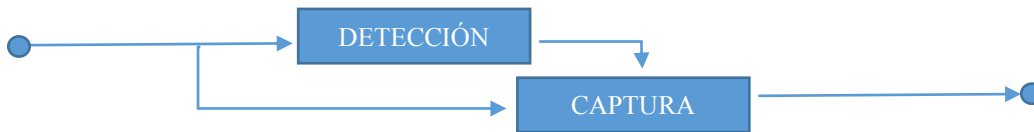


Figura 1

Sincronismo Grueso de Trama por Autocorrelación.

El bloque de DETECCIÓN (Figura 2) es el subsistema fundamental de este modelo, pues en este se lleva a cabo el procesamiento de la señal y se consigue una primera aproximación gruesa al inicio de la trama de señal. Las tramas a la entrada de este bloque son autocorrelacionadas con versiones retardadas de ellas mismas. Para ello, la señal es separada en dos caminos, siendo uno de ellos retardado $D = 255$ símbolos. Ambas señales pasan por respectivos búferes con tamaño de salida definido de $L = 82$ símbolos, determinándose el tamaño de la ventana de la autocorrelación.

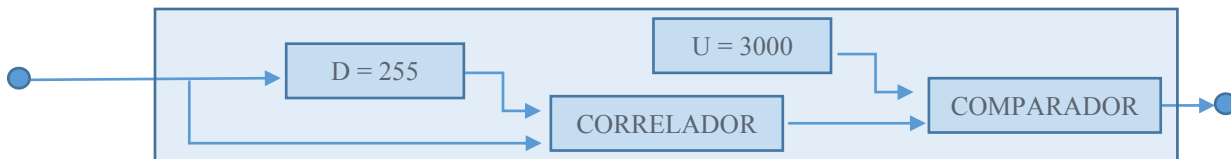


Figura 2

Bloque de DETECCIÓN - Sincronismo Grueso de Trama por Autocorrelación.

El valor $D = 255$ símbolos es escogido con el fin de aprovechar las características cíclicas de las cabeceras de trama (PN(420)), pues en cualquier cabecera de este tipo el símbolo i y el símbolo $i + 255$ son iguales, siempre y cuando ambos pertenezcan a la misma PN. Esta propiedad numérica posibilita obtener valores máximos de autocorrelación en el instante de procesamiento de esta parte de la señal, que además constituye su inicio.

El valor de $L = 82$ símbolos, definido como el tamaño de la ventana de autocorrelación, es seleccionado también basado en otra interpretación de la característica cíclica de las secuencias PN(420). Debido a que este tipo de secuencias son originadas por un polinomio generador de orden 8, su longitud máxima es 255, y luego de esto se repiten de forma cíclica. Por esto, en una PN(420), los primeros 165 símbolos constituyen un fragmento idéntico a los últimos 165 símbolos. Por esto, tomando ventanas de 82 símbolos, en secuencias iguales retardada 255 símbolos una respecto a otra, se puede asegurar de que al menos una vez por trama, la ventana estará totalmente incluida en estos intervalos de 165, obteniéndose un máximo de autocorrelación.

El cálculo de la autocorrelación se realiza a través del bloque de MatLab/Simulink *Correlation*. A efectos del algoritmo empleado, solo es de interés el momento en que el módulo de la función de autocorrelación alcanza un valor máximo. Para ello, se compara en cada iteración con un umbral, al cual se le asignó un valor de $U = 3000$, que se propone como un valor recomendable después de numerosas comprobaciones. Este se corresponde con las características de la señal y con el tamaño de la ventana de autocorrelación que ha sido definido. Además, debe ser un valor fácilmente diferenciable del resto de los obtenidos en las autocorrelaciones que se realizan en los diferentes puntos de la señal y que permita identificar correctamente la presencia de las cabeceras de trama. El umbral debe tener un margen de diferencia respecto al valor ideal máximo de la autocorrelación, posibilitando que el modelo funcione aun cuando las condiciones de ruido o atenuación no sean las óptimas.

La Figura 3 muestra los valores a la salida de la función de autocorrelación comparados contra el umbral U . Esta figura permite apreciar cómo, al menos una vez en cada trama, este umbral es superado al realizarse la autocorrelación de dos segmentos idénticos dentro de las cabeceras de trama.

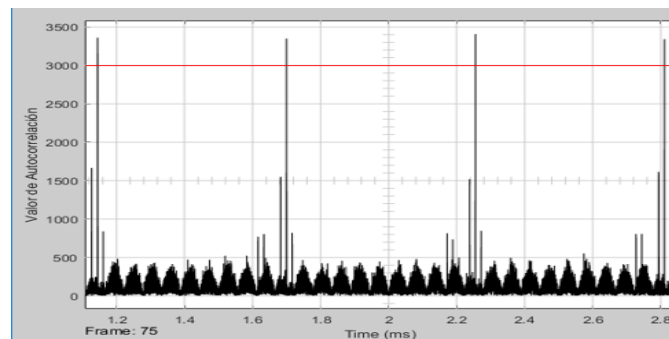


Figura 3

Función de Autocorrelación y Umbral de Detección.

El subsistema de CAPTURA es un subsistema con activación, es decir, posee una entrada auxiliar que determina cuándo comienza el procesamiento de los bloques dentro de él. Esta entrada de activación es la salida del bloque de DETECCIÓN. Una vez se detecta un máximo modular en la función de autocorrelación, mayor que el valor de umbral definido, esta señal pasa de *False* a *True* (de '0' a '1'), lo que activa el bloque *Trigger Port* que induce el funcionamiento de este subsistema.

Este subsistema internamente solo contiene un búfer, cuyo tamaño de salida es definido en 4200 símbolos. Su función es, cuando lo indique el *Trigger Port*, conformar una nueva trama de señal sincronizada, al menos aproximadamente. A la salida de este bloque se consigue una trama que contiene en sus primeros 420 símbolos una porción significativa de la cabecera de trama (sincronismo grueso). Esto permite que, al ser procesada por un bloque de sincronismo fino de trama, se logre un sincronismo completo de trama.

3.2- SINCRONISMO GRUESO DE TRAMA POR CORRELACIÓN CON PN GENERADA LOCALMENTE.

La segunda propuesta para un esquema de sincronismo grueso se basa en un esquema convencional, que es la correlación cruzada de la señal recibida con una secuencia PN generada localmente. Este modelo aprovecha en mayor medida las propiedades de la función de correlación de secuencias pseudoaleatorias, pues la ventana de cálculo se extiende a toda la longitud de la cabecera de trama ($L = 420$). De igual modo, el empleo de una serie local que no ha sido afectada por los errores e interferencias del canal, permite desarrollar un mecanismo más robusto ante efectos como el Doppler.

El diseño propuesto para este modelo es de manera general similar al propuesto anteriormente. Al igual que el esquema presentado para el sincronismo grueso basado en la autocorrelación, este contiene dos subsistemas fundamentales: el subsistema de DETECCIÓN (Figura 4) y el subsistema de CAPTURA. Si bien, ambos diseños coinciden en muchos elementos, los principios sobre los cuales se basan sus funcionamientos son diferentes. Así mismo, las condiciones de trabajo óptimas no son las mismas. Mientras que con ambos se pretende conseguir cierta robustez en presencia de CFO (*Carrier Frequency Offset*), el primero propone enorme confiabilidad en canales con AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) y el segundo en esquemas móviles, donde, además hay presencia de Efecto Doppler.

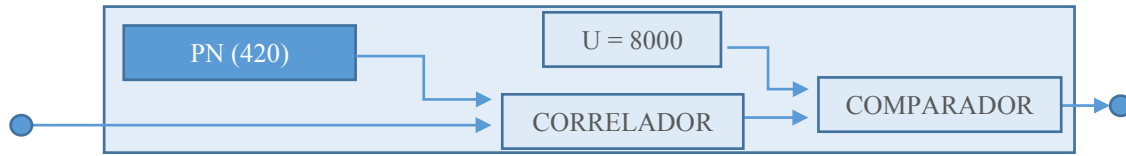


Figura 4

Bloque de DETECCIÓN - Sincronismo Grueso de Trama por Correlación con PN local.

El bloque de DETECCIÓN es la base de todo el esquema de sincronismo grueso, y a su vez, en este radican las principales diferencias entre los modelos propuestos. Este nuevo esquema propone el cálculo de la correlación cruzada entre segmentos de 420 símbolos de la señal recibida y cabeceras de trama que son generadas localmente a través del bloque propio de MatLab/Simulink *PN Sequence Generator*. De este modo se aumentó la ventana de correlación de $L = 82$ símbolos a $L = 420$ símbolos respecto al otro método propuesto, sacando mayor ventaja de la condición de máxima similitud. Un máximo de esta función determina un posible inicio de trama de señal. Estos valores en cada iteración son comparados con un umbral. El umbral en este modelo fue definido $U = 8000$, mayor que el escogido en el método propuesto anteriormente a causa del aumento en el tamaño de la ventana de correlación. Sin embargo, este valor sigue siendo pequeño comparado con los máximos absolutos que se consiguen con la función de correlación, pues la atenuación producida por Efecto Doppler causa enormes variaciones en ellos. Como muestra la Figura 5, este valor de umbral constituye una opción recomendable entre la posibilidad de una falsa detección y una pérdida de detección a causa del Doppler.

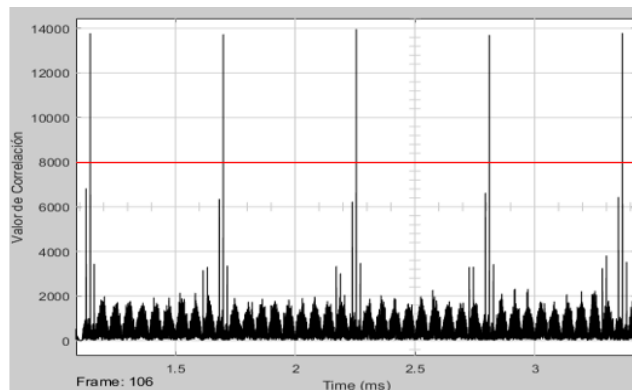


Figura 5

Función de Correlación y Umbral de Detección.

La salida de este subsistema de DETECCIÓN coincide con la salida del bloque comparador. Cada vez que un valor máximo de correlación sobrepasa el umbral definido, esta salida pasa de '0' a '1', indicando que se ha detectado un posible inicio de trama y activando el procesamiento en el bloque de CAPTURA.

El subsistema de CAPTURA, al igual que en el esquema propuesto anteriormente, es un subsistema de activación. De igual modo, este subsistema solo contiene un Buffer de 4200 símbolos que comienza a capturar cuando se le indica. Se consigue una trama de señal a la salida que está, al menos gruesamente, sincronizada.

3.3- SINCRONISMO FINO DE TRAMA POR CORRELACIÓN CON PN LOCAL.

Como complemento a los esquemas de sincronismo grueso de trama que se han presentado, se propone el siguiente diseño para un modelo de sincronismo fino de trama. Una vez conseguida una primera aproximación al punto de inicio de la trama, con este subsistema se determina el momento exacto en que se inicia la cabecera. La trama de señal después de superar esta etapa de procesamiento se encuentra totalmente sincronizada en este aspecto: cabecera de trama + cuerpo de trama. Este modelo se considera de especial importancia para el esquema general de un demodulador, pues muchas etapas posteriores, como el sincronismo de frecuencia o la estimación de canal, dependen de la capacidad de poder identificar la cabecera de trama para su correcto funcionamiento. Además, permite separar la carga útil, de la información que solo es relevante para la demodulación. La Figura 6 muestra la propuesta de diseño para este esquema.



Figura 6

Bloque de Sincronismo Fino de Trama.

El bloque de ESTIMACIÓN es la etapa inicial y fundamental de este modelo. Los primeros 420 símbolos, si el esquema de sincronismo grueso funciona correctamente, contienen una parte significativa de la cabecera de trama. Este vector es correlacionado, mediante el bloque de MatLab/Simulink *Correlation*, con una secuencia PN(420) generada localmente de la misma forma en que se definió antes. A diferencia de los casos anteriores, el elemento importante para este método no es el valor máximo de la correlación sino su posición en el vector resultante. Al correlacionar estos vectores se consigue un máximo en el punto de mayor coincidencia. Es decir, el índice de este valor indica el desplazamiento existente entre ambas secuencias, por lo que trabajando con él se puede compensar y lograr el sincronismo de la trama de señal a través del subsistema de COMPENSACIÓN.

Con el valor del índice se calcula el retardo necesario para compensar el corrimiento. De acuerdo al nivel de sincronismo alcanzado en los esquemas anteriores, este valor varía haciendo que cambie el esquema de corrección (Figura 7). La posibilidad de escoger entre dos trayectos para el procesamiento de la señal es dada por el empleo del bloque de MatLab/Simulink *Switch*, donde se definen como entrada las dos posibles opciones y una tercera entrada de selección cuyo valor determina el trayecto de la señal. Es necesario tener en cuenta que el valor medio para el índice es 420, es decir, para valores menores que 420 la señal está adelantada respecto a la PN(420) local y para valores mayores que 420 la señal está retardada.

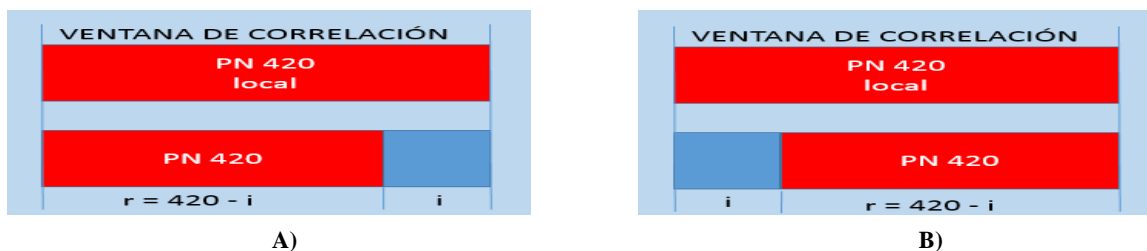


Figura 7

Opciones de corrección.

En la figura 6-A) la señal está adelantada respecto a la PN420 generada localmente. Por tanto, la resta $r = 420 - i$ (donde i es el valor del índice) da valores positivos, lo que habilita la primera opción del *Switch*. En este caso la señal solo es retardada r muestras, quedando sincronizada en trama.

En la figura 6-B) la señal está retardada respecto a la PN420 generada localmente. Por tanto, la resta $r = 420 - i$ da valores negativos, habilitando la opción 2 del *Switch*. En este caso la señal no puede ser retardada solo r muestras, pues no existen los retardos negativos. Por ello el retardo es de $4200 + r$ muestras, lo que crea un retardo de una trama en el procesamiento, pero no afecta en ningún modo a la señal recibida.

A la salida de este subsistema de ajuste fino, que coincide con la del modelo de COMPENSACIÓN, se obtiene una señal de iguales características temporales a la transmitida, es decir, totalmente sincronizada en trama.

3.4- SINCRONISMO FINO DE FRECUENCIA BASADO EN LA AUTOCORRELACIÓN DE SECUENCIAS PN ALTERNANTES.

El esquema presentado en la Figura 8 es la propuesta de diseño para un esquema de sincronismo de frecuencia. Esta implementación está basada en el algoritmo de correlación de secuencias PN alternantes presentado en [7]. Se emplea un modelo de lazo cerrado, donde el valor de CFO es estimado en cada trama y este propone un valor para su compensación. Este esquema de lazo mantiene un valor de estimación estable incluso cuando se pierde el sincronismo de trama momentáneamente.

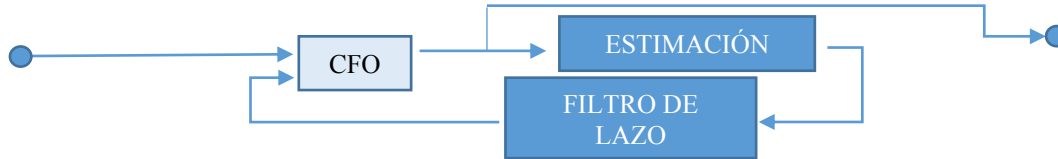


Figura 8

Bloque de Sincronismo Fino de Frecuencia

El elemento fundamental de este modelo es el subsistema de ESTIMACIÓN. Este basa su funcionamiento en una característica de las secuencias PN presentes en cabeceras de trama alternantes (En la Figura 9, PN1 y PN3 son secuencias alternantes). Debido a la forma en que se escogen las condiciones iniciales, según se define en [1], cuando se generan las secuencias PN420 que conforman las cabeceras de trama, se obtiene la máxima ventana de coincidencia si se correlacionan dos secuencias alternas, en lugar de dos consecutivas [7].



Figura 9

Secuencias PN alternantes

La señal de entrada es autocorrelacionada con una copia de ella misma retardada. El valor del retardo es $D = 8400$ símbolos (dos tramas de señal completas) para conseguir la correlación de cabeceras de tramas alternantes. Es indispensable que las señales estén correctamente sincronizadas en trama, pues solo de este modo se obtienen a la salida de los bloques demultiplexores, dos vectores coincidentes con las cabeceras de trama. La fase del resultado de la función de autocorrelación dividida entre 8400 es el valor de estimación normalizado del CFO presente en la señal. Despejando la ecuación $\Omega = 2\pi\Delta f T$ (donde Ω es estimación normalizada del CFO, Δf es CFO, T tiempo de símbolo), se obtiene que el valor de corrimiento de frecuencia que se necesita compensar es $\Delta f = \Omega / 2\pi T$. Este valor es la salida del subsistema de ESTIMACIÓN.

Con este esquema se consiguen valores de varianza en el cálculo realmente bajos, con los cuales no es necesario la implementación de un filtro de lazo. Estimando en cada trama y corrigiendo sobre ella misma, se logran valores de exactitud similar a los modelos convencionales. Sin embargo, se propone el empleo de este filtro acumulativo pues, aunque demora algo en conseguir el sincronismo de frecuencia, este se mantiene aun cuando se haya perdido momentáneamente el sincronismo de trama. Además, el tiempo que demora en conseguir el sincronismo inicialmente es de solo aproximadamente 10 tramas, que continúa siendo un valor bajo comparado con los modelos más frecuentemente empleados.

4.- VALIDACIÓN DE LOS DISEÑOS PROPUESTOS. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Para validar la funcionalidad de los diseños se propone un número de pruebas, cuyos resultados permiten comparar estos modelos con los valores presentados en la bibliografía científica en temas de sincronismo. Se proponen diferentes escenarios de comprobación, donde varían parámetros como la SNR (*Signal to Noise Ratio*) y los errores propios del sincronismo, como son el CFO y el retardo de trama. Además, se simulan varios canales con multitrayecto y presencia de Efecto Doppler. Este grupo de evaluaciones ayuda a definir en qué medida fueron conseguidos los objetivos propuestos para este trabajo, y a su vez, comprender en qué aspectos se debe continuar trabajando para su perfeccionamiento.

Debido a que se han desarrollado dos modelos de sincronismo grueso de trama y solo uno de sincronismo fino de trama, las pruebas son realizadas a cada uno de los posibles pares de sincronismo completo de trama, llamándolos por el nombre del esquema de sincronismo grueso. El esquema de la Figura 10 representa el modelo sobre el cuál se realizan las validaciones.

EL bloque MODULADOR simula la transmisión de una trama de señal. Presenta un bloque PN420, cuya salida es esta opción para cabecera de trama, y un bloque OFDM, que simula los 3780 símbolos que componen el cuerpo de trama. Ambos vectores de salida son concatenados para obtener una trama de señal de 740.8 us y 4200 símbolos como está definida en el estándar. El bloque DEMODULADOR presenta solo los elementos esenciales para la comprobación de la integridad de la señal transmitida después de su paso a través del canal y de ser procesada por las etapas de sincronismo. El subsistema ERRORES DE SINCRONISMO es la etapa inicial del diseño propuesto, pues en este se insertan los posibles errores de sincronismo propios de las imperfecciones de los elementos de un receptor, y que deben ser corregidos.

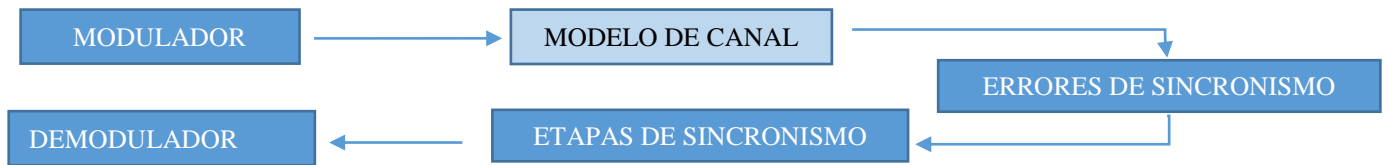


Figura 10
Modelo de validación

4.1.- SINCRONISMO DE TRAMA POR AUTOCORRELACIÓN

La característica fundamental de este modelo es su alta fiabilidad y rápida sincronización en canales con presencia de elevados valores de AWGN. Este modelo logra, con solo una trama, una completa sincronización, lo que lo diferencia de esquemas convencionales de sincronismo por etapas.

Para validar el funcionamiento de este modelo se propone una prueba en la que es variado escalonadamente el valor de retardo de trama introducido a la señal y se comprueba la capacidad del diseño para detectar el valor y corregirlo.

El escenario en que se efectúa esta comprobación, es el definido por los parámetros que se exponen en la Tabla 1.

Tabla 1
Parámetros de la Simulación 1

Parámetro	Valor
Modelo de Canal	AWGN
SNR	5 dB
CFO	400 Hz
Retardo de Trama	0:210:4200

Las simulaciones son realizadas para un canal con solo presencia de AWGN, pues en este se consiguen las mejores prestaciones para este modelo de sincronismo. Se emplean 5 dB como valor de SNR para simular las condiciones de un medio de comunicación desfavorable (altos valores de ruido). Los esquemas de sincronismo de trama, al ser previos al sincronismo de frecuencia, deben ser capaces de funcionar en presencia de determinados valores de CFO. Para validar esta condición la señal es afectada con un CFO de 400 Hz. Este no es un valor grande, pero es suficiente para comprobar el funcionamiento de este esquema previo a una etapa de sincronismo fino de frecuencia.

La Figura 11 muestra los resultados obtenidos mediante simulación bajo las condiciones expuestas anteriormente. Este es un gráfico de valor estimado (EST) en función del retardo (DELAY). El valor estimado es el resultado de calcular la diferencia entre la señal retardada y la señal sincronizada a la salida del bloque de sincronismo fino de trama. Para ello se usa el bloque de MatLab/Simulink *Align Signals*, cuya salida *Delay* muestra los corrimientos de símbolos entre dos señales. Son evaluadas 100 tramas en cada uno de los posibles valores de retardo, es decir 2100 tramas. Este gráfico comprueba la capacidad del modelo para seguir los valores de retardo de trama introducidos. Se consigue una correspondencia lineal entre el error y la estimación, lo que valida la funcionalidad del modelo propuesto en ambientes de AWGN para todo el rango de posibles valores de retardo.

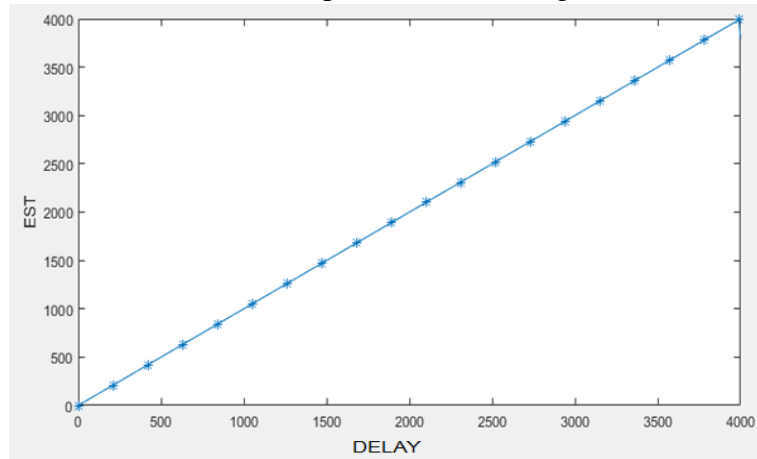


Figura 11

Retardo contra valor Estimado.

Este esquema no solo tiene la capacidad de detectar cualquier corrimiento de trama en modelos de canal con AWGN, sino que, para la totalidad de las simulaciones realizadas, ha sido capaz de corregirlo. Para validar esto se propone la siguiente comprobación de su capacidad de CDR (*Correct Detection Rate*) ante diferentes valores de SNR. CDR es una medida de la probabilidad que tiene un modelo de sincronismo de trama de estimar y compensar los corrimientos en símbolos enteros de una señal. CDR se da en valores de 0 a 1, y se calcula como la cantidad de tramas correctamente sincronizadas sobre la cantidad de tramas procesadas. El escenario propuesto es el definido en la Tabla 2.

Tabla 2
Parámetros de la Simulación 2

Parámetro	Valor	
Modelo de Canal	AWGN	AWGN Doppler (150 Hz)
SNR	5:5:40 dB	
CFO	200 Hz	
Retardo de Trama	2349 símbolos	
Umbral de Detección	3000	

Se escogen dos modelos de canal diferentes: un canal con solo AWGN y un canal con atenuaciones por presencia de Efecto Doppler además de AWGN. Se evalúan valores de SNR desde 5 dB hasta 40 dB, lo que permite comprobar la validez del esquema en un amplio rango de condiciones de ruido y su comparación con otras bibliografías como [5].

La Figura 12 muestra los resultados de la simulación bajo las condiciones previamente definidas. Este es un gráfico de SNR contra CDR. Se consigue, para el canal con solo AWGN, un CDR de valor unitario, por lo que la totalidad de las tramas de señal procesadas fueron sincronizadas. Esto quiere decir que los errores introducidos son correctamente estimados y compensados, y las señales de salida tienen la estructura deseada: Cabecera de Trama + Cuerpo de Trama. Para el canal con Efecto Doppler, los valores de CDR disminuyen, lo que demuestra la sensibilidad del esquema propuesto ante este efecto del medio de comunicación.

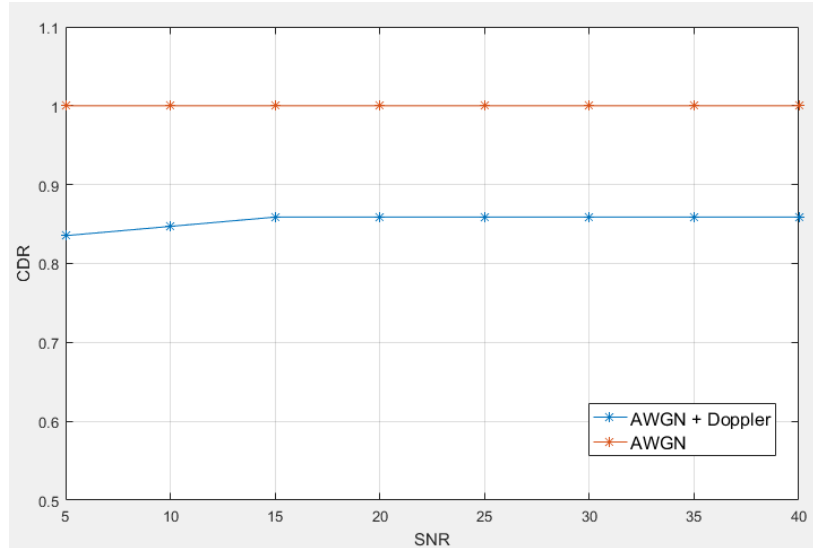


Figura 12
SNR contra CDR.

4.2.- SINCRONISMO DE TRAMA POR CORRELACIÓN CON PN GENERADA LOCALMENTE.

Este modelo de sincronismo de trama representa un esquema más completo que el expuesto anteriormente, pues además de presentar buenas prestaciones en ambientes de elevado AWGN también tiene alta funcionalidad en presencia de Efecto Doppler. Esta capacidad lo convierte en un modelo más práctico y con la posibilidad de adaptarse a sistemas de recepción móvil. Se basa en el algoritmo de correlación con una PN generada localmente, el cual es bastante común en las bibliografías, las cuales se refieren a este como algoritmo convencional [5]. Esto ofrece un marco de referencia para evaluar la implementación propuesta.

El escenario es el definido por los parámetros que se exponen en la Tabla 3.

Tabla 3
Parámetros de Simulación 3

Parámetro	Valor
Modelo de Canal	AWGN Doppler
Doppler	25:25:250 Hz
SNR	5 dB
CFO	200 Hz
Retardo de Trama	200

Las simulaciones se realizan para un canal con presencia de AWGN y atenuaciones por Efecto Doppler. Se define un valor de SNR de 5 dB para emular condiciones de elevado nivel de ruido. Se define un CFO de 5000 Hz, para probar la capacidad de trabajar aún en altos valores de corrimiento de frecuencia.

La Figura 13 muestra los resultados obtenidos en las simulaciones. Este es un gráfico de CDR en función de los valores de Efecto Doppler (Hz). Fueron procesadas 100 tramas en cada uno de los posibles valores de Doppler, por lo que fueron tenidas en cuenta 1000 tramas en esta simulación. Los datos que describen el comportamiento de la implementación convencional de este algoritmo son tomados de [5]. La comparación con los resultados presentados en ese artículo permite reconocer a esta como una implementación válida para un esquema de sincronismo de trama. Se consiguen valores de CDR iguales o cercanos a 1 para un amplio rango de valores. Se evidencia la capacidad de este diseño de detectar y corregir los

corrimientos de trama con eficacia, pues incluso para elevado Efecto Doppler, donde la probabilidad de detección errónea aumenta, los resultados obtenidos son superiores en algunas décimas a los presentados como convencionales.

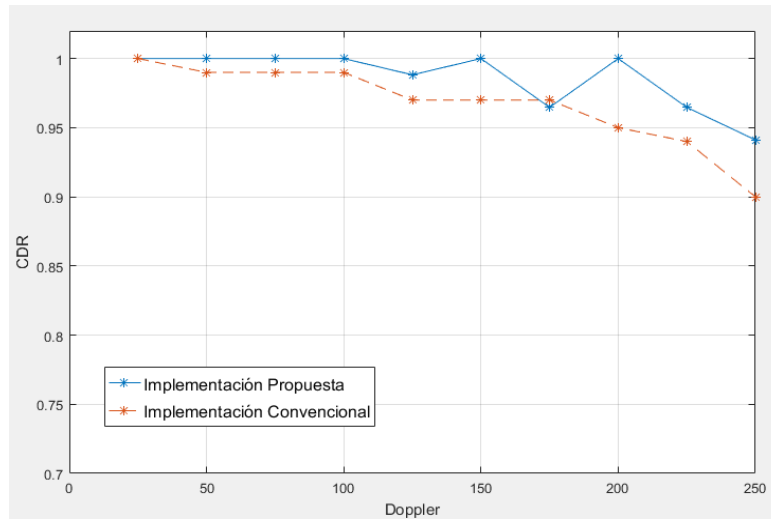


Figura 13

Efecto Doppler contra CDR.

4.3.- SINCRONISMO DE FRECUENCIA BASADO EN LA AUTOCORRELACIÓN DE PN ALTERNANTES

El esquema para sincronismo de frecuencia propuesto, tiene como características más interesantes los bajos valores de varianza en la estimación del CFO y su capacidad de rápida sincronización, siendo superior en ambos aspectos a los modelos convencionales que se basan en el algoritmo de correlación con una PN local [7]. Además, este esquema propone buenas prestaciones en ambientes de elevado AWGN y con atenuaciones por multitrayecto. Se propone el siguiente conjunto de simulaciones para validar estas propiedades. Con el fin de obtener la mayor fidelidad posible en los resultados, se considera funcionamiento ideal de la etapa de sincronismo de trama previa.

Los modelos de sincronismo de frecuencia deben ser capaces de conseguir un enganche en frecuencia, es decir, estabilidad en la determinación y corrección del CFO presente en la señal recibida, como se expone en [5] y [7]. Para confirmar la funcionalidad del diseño propuesto se realiza un grupo de simulaciones, en las que se hace un barrido de los posibles valores de CFO y se comprueba la estimación realizada por el modelo. El escenario sobre el cual se realiza la comprobación es el definido por los parámetros de la Tabla 4.

Tabla 4
Parámetros Simulación 4

Parámetro	Valor
Modelo de Canal	AWGN
	Brasil B
SNR	5 dB
CFO	-600:25:600 Hz

Las simulaciones se realizan para un medio de comunicación con presencia de AWGN y atenuaciones por multitrayecto. Se define 5 dB como valor de SNR, siendo una condición de elevado nivel de ruido, común en las bibliografías analizadas. El modelo de canal con multitrayecto empleado es el estandarizado “Brasil B”. La existencia de multitrayecto aumenta el carácter práctico de la simulación, pues esta es una condición inherente a la mayoría de las situaciones de comunicaciones

reales. Se escogen estos valores límites pues son cercanos a la zona de trabajo que se desea para un esquema de sincronismo fino de frecuencia, como el que se propone.

La Figura 14 muestra los resultados obtenidos en las simulaciones bajo las condiciones dadas. Este es un gráfico de CFO estimado por el modelo (CFOestimado) en función del CFO aplicado a la señal (CFOerror). El CFO estimado se extrae al final del lazo de realimentación. El algoritmo propuesto en esta investigación es un sincronismo fino de frecuencia, por lo que solo debe ser capaz de estimar valores de CFO de algunas centenas de Hz. Al igual que en la implementación presentada en [7], para valores mayores de CFO, es necesario una etapa previa de sincronismo grueso de frecuencia o un sintonizador de elevada precisión, como se plantea en [4]. Con esta implementación se consigue una estimación lineal, casi ideal, en el rango de -430 Hz a 430 Hz, lo que valida esta propuesta como una etapa de sincronismo fino. Como muestra la figura, los algoritmos de sincronismo grueso (algoritmo convencional) consiguen un mayor rango de trabajo, pero con sacrificio de su precisión. Los errores de estimación en estos llegan a los 200 Hz.

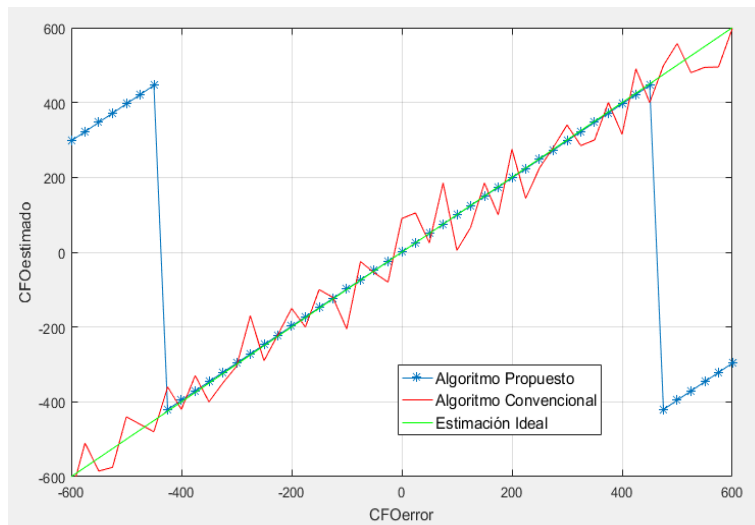


Figura 14

Error de CFO contra CFO estimado

Una importante característica de este modelo de sincronismo fino de frecuencia es el balance que se consigue entre rápida sincronización y estabilidad, ambos, factores de gran relevancia para evitar la pérdida de información o la información errónea. Hasta el momento en que se consigue la sincronización, las tramas con presencia de CFO sufren efectos en sus constelaciones que afectan la capacidad de los demoduladores para identificar correctamente los símbolos. Por esto, es necesario que el proceso de sincronismo sea lo más breve posible. Para la comprobación de estos parámetros se emplea el escenario definido en la Tabla 5.

Tabla 5
Parámetros de la Simulación 5

Parámetro	Valor
Modelo de Canal	AWGN Brasil B
SNR	5 dB
CFO	400 Hz

Las simulaciones se realizan sobre un modelo de canal con presencia de AWGN y el esquema de multitrayecto estandarizado Brasil B. Se selecciona un valor de SNR de 5 dB para simular condiciones de elevado nivel de ruido. Se escoge un CFO de 400 Hz, pues es un valor cercano al máximo de correcto funcionamiento del algoritmo propuesto, y el objetivo de esta simulación es determinar las demoras máximas para la sincronización.

La Figura 15 muestra los resultados obtenidos en la simulación para las condiciones dadas. Este es un gráfico de tramas procesadas (Tramas) en función del CFO estimado. Por una parte, el algoritmo convencional, para valores pequeños de

ganancia del filtro ($k = 0.03$), se toma más de 90 tramas para lograr el sincronismo de frecuencia con bajos niveles de fluctuación (-1.7 Hz, 7.8 Hz), mientras que para mayores valores de k ($k = 0.3$) logra la sincronización más rápido, pero sacrificando la estabilidad. Entonces se produce aquí un conflicto entre rapidez de convergencia y estabilidad. Por otra parte, el algoritmo propuesto logra la sincronización de frecuencia con apenas 10 tramas, consiguiendo bajos valores de fluctuación (-0.8 Hz, 0.8 Hz) incluso para $k = 0.3$. Esto se debe a la alta precisión en la estimación del CFO conseguida con la implementación propuesta.

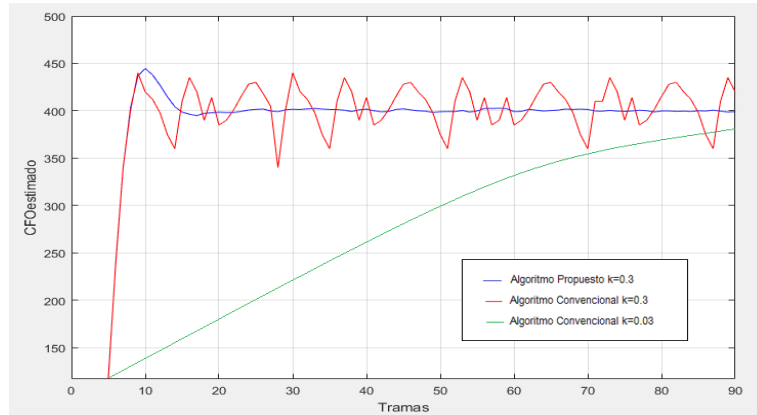


Figura 15

Número de Tramas contra Estimación de CFO.

4.4.- ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS

Tras la revisión de los resultados obtenidos se logra la validación de las implementaciones propuestas. La Tabla 6 representa un análisis cuantitativo de los mismos. Como resultado de esta investigación quedan plasmados dos esquemas completos de sincronismo de trama, con respectivas etapas de sincronismo grueso de trama y una etapa común de sincronismo fino de trama común. Además, un modelo de sincronismo fino de frecuencia es presentado.

Tabla 6

Tabla comparativa

SINCRONISMO DE TRAMA		
	CDR (AWGN)	CDR (AWGN + Efecto Doppler)
Autocorrelación	1	Máx 0.87 para 25 Hz Efecto Doppler Mín 0.8 para 200 Hz Efecto Doppler
Correlación con PN generada localmente	1	Máx 1 para 25 Hz Efecto Doppler Mín 0.94 para 250 Hz Efecto Doppler
Convencional	1	Máx 1 para 25 Hz Efecto Doppler Mín 0.90 para 250 Hz Efecto Doppler
SINCRONISMO DE FRECUENCIA		
	Fluctuación de la Estimación	Demora de la Estimación
Autocorrelación de PN alternantes	[-0.8 Hz, 0.8 Hz]	10 tramas
Convencional	[-22 Hz, 33 Hz]	Más de 90 tramas

El modelo de Sincronismo de Trama basado en la Autocorrelación, presenta un deterioro de cerca de una décima respecto al modelo tomado como referencia en cuanto a CDR en ambientes con presencia de Efecto Doppler, tanto en sus valores

máximos como mínimos. Sin embargo, las características relevantes de esta propuesta son la capacidad de sincronización en apenas una trama y el excelente desempeño en modelos de canal con solo AWGN. En cuanto al esquema de sincronismo de trama basado en la correlación con una PN generada localmente, se mejora en cuatro centésimas el valor de referencia en condiciones similares de Efecto Doppler.

El modelo de implementación para el esquema de Sincronismo Fino de Frecuencia basado en la Autocorrelación de PN alternantes, consigue un desempeño similar al presentado en [7], donde se propone la utilización de este algoritmo. Con respecto al esquema presentado como convencional, se mejora en más de 20 Hz los valores de fluctuación en las estimaciones, y en más de 80 tramas, las demoras en la estimación. La comprobación de sus desempeños para diferentes modelos de canal y su comparación con bibliografías actuales permite validar los resultados conseguidos e insertarlos como parte del estado del arte en temas de sincronismo.

5.- CONCLUSIONES.

El estudio de las características fundamentales que definen los modelos de sincronismo del estándar DTMB, implica un necesario acercamiento a los efectos que produce el medio de comunicación sobre una transmisión inalámbrica, como pueden ser, afectaciones por multitrayecto, por Efecto Doppler y la presencia de AWGN. Teniendo en cuenta estos factores se logran respectivas implementaciones para dos modelos completos de sincronismo de trama y un sincronismo fino de frecuencia. La validación de estas propuestas se logra a través de simulaciones en MatLab/Simulink y la comparación de los resultados obtenidos con los que representan el estado del arte.

El Sincronismo de Trama basado en la Autocorrelación presenta buenas características de desempeño (altos valores de CDR) en ambientes de elevado AWGN, mientras que sus prestaciones disminuyen para modelos con multitrayecto o Efecto Doppler. Como condición favorable, a efectos de una implementación práctica, este modelo representa un ahorro en cuanto a hardware y a complejidad de procesamiento, pues no necesita ninguno de los bloques relacionados con la generación de una señal de referencia. De aquí, la importancia de continuar trabajando en su perfeccionamiento hasta conseguir las mejores prestaciones posibles. El Sincronismo de Trama basado en la Correlación con una PN local, mejora la respuesta ante Efecto Doppler, pero es igualmente sensible ante multitrayecto. Estos algoritmos tienen como característica común su rápida sincronización.

La implementación propuesta para el algoritmo de Sincronismo de Frecuencia basado en la Autocorrelación de secuencias PN alternantes propone un valioso compromiso entre velocidad de sincronización y estabilidad. Además, se comprueba su funcionalidad en modelos de canal con presencia de AWGN y multitrayectos.

REFERENCIAS

1. Chinese National Standard_GB20600-2006_Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Television Terrestrial Broadcasting System. Standarization Administration of the People's Republic of China;
2. Lai, Hui-Chen. Simulink-based implementation and performance analysis of TDS-OFDM in time-varying environments [Internet] [Master]. Naval Postgraduate School; 2014. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10945/43943>
3. Gao Z., Zhang C., Zhang Y., Zhang H.. Frequency-Domain Response Based Timing Synchronization: A Near Optimal Sampling Phase Criterion for TDS-OFDM. En Vancouver, BC, Canada: IEEE; 2014.
4. Liu G, Zeng L, Li H, Xu L, Wang Z. Robust CFO Acquisition in PN-Padded OFDM Systems. ETRI J. 1 de agosto de 2013;35(4):706-9.
5. Fledderus, L. Pei. Chinese Digital Terrestrial/Television Multimedia Broadcasting Receiver: Algorithm and Design [Internet] [Master]. Universidad Técnica de Eindhoven; 2010. Disponible en: <https://research.tue.nl/en/studentTheses/chinese-digital-terrestrial-television-multimedia-broadcasting-rec>
6. Zheng Z. Frame Head Mode Detection and Symbol Detection Scheme for Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting Systems. IEEE Trans Broadcast. septiembre de 2012;58(3):6.
7. Dai L., Fu J., Wang J., Yang Z., Alaniz A.. A New Frequency Synchronization Algorithm in The TDS-OFDM Systems. En Guangzhou, China: IEEE; 2008.

8. Upamanyu M. Introduction to Communication Systems. University of California, Santa Barbara: University of California; 2014.
9. Ahmad A, Al-Busaidi SS, Al-Musharafi MJ. On Properties of PN Sequences generated by LFSR – a Generalized Study and Simulation Modeling. Indian J Sci Technol. 2013;6(10):5351-8.
10. A. BC. Communications Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication. 4th ed. McGraw-Hill; (McGraw-Hill International Editions).

AUTORES

Dariel Pereira Ruisánchez, Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, graduado en 2017 en la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). Desde septiembre de 2017 se desempeña en **LACETEL**, radicado en La Habana, Cuba. **Correo electrónico:** dariel@lacetel.cu

Reinier Díaz Hernández, MsC, Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, graduado en 2007 en la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). Se desempeña como investigador en **LACETEL**, La Habana, Cuba, desde octubre 2009; en agosto de 2016 obtiene la categoría de “Investigador Agregado”. En febrero de 2017 concluye su tesis de Maestría y obtiene la categoría que lo acredita como Máster en Ciencias (MsC). Las principales temáticas de investigación que desarrolla están relacionadas con las comunicaciones digitales y el procesamiento digital de señales en sistemas de radiodifusión. **Correo electrónico:** reinier@lacetel.cu

Ernesto Fontes Pupo, Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, graduado en 2014 en la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). Desde septiembre 2014 se desempeña como investigador en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Telecomunicaciones, **LACETEL**, radicado en La Habana, Cuba. Actualmente cursa la X edición de la Maestría en Sistemas Digitales. Las principales temáticas de investigación que desarrolla están relacionadas con las comunicaciones digitales y el procesamiento digital de señales en sistemas de radiodifusión. **Correo electrónico:** fontes@lacetel.cu



Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License