

Evaluación del desempeño de la detección de energía en señales DTMB

Evaluation of the performance of energy detection in DTMB signals

MSc. Dayana Hernández Rodríguez¹, Dr.Sc. Vitalio Alfonso Reguera², MSc. Yosvany Rafael Esponda Fernández³

Recibido: 11/2017 | Aceptado: 02/2018

PALABRAS CLAVE

Radio cognitiva
Técnicas de detección
del espectro
Detector de energía
DTMB

RESUMEN

La Radio Cognitiva (RC) se alza como una posible solución para el uso eficiente del espectro radioeléctrico. La detección del espectro es el primer paso en la RC ya que le permite obtener conocimiento sobre el ambiente que le rodea. Existen varias técnicas de detección del espectro para aplicaciones de RC, destacando la detección de energía por su rapidez para obtener un resultado sobre la presencia o no de usuarios primarios. La introducción del estándar DTMB en las bandas dedicadas a la difusión de televisión en Cuba representa un mayor número de canales disponibles para la transmisión de usuarios secundarios. Sin embargo, no existe una valoración de ninguna técnica de detección que permita el uso simultáneo en esa banda. Con este objetivo se realiza una evaluación del desempeño de la detección de energía de señales DTMB usando la simulación con Matlab/Simulink. Sus resultados demuestran que el detector de energía mantiene buen desempeño ante altas relación señal a ruido (SNR) y conocimiento previo de la varianza de ruido del canal. También se manifiesta una relación de compromiso entre la probabilidad de detección y la probabilidad de falsa alarma y en la elección de un umbral de detección efectivo.

KEYWORDS

Cognitive radio
Spectrum detection
techniques
Energy detector
DTMB

ABSTRACT

Cognitive Radio (CR) stands as a possible solution for the efficient use of the radio spectrum. The detection of the spectrum is the first step in the CR since it allows you to obtain knowledge about the environment that surrounds it. There are several spectrum detection techniques for CR applications, highlighting the detection of energy by its speed to obtain a result on the presence or absence of primary users. The introduction of the DTMB standard in the bands dedicated to television broadcasting in Cuba represents a greater number of channels available for the transmission of secondary users. However, there is no assessment of any detection technique that allows simultaneous use in that band. With this objective in the present investigation an evaluation of the performance of the energy detection of DTMB signals is made using the simulation with Matlab / Simulink. The results of the simulation show that the energy detector maintains good performance against high SNRs and previous knowledge of the channel noise variance. There is also a compromise

¹ Empresa Eléctrica Provincial de Sancti Spiritus, Cuba, d.h@nauta.cu

² Universidad Central de Las Villas Marta Abreu, Cuba, vitalio@uclv.edu.cu

³ RadioCuba Sancti Spiritus, Cuba, yosvanyrf@nauta.cu

between the probability of detection and the probability of false alarm and the choice of an effective detection threshold.

Introducción

Las bandas de frecuencias no reguladas donde cualquier usuario puede trabajar sin ser autorizado por la entidad reguladora del espectro; se encuentran excesivamente utilizadas debido al aumento del uso de las redes inalámbricas. Dada la limitación del espectro de frecuencia; el actual esquema de distribución de frecuencias estáticas no puede acomodar el incremento de las altas razones de datos que exigen las nuevas aplicaciones. Por otra parte, las bandas del espectro asignadas por las entidades reguladoras son poco utilizadas debido a la política inflexible de distribución del espectro actual. La Radio Cognitiva (RC) se declara como una solución tentadora al problema de congestión del espectro a través de la introducción del uso oportunista de las bandas de frecuencia que no están excesivamente ocupadas por los usuarios primarios (UP) (FCC, 2005). La detección del espectro (DE) es el componente más importante en el establecimiento de la RC. Es la tarea de obtener conocimiento acerca del uso del espectro y la existencia de UP en un área geográfica. El estándar 802.22 fue presentado por la IEEE en el 2011 y es el primer estándar basado en la RC. El mismo abarca tecnologías para las redes inalámbricas de área regional (*WRAN*, *wireless regional area network*) que incluyen un plano cognitivo que permite detectar los canales ocupados en la banda de televisión e identificar las oportunidades de transmisión de los Usuarios Secundarios (US) en los canales desocupados.

La televisión digital permite un mayor aprovechamiento del ancho de banda de los canales de frecuencias anteriormente destinados a la televisión analógica. Cuba ha introducido la televisión digital, adoptando la norma conocida como DTMB (*Digital Televisión Terrestrial Multimedia Broadcast*), desarrollada por China. Actualmente la mayoría de los canales disponibles en las bandas de Televisión se encuentran en desuso, existiendo la posibilidad de utilizar estas frecuencias, que tienen muy buenas características de propagación, para las transmisiones secundarias. Los US deben respetar las transmisiones primarias de televisión, detectando inmediatamente su presencia, usando una técnica de detección del espectro como la Detección de Energía

que es un método de detección simple para determinar rápidamente si la señal está presente o no en el canal.

Contenido

La RC se puede definir como una radio que puede cambiar sus parámetros de transmisión basada en la interacción con el ambiente donde opera (FCC, 2003). En las redes cognitivas, los usuarios cognitivos conocidos como Usuarios Secundarios (US) están autorizados a usar las porciones libres del espectro licenciado o los canales desocupados sin causar ninguna interferencia a los Usuarios Primarios (UP) (Akyildiz, Woon-Yeol, Vuran y Mohanty, 2006). Cuando un UP aparece en el canal que está siendo actualmente usado por los UP, todos los US deben posponer su transmisión o cambiar a otro canal disponible (Domenico, Calvanese y Di Benedetto, 2012). La RC está diseñada para ser sensible a los cambios del ambiente por lo que la detección del espectro se convierte en un importante requerimiento para las US. Generalmente, el proceso de detección del espectro incluye obtener características del uso del espectro a través de múltiples dimensiones tales como el tiempo, espacio, frecuencia, codificación así como la determinación del tipo de señal que está ocupando el espectro (Yucek y Arslan, 2009).

Detección local del espectro

En la detección local, el US decide de forma independiente sobre la existencia o no del UP, a partir de las medidas realizadas por él mismo. Básicamente, el problema de la detección del UP se puede plantear como un problema de detección de señal en un entorno con ruido aditivo blanco gaussiano (*AWGN*, *Additive White Gaussian Noise*). El objetivo final es distinguir entre dos hipótesis (Yucek y Arslan, 2009):

$$H_0: y(n) = w(n) \quad (1)$$

$$H_1: y(n) = s(n) + w(n) \quad (2)$$

Donde:

$y(n)$: señal recibida por el US

$s(n)$: señal transmitida por el UP

$w(n)$: es el ruido AWGN en la banda de interés

En la hipótesis H_0 se asume la no existencia del UP en una determinada banda de frecuencia, mientras

que la hipótesis alternativa, H_1 , indica la presencia de dicho usuario, sea del tipo que sea.

La eficiencia de las técnicas de detección del espectro puede ser definida a través de dos probabilidades: la probabilidad de detección P_D y la probabilidad de falsa alarma P_F . La P_D es la probabilidad de detectar una señal en una frecuencia determinada cuando realmente existe. La P_F es la probabilidad que la prueba decida incorrectamente que una determinada frecuencia esté ocupada cuando realmente no lo está.

Detección de energía

La detección de energía es una de las técnicas de detección del espectro más utilizada por su baja carga computacional y fácil implementación (Yucek y Arslan, 2009) (Yuan, Y., Bahl, P., Chandra, R., Chou, P. A., Ferrell, J. I., Moscibroda, T., Wu, Y., 2007). Es basada en la energía detectada del UP, no necesita información a priori o de antemano para realizar la detección de la señal del UP. El diagrama en bloque que describe la técnica se muestra en la figura 1, donde se describe que la señal recibida es pasada a través de un filtro pasa banda y la señal limitada en banda es integrada sobre un intervalo de tiempo. La señal integrada en el tiempo es comparada con un umbral definido para determinar la presencia de la señal primaria (Kumar, 2014). El valor umbral puede ser establecido de forma fija o variable en dependencia de las condiciones del canal (Subhedar, M., y Birajdar, G., 2011). En la práctica el umbral es seleccionado para obtener una determinada razón de falsa alarma por lo tanto el conocimiento de la varianza del ruido es suficiente para seleccionar un umbral (Lehtomaki, Juntti, Saarnisaari, y Koivu, 2005).

La técnica de detección de energía también es conocida por sus desventajas en el desempeño de la detección cuando la varianza del ruido es desconocida en el nodo de detección. Cuando la razón señal a ruido es muy baja es muy difícil distinguir entre la señal primaria y el ruido, no obstante, el conocimiento de

la potencia de ruido puede ser usada para mejorar el desempeño del detector de energía.

Métricas de desempeño de la Detección de Energía

El desempeño de un detector de energía y de otros detectores es caracterizado usando las siguientes métricas:

Probabilidad de Falsa Alarma (P_F): es la probabilidad de decidir que la señal está presente cuando H_0 es verdadero, $P_F = P[A > \lambda | H_0]$ donde λ es el umbral de detección y A es la energía de la señal normalizada con respecto al número de muestras N y la varianza del ruido $2\sigma_w^2$.

En el contexto de la Radio Cognitiva una falsa alarma produce huecos espectrales no detectados, por lo que un alto valor de probabilidad de falsa alarma representa un pobre uso del espectro por parte de los usuarios secundarios.

Probabilidad de Detección-Fallida (P_{md}): es la probabilidad de decidir que la señal está ausente cuando H_1 es verdadero, $P_{md} = P[A < \lambda | H_1]$, lo cual es equivalente a identificar un hueco espectral donde no lo hay. Por consiguiente, un valor alto de P_{md} introduce una interferencia inesperada a los usuarios primarios.

Probabilidad de Detección (P_d): es la probabilidad de decidir que la señal está presente cuando H_1 es verdadero, $P_d = P[A > \lambda | H_1]$ de ese modo $P_d = 1 - P_{md}$.

Tanto la confiabilidad como la eficiencia son requeridas en las técnicas de detección del espectro que forman parte de la radio cognitiva, por lo que se persigue una alta probabilidad de detección o baja probabilidad de detección fallida y baja probabilidad de falsa alarma.

Parámetros del diseño

Los principales parámetros para el diseño de un detector de energía son el número de muestras y el umbral. A pesar de que su desempeño depende de la SNR y de la varianza del ruido, los diseñadores tienen un control muy limitado sobre ellos porque estos parámetros dependen del funcionamiento del canal inalámbrico.

Un umbral predefinido es requerido para decidir si la señal primaria en un canal está ausente o presente. Este umbral determina todas las



Figura 1. Diagrama en Bloque Detector de Energía.

métricas de desempeño Pd, Pf y Pmd. Para un conocido número de muestras N y una varianza de ruido σ_w^2 . Es una práctica común establecer un umbral basado en una probabilidad de falsa alarma constante $P_f < 0.1$. La selección del umbral basada en la Pf puede ser obtenida por la siguiente ecuación:

$$\lambda = (Q^{-1}(P_f) + \sqrt{N}) \sqrt{N\sigma_w^2} \quad (3)$$

Donde:

Pf: Probabilidad de Falsa Alarma

N: Número de muestras

σ_w^2 : varianza de ruido

Según Chen (2010) la probabilidad de detección se puede obtener una vez establecido el umbral de detección.

$$P_d = \frac{r\left(N, \frac{\lambda}{2\sigma_w^2\lambda(I+\gamma)}\right)}{r(N)} \quad (4)$$

Donde:

N: Número de muestras

$2\sigma_w^2$: varianza de ruido

λ : umbral de detección

γ : relación señal a ruido

Por lo tanto, la selección del umbral puede verse como un problema de optimización que debe balancear entre dos objetivos en conflicto maximizar Pd mientras minimizas la Pf.

Matlab/Simulink

MATLAB es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) que permite la implementación de algoritmos matemáticos gracias a su amplia biblioteca de funciones matemáticas. El paquete MATLAB dispone de herramientas adicionales que expanden sus prestaciones como es el caso de Simulink.

Simulink es un ambiente de diagramas en bloques para la simulación multidominio y diseño basado en modelos. Es integrado con MATLAB, lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB en modelos y exportar resultados de la simulación a MATLAB para análisis adicionales.

Las bibliotecas utilizadas en la investigación son:
Simulink

Communications System Toolbox

Digital Signal Processing(DSP) System Toolbox

Dentro de Simulink existen varias opciones para interpretar lenguaje M o lenguaje Matlab como por ejemplo las Funciones de Sistema. Las Funciones de Sistema (*S-Function*) proveen un poderoso mecanismo para extender las capacidades del ambiente de Simulink. Una función S es un lenguaje de descripción de un bloque de Simulink escrito en Matlab. Un bloque en Simulink consiste en un conjunto de entradas y un conjunto de salidas donde las salidas son una función del tiempo de simulación, de las entradas y de los estados intermedios.

Modelo de simulación

El modelo de simulación en la investigación es construido con el editor de Simulink y cuenta con 3 partes fundamentales: la Señal DTMB, el canal con ruido blanco gaussiano y el bloque detector de energía implementado con el uso de funciones S. (Figura 2)

Señal DTMB

La norma de televisión digital utilizada en Cuba es el estándar conocido como DTMB –*Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcast*–, estándar de televisión desarrollado por China. El elemento básico de la estructura de trama es la Trama de Señal (TS). La TS es una combinación de la Cabecera de trama y el Cuerpo de Trama. El Cuerpo de Trama está comprendido de 3780 símbolos que incluyen el Bloque de Datos Básico y el Sistema de Información. Este último provee la información necesaria para la decodificación y demodulación de cada TS, lo cual incluye el modo de mapeo de la constelación de símbolos, la razón de código LDPC –*Low Density Parity Check*–, el modo de interpolación y el modo de procesamiento del cuerpo de la trama. La Cabecera de Trama es formada por las conocidas secuencias binarias Pseudo Aleatorias –*PN, Pseudo Noise*– las cuales son utilizadas para la sincronización, para la estimación del canal, la ecualización y cumplen funciones de intervalo de guarda. En la conformación real de una señal DTMB se pasan por varios módulos que potencian la señal haciéndola más fuerte ante errores de transmisión. Para el caso de la tesis no se persigue la reproducción de la señal en un sistema receptor, solo se persigue detectar la distribución de energía de las señales de este tipo. Por lo que solo se reproduce la etapa de mapeo de los símbolos de

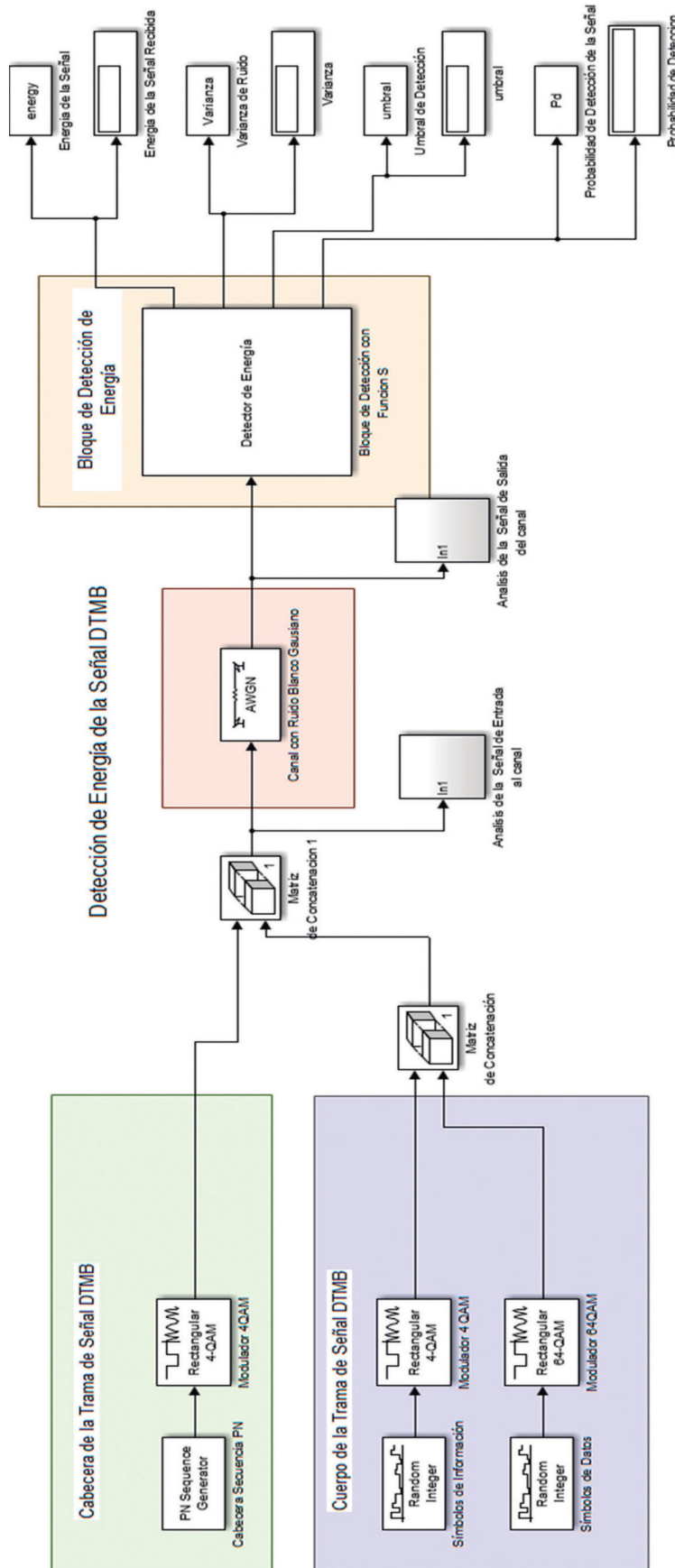


Figura 2. Modelo de Simulación.

datos, la combinación de estos con los datos de información y luego con la cabecera PN, para la conformación de una TS. (Figura 3)

Los bloques de la biblioteca de Simulink, utilizados en la implementación de una Trama de Señal son:

Random Integer Generator: Communication System Toolbox/Comm Sources/Random Data Sources

RectangularQAMModulator Baseband: Communication System Toolbox/Modulation/Digital Baseband Modulation

PN Sequence Generator: Communication System Toolbox/Comm Sources/Sequence Generators

Matrix Concatenate: DSP System Toolbox/Math Functions/Matrices and Linear Algebra/Matrix Operations

Dentro del subsistema llamado Análisis Señal de entrada al canal se encuentran los bloques que permiten analizar la conformación de la señal DTMB.

Signal to Workspace: DSP System Toolbox/Sink

Time Scope: DSP System Toolbox/Sink

Spectrum Analyzer: DSP System Toolbox/Sink

Las principales configuraciones en cada uno de los bloques son:

El bloque generador PN es configurado con el polinomio generador dado por el estándar para la cabecera de tipo PN420 y con la configuración basada en trama (frame-based) donde en cada corrida de la simulación son generados 420 símbolos.

Los bloques generadores de números enteros de forma aleatoria, fueron configurados con diferentes números M-ary según el modulador QAM que les precediera, según

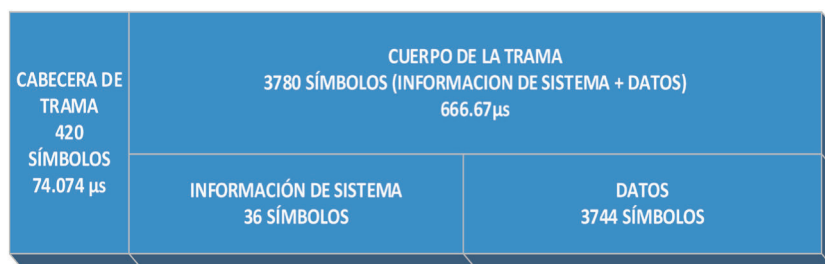


Figura 3. Trama de Señal DTMB.

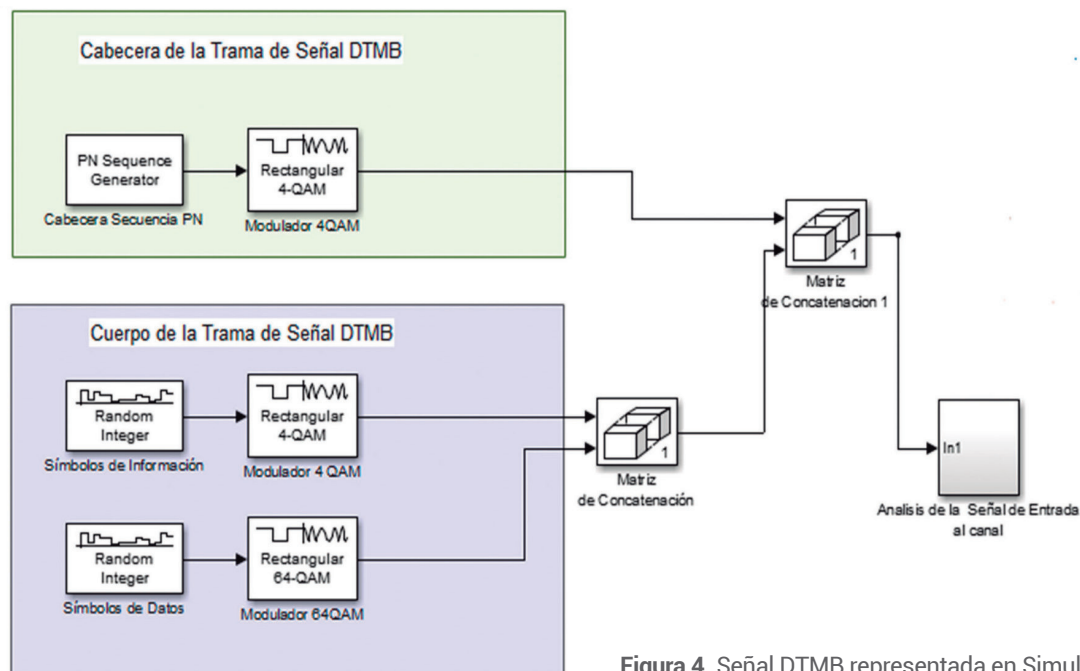


Figura 4. Señal DTMB representada en Simulink.

el estándar DTMB los 36 símbolos de información van modulados en 4-QAM y los 3744 símbolos de datos son modulados en 64-QAM.

Los bloques moduladores QAM son configurados según el tipo de modulación especificada en el estándar DTMB.

Los bloques de matriz de concatenación permiten unir primeramente los símbolos de información y los símbolos de datos y luego esa trama resultante con la cabecera PN, de forma tal, que como resultado obtenemos un arreglo de vectores concatenado verticalmente.

Canal con Ruido Blanco Gaussiano

Para simular el canal de comunicaciones es escogido el bloque Canal con ruido blanco gaussiano –AWGN, Channel– de la biblioteca de *Simulink Communications System Toolbox*/

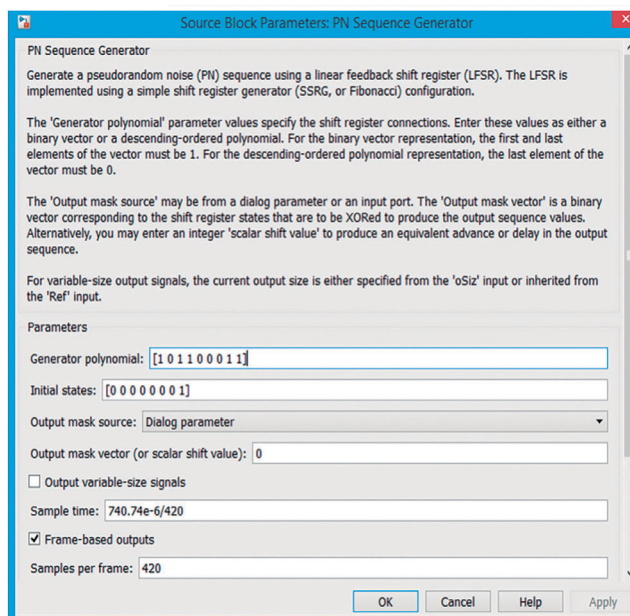


Figura 5. Bloque Generador de Secuencia PN.

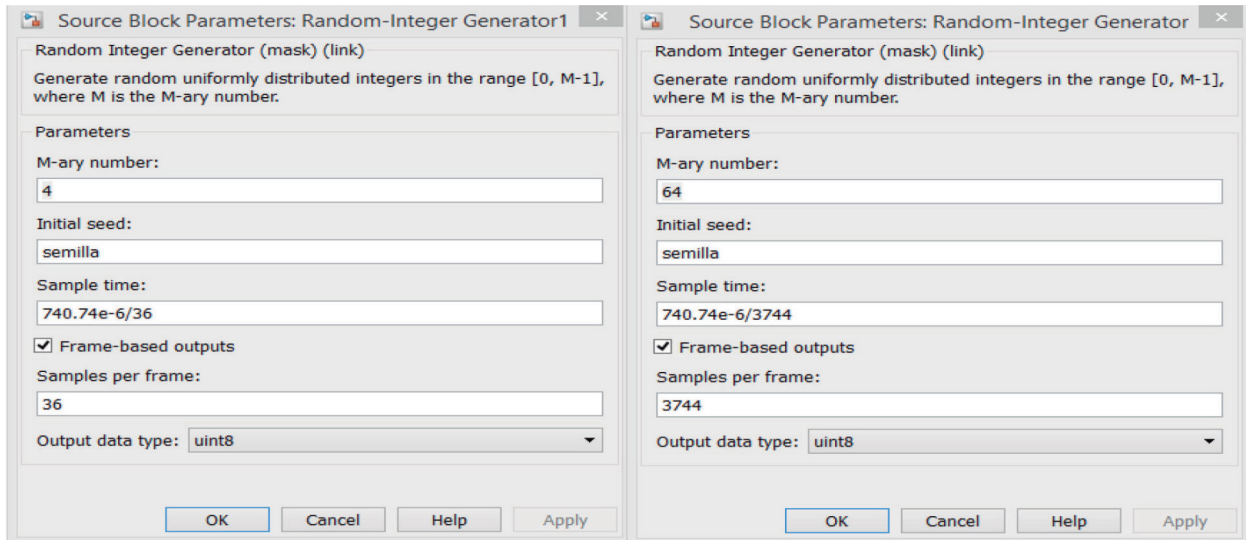


Figura 6. Bloques generadores de números aleatorios.

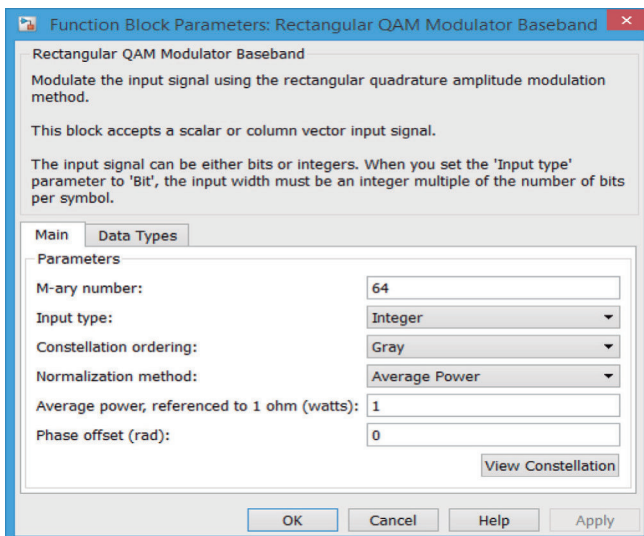


Figura 7. Bloque Modulador QAM.

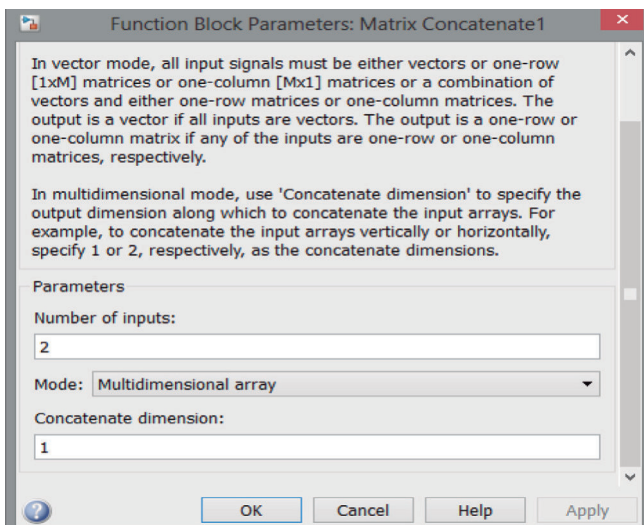


Figura 8. Bloque matriz de concatenación.

Channels (Figura 9). En la investigación es de gran importancia la varianza del ruido que en conjunto con la probabilidad de falsa alarma determinan el umbral del detector de energía. El bloque canal de ruido blanco gaussiano posee varios modos para calcular la varianza del ruido, en la investigación es escogido el modo en el que se especifica la SNR. Cuando es escogido este modo es necesario especificar los siguientes parámetros: Relación Señal a Ruido y la Potencia de la Señal de Entrada.

El parámetro Semilla inicial que requiere el canal con ruido es configurado con la variable Semilla, que es un arreglo de valores establecido en el espacio de trabajo de Matlab que son entregados a Simulink en cada una de las simulaciones realizadas, garantizando que sea añadido un ruido aleatorio diferente a cada señal de entrada.

La fórmula utilizada por el bloque para calcular la varianza del ruido es la siguiente:

$$\text{Varianza de Ruido} = \frac{\text{Potencia de Señal}}{10^{\frac{\text{SNR (dB)}}{10}}} \quad (5)$$

Implementación del Bloque Detector de Energía

El bloque de detección de energía tiene el objetivo de detectar si la señal está presente en el canal y con qué probabilidad de detección es detectada. La probabilidad de detección de la señal varía en función de parámetros como la relación

señal a ruido, la varianza de ruido y la probabilidad de falsa alarma. Estos parámetros pueden ser variados en el modelo de simulación y ser analizado su comportamiento.

El bloque detector de energía fue implementado usando el bloque Funciones S de Matlab de Nivel 2 –*Level 2 Matlab S-Function*–. Este bloque es adaptable a los requerimientos del usuario; se encuentra en la biblioteca

de Simulink: *Simulink/ User-Defined Functions* –Funciones Definidas por el Usuario–

El bloque de detección de energía fue creado usando dos partes: una máscara que permite la interacción con el usuario a través de la entrada de parámetros necesarios en los cálculos del bloque y una segunda parte que es conformada por una función S. Debajo de la máscara, el bloque llama a la función S y le envía los parámetros requeridos para los cálculos que son mostrados en la salida del detector. La función S es creada usando la plantilla de funciones S de segundo nivel **msfuntm-pl.m** dada en la ayuda de MatlabR2015 específicamente en *Matlab/Simulink/BlockCreation/Host-specificCode/Matlab S-Functions*.

La máscara posibilita entrar cuatro parámetros. El primero es la probabilidad de falsa alarma que es usada para calcular el umbral de detección. El segundo y tercer parámetro respectivamente son la relación señal a ruido y la potencia de entrada que permiten calcular la potencia de ruido. El último parámetro es el número de muestras que posibilita ponderar los valores de energía de la señal.

La Función S (*S-Function*) establece las características del bloque a través de los métodos principales que implementa: la Configuración (*Setup*) y la Salida (*Outputs*). En el método de Configuración son definidos la cantidad de puertos de entrada y de salida, los tipos de datos de estos puertos (Dimensión, Tamaño, Modo de Muestra), la cantidad de parámetros de diálogo que permiten al usuario entrar los datos requeridos para los cálculos del bloque, así como los métodos llamados durante el inicio y simulación del modelo. En el método de Salida se calculan los valores que van a ser llevados a los puertos de salida entre los que se encuentran el umbral de detección y la

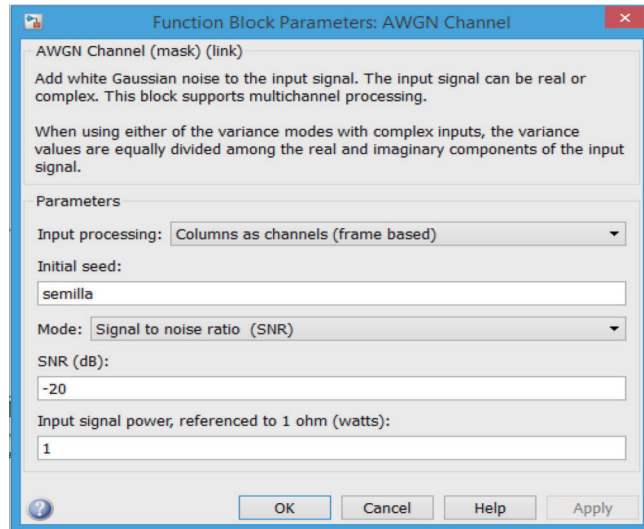


Figura 9. Bloque canal de ruido blanco gaussiano.

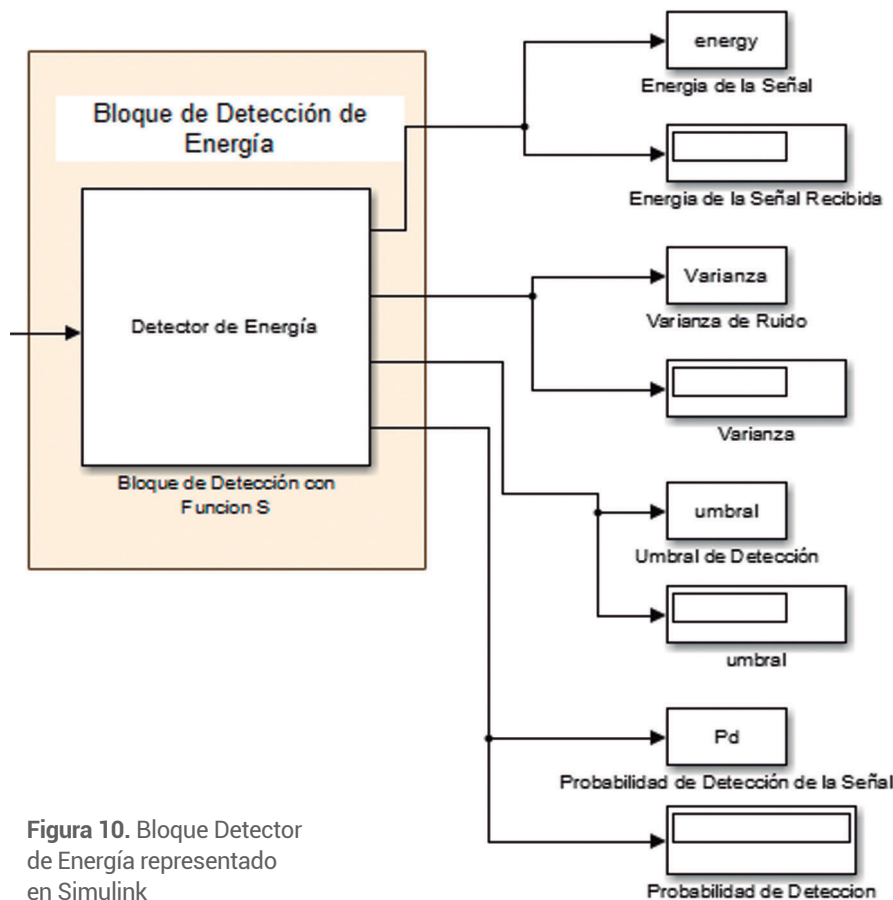


Figura 10. Bloque Detector de Energía representado en Simulink

probabilidad de detección definidos en las fórmulas 3 y 4 respectivamente. A continuación, se presentan las funciones de Matlab utilizadas para el cálculo de las salidas: umbral de detección y probabilidad de detección.

$$umbral = (qfuncinv(pf) + \sqrt{N}) * \sqrt{N} * varN \quad (6)$$

Donde:

qfuncinv(X): Función Q Inversa

sqrt(X): Raíz Cuadrada

$$Pd = \text{gammainc}(umbral / (varN * (1 + SNR)), N, 'upper') \quad (7)$$

Donde:

gammainc(X, A): Función Gamma Incompleta

Evaluación del Desempeño del Detector de Energía

El desempeño del detector de energía es evaluado a través de la variación de los parámetros principales que influyen en la detección de energía, entre los que se encuentran el umbral de detección, la probabilidad de falsa alarma, la relación señal a ruido, la potencia de ruido del canal y el número de muestras.

Variación del umbral de detección

La prueba de variar el umbral de detección del detector de energía permite medir la influencia de este parámetro en las métricas de desempeño del detector la Pd y la Pf. La misma es realizada llamando la simulación del modelo en Simulink desde un archivo con las configuraciones en Matlab y usando el script **simOut = sim('Modelotesis')** que permite simular el modelo desde el Editor de Matlab.

En la prueba se realiza una primera simulación con una relación señal a ruido (SNR) de -20dB que según (Stevenson, Chouinard, Lei, Hu y Shellhammer, 2009), es considerada como una señal de muy baja SNR a la cual el sistema debe ser capaz de funcionar, y permite saber entre cuáles valores se puede encontrar el umbral de detección para reconocer la señal DTMB. La prueba es realizada detectando una TS que consta de 4200 símbolos.

La figura 13 muestra la relación entre las métricas de desempeño Pd y Pf y el umbral de detección. Nótese que a medida que aumenta el umbral de detección disminuye el Pd y la Pf. Las disminuciones de estas dos métricas crean una relación de compromiso en la elección de un umbral de detección alto y un umbral de detección bajo,

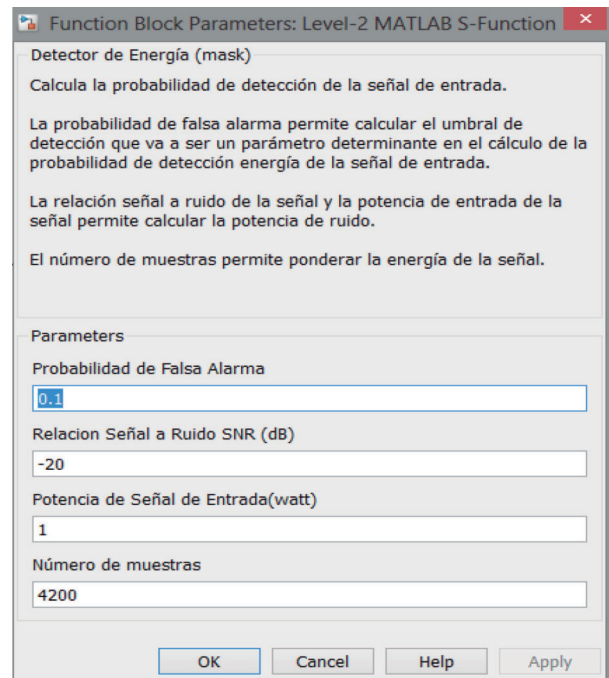


Figura 11. Máscara del Bloque Detector de Energía en Simulink.

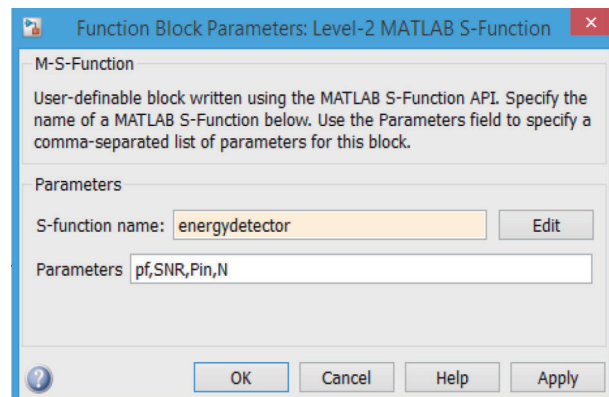


Figura 12. Bloque de Función Sistema de Nivel 2

debido a que un buen desempeño del detector de energía se obtiene con una alta Pd y una baja Pf.

Un umbral de detección alto va a impedir que señales primarias con energías menores que el umbral sean detectadas, lo cual disminuye la probabilidad de detección. A la vez es muy poco probable que una supuesta señal tenga una energía total mayor que el umbral alto definido y no exista una transmisión primaria verdadera, lo cual disminuye la Pf.

Un umbral de detección bajo va a posibilitar que se detecten todas las señales primarias con totales de energía no muy altos aumentando la probabilidad de detección. Mientras que a la vez es más probable que se detecten supuestas señales primarias cuando

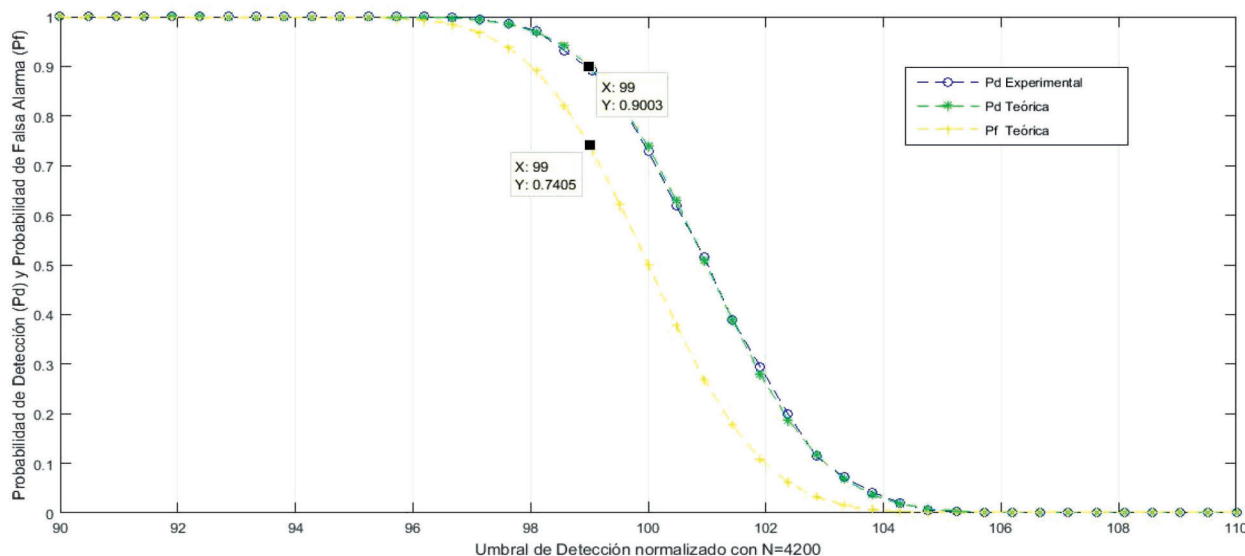


Figura 13. Umbral de Detección vs Probabilidad de Detección y Probabilidad de Falsa Alarma

verdaderamente no existen en el canal, haciendo que la Pf aumente también.

En la figura 13 se observa que cuando el detector de energía establece un umbral de detección de 99 (normalizado con $N=4200$) existe una Pd de 0.9 y una Pf de 0.7 por lo que se concluye que el detector de energía debe tener un umbral de detección normalizado entre 99 y 101 para lograr valores en las métricas que no afecten en gran medida su desempeño.

Variación del número de muestras en la detección

La prueba de variar el parámetro número de muestras (N) permite conocer la influencia de este en la probabilidad de detección. Para la prueba es fijada una probabilidad de falsa alarma de 0.1 lo que permite con el número de muestras que va variando calcular los umbrales de detección del detector de energía usando la fórmula 3. La relación señal a ruido (SNR) del canal ruidoso es establecida en -20 dB. Para cada valor de N es calculada un Pd experimental y una Pd teórica.

La Pd experimental es obtenida comparando la energía de la señal detectada (con un número determinado de muestras) con el umbral del detector, y contando la cantidad de veces que esa energía es mayor que el umbral. La Pd teórica se obtiene usando la fórmula 4 con el umbral establecido y siguiendo la variación de N .

La figura 14 muestra la relación entre el número de muestras y la Pd. Como se observa, a medida que aumenta el N aumenta la Pd. De esta manera se llega

a la conclusión de que cuando se desea aumentar el desempeño del detector de energía, la mejor opción es aumentar el número de muestras. Cuando es aumentado el número de muestras es aumentado también el tiempo de detección o el tiempo de recuperación de estas muestras. El tiempo de detección se encuentra limitado en las técnicas de detección del espectro para aplicaciones de RC debido a que afecta parte del tiempo de transmisión de los US, es decir se utiliza más tiempo en detectar la presencia del UP que en el aprovechamiento del canal por parte de los US. Por lo que es recomendado aumentar el número de muestras para obtener un mayor desempeño del detector de energía sobre todo cuando existen SNR bajas pero siempre cuidando no sobrepasar el tiempo de detección máximo de 2 segundos limitado en el IEEE Standard 802.22.2-2012.

Variación de la potencia de ruido cuando no hay señal primaria de entrada en el canal

El objetivo de esta prueba es analizar el comportamiento del detector de energía ante una entrada de solo ruido. Para obtener una entrada con solo ruido es multiplicada por cero la señal de entrada al bloque "canal de ruido blanco gaussiano", lográndose una salida con solo el ruido aleatorio introducido por el canal. Aunque la señal de entrada al canal es multiplicada por cero es necesario entrar el parámetro Potencia de señal de entrada en el bloque de canal ruidoso por lo que se especifica un valor pequeño, exactamente de 0.001 W. (Figura 9)

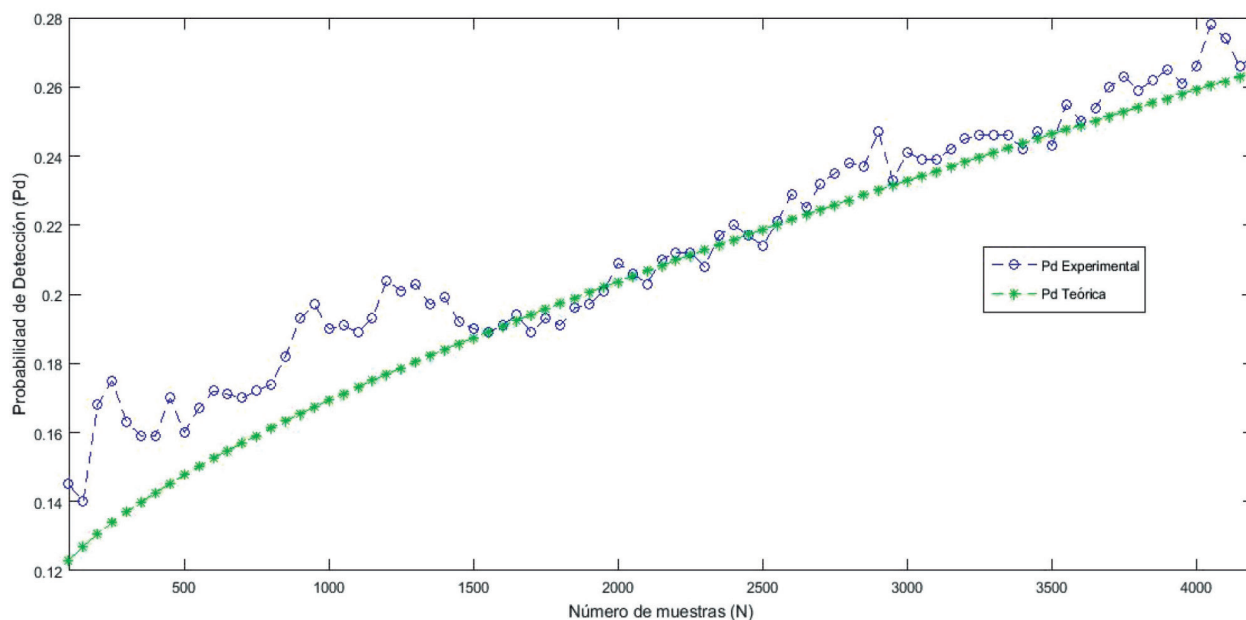


Figura 14. Número de muestras vs Probabilidad de Detección.

La potencia de ruido del canal va a ir aumentando a medida que va disminuyendo la SNR manteniendo una potencia de señal constante. La señal de entrada que llega al bloque de detección de energía es ruido por lo que la probabilidad de detección calculada por el bloque va a ser en realidad una probabilidad de falsa alarma debido a que no existe componente de señal primaria en la señal recibida por el detector. En la figura 15 son mostrados los cambios en el modelo para llevar a cabo la prueba.

En la figura 16 se muestra la relación entre la probabilidad de falsa alarma y la potencia de ruido dado un umbral fijo. En la prueba es utilizado un umbral fijo que es establecido una vez que es observado los niveles de energía de la señal de solo ruido que es detectada por el detector de energía.

La Pf teórica se obtiene despejando de la fórmula 3. La Pf experimental se obtiene calculando la cantidad de veces que la energía recibida por el detector es mayor que el umbral fijo. Nótese que la señal de entrada al detector es solamente ruido por lo que las veces que la energía sea mayor que el umbral existe una detección de falsa alarma. Como conclusión de los resultados obtenidos gráficamente se puede destacar que potencias de ruido menores a 48 mW mantienen una Pf que no afecta el desempeño del detector de energía. Una vez que se sobrepase el valor antes mencionado la Pf aumenta abruptamente. Por lo que en el diseño del detector de energía es muy importante el conocimiento de la potencia de ruido del canal o un estimado de ella, porque un cambio de potencia de ruido inesperado puede deteriorar grandemente el funcionamiento del detector.

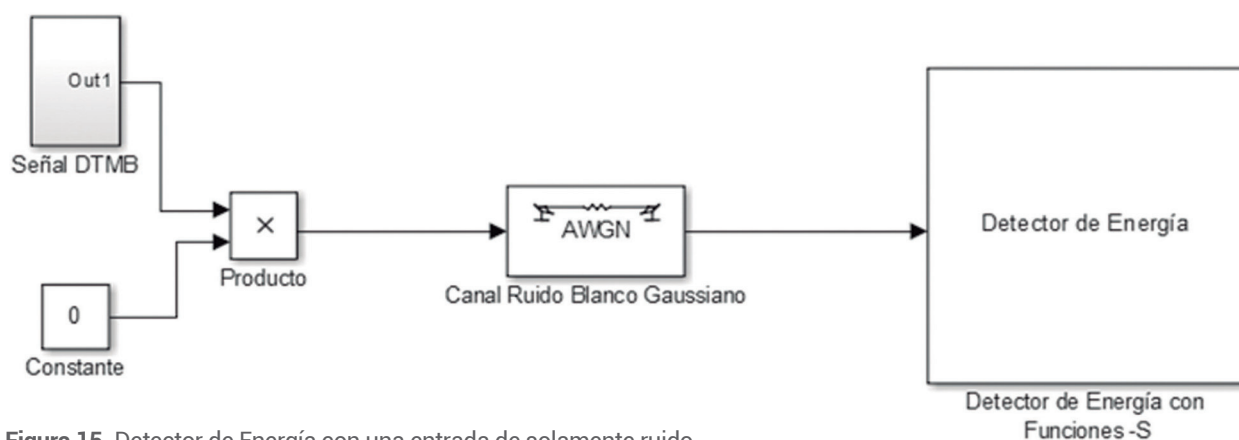


Figura 15. Detector de Energía con una entrada de solamente ruido

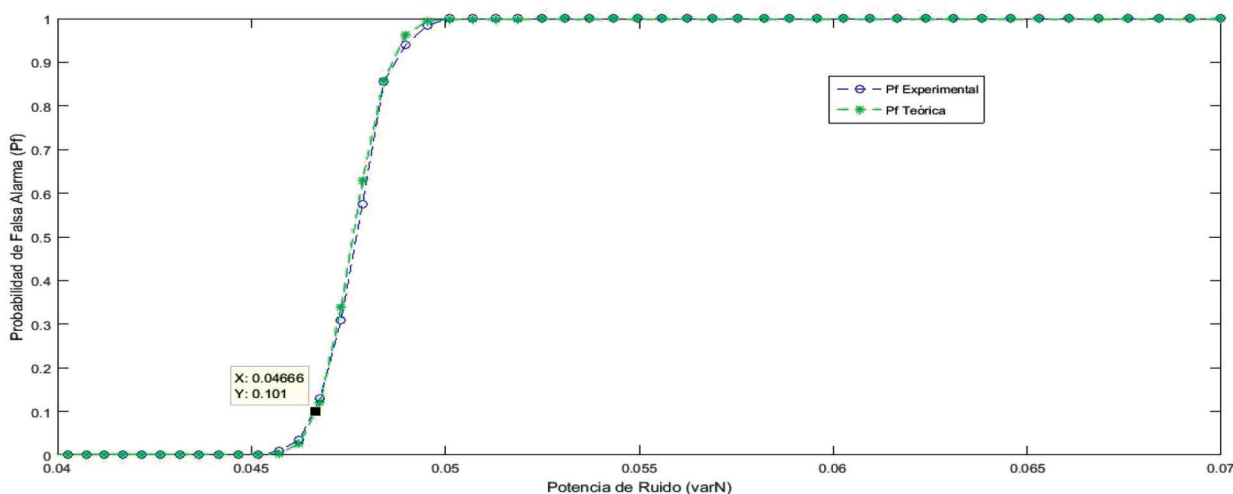


Figura 16. Potencia de ruido vs Probabilidad de Falsa Alarma.

Conclusiones

Las métricas para medir el desempeño de un detector de energía son la probabilidad de detección (P_d) y la probabilidad de falsa alarma (P_f). Para la obtención de estas métricas de desempeño las simulaciones fueron realizadas con Matlab/Simulink, que través de su lenguaje de bloques permitió el montaje del modelo de simulación.

En la detección de energía existe una relación de compromiso entre la elección de un umbral de detec-

ción alto y un umbral de detección bajo. La P_d del detector de energía puede ser potenciada aumentando el número de muestras pero esto trae consigo un mayor tiempo de detección, disminuyendo así, el tiempo utilizado por los US para la transmisión datos. Además el conocimiento de la potencia de ruido del canal o una estimación de esta, pueden mejorar el desempeño de la detección de energía.

Referencias

1. FCC. Notice of proposed rulemaking and order: Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies. ET Docket, No. 03-108 (2005).
2. FCC. ET Docket No 03-222. Notice of proposed rulemaking and order (2003).
3. Akyildiz, I. F., Woon-Yeol, L., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2006). NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks*, 50(13), 2127-2159.
4. Domenico, A. D., Calvanese Strinati, E., & Di Benedetto, M. G. (2012). A survey on MAC strategies for cognitive radio networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 14(1), 21-44.
5. Yucek, T., & Arslan, H. (2009). A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1), 116-130.
6. Shankar N., S., Cordeiro, C., & Challapali, K. (2005). *Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures*. Paper presented at the First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Maryland, USA.
7. Wang, P., Limin, X., Zhou, S., & Wang, J. (2007). *Optimization of detection time for channel efficiency in cognitive radio systems*. Paper presented at the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Hong Kong.
8. Yuan, Y., Bahl, P., Chandra, R., Chou, P. A., Ferrell, J. I., Moscibroda, T., Wu, Y. (2007). *KNOWS: Cognitive radio networks over white spaces*. Paper presented at the 2nd IEEE

- International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Dublin, Ireland.
9. Kumar, R. (2014). Analysis of Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio. *International Journal of Information and Computation Technology*, 4(4), 437-444
 10. Subhedar, M., & Birajdar, G. (2011). Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Networks: A Survey. *International Journal of Next-Generation Networks*, 3(2).
 11. Lehtomaki, J. J., Juntti, M., Saarnisaari, H., & Koivu, S. (2005). Threshold setting strategies for a quantized total power radiometer. *IEEE Signal Processing Letters*, 12(11), 796–799.
 12. Chen, Y. (2010). Improved energy
 13. **Mathworks**, T., Ayuda MatlabR2015a y Simulink. 2015.
 14. **Stevenson, C., Chouinard, G., Lei, Z., Hu, W., Shellhammer**, IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard. *IEEE Communications Magazine*, 47,2009.
 15. **802.22.2-2012(TM)**, I., Standard for Recommended Practice for Installation and Deployment of IEEE 802.22 Systems. 2012.

