

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MEXICALI**

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA**



**MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE OCUPACIÓN DE  
CANAL BASADO EN LA TRANSFORMADA DE HILBERT**

**TESIS**

**que para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el grado de**

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA presenta:**

**Jesús Alberto Pérez Vargas**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**Guillermo Galaviz Yáñez**

**Mexicali, Baja California, México**

**Junio de 2023**

# Índice

<u>Contenido</u>	<u>Página</u>
<b>1. Introducción.</b>	8
<b>2. Marco Teórico.</b>	16
<b>3. Desarrollo.</b>	36
<b>4. Resultados.</b>	49
<b>5. Conclusiones.</b>	59
<b>6. Trabajo Futuro.</b>	62

# Índice de figuras

<b>Figura 1.1</b> Donde se cruza el umbral y la curva de Densidad Espectral de Potencia .....	13
<b>Figura 2.1</b> Segmentación del ancho de banda en canales útiles de comunicación .....	19
<b>Figura 2.2</b> Árbol taxonómico del ruido eléctrico, se muestra la clasificación según origen del ruido eléctrico .....	20
<b>Figura 2.3</b> Distribución de potencia en el dominio de las frecuencias ejemplificando el ruido blanco .....	22
<b>Figura 2.4</b> Distribución de probabilidad en forma de campana .....	23
<b>Figura 2.5</b> Propagación multitrayectoria, se observan distintos caminos que puede tomar una señal en llegar a su destino .....	23
<b>Figura 2.6.</b> Representación de una señal digital.....	25
<b>Figura 2.7</b> Diagrama de constelación de modulaciones en cuadratura .....	27
<b>Figura 2.8</b> Diagrama de constelación 16 QAM.....	28
<b>Figura 2.9</b> Etapas del flujo de entorno cognoscitivo .....	30
<b>Figura 2.10</b> Taxonomía del acceso dinámico al espectro.....	31
<b>Figura 3.1</b> Ejemplo de la Densidad Espectral de Potencia de una señal QPSK afectada por ruido AWGN .....	38
<b>Figura 3.2</b> Ejemplo de Descomposición de Modo Empírico de una señal QPSK afectada por ruido AWGN.....	38
<b>Figura 3.3</b> Proceso empleado del modelo propuesto .....	39
<b>Figura 3.4</b> Ejemplo de fase de la función analítica, las señales de comunicación tienen el mismo nivel de SNR .....	41
<b>Figura 3.5</b> Segmento de la señal derivada de la fase, se observan los valores máximos y mínimos de fase son de $\pi$ a $-\pi$ respectivamente .....	42
<b>Figura 3.6.</b> Zoom alrededor de la muestra 10000, se observa un componente de offset ....	42

<b>Figura 3.7</b> Visualización del efecto de filtrado en la señal .....	43
<b>Figura 3.8</b> Señal derivada del proceso de filtrado, donde se observan los indicadores de estado de canal .....	44
<b>Figura 3.9</b> Esquema de disposición de dispositivo.....	45
<b>Figura 3.10</b> ZeptoSDR utilizado para la implementación del detector .....	45
<b>Figura 3.11</b> Generador vectorial de señales SMU 200A.....	45
<b>Figura 3.12</b> Espectro de frecuencias del receptor. (Izquierda) solamente ruido de canal, (derecha) presencia de señal transmitida a una potencia de -20 dB, (abajo) espectro de frecuencias de presencia de señal transmitida a 0dB .....	46
<b>Figura 3.13</b> Bloques utilizados en el detector en GNUradio .....	47
<b>Figura 3.14</b> Señal de indicadores de cambio de estado y posible ubicación de umbral.....	47
<b>Figura 3.15</b> Indicador resultado de aplicar un umbral.....	48
<b>Figura 4.1</b> Diagrama de flujo de la técnica de obtención de métricas de evaluación del método de identificación del estado de ocupación de canal basado en la transformada de Hilbert .....	51
<b>Figura 4.2</b> Señal compuesta con segmentos de ruido AWGN y señal modulada QPSK a 10 dB SNR.....	52
<b>Figura 4.3</b> Comparación de señal de prueba con distintos niveles de SNR y una modulación 16QAM, (a) 5 dB, (b) 0 dB, (c) -5 dB y (d) -10 dB.....	52
<b>Figura 4.4</b> Algoritmo utilizado para la generación de la señal de prueba .....	53
<b>Figura 4.5</b> Histograma distribución de señales moduladas, (a) 5 dBm, (b) 0 dBm (c) -5 dBm, (d) -10 dBm .....	54
<b>Figura 4.6</b> Curva de probabilidad de acierto con distintos tipos de señales .....	55
<b>Figura 4.7</b> Evaluación del detector utilizando diferentes longitudes de muestras en el filtro.....	56
<b>Figura 4.8</b> Evaluación desincronización de filtro y segmento.....	56
<b>Figura 4.9</b> Acercamiento en la zona de inflexión.....	56
<b>Figura 4.10</b> Implementación del método de detección de estado por variación de fase utilizando GNURadio .....	57
<b>Figura 5.1</b> Evaluación del método con 5000 muestras .....	60
<b>Figura 5.2</b> Pendiente de fase de diferentes señales.....	60

<b>Figura 5.3</b> Evaluación del método con un filtro encajado y diferente número de muestras .....	60
<b>Figura 5.4</b> Evaluación del método con diferente filtro desencajado .....	61
<b>Figura 5.5</b> Indicador y señal estado del canal .....	62

# Resumen

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo desarrollar una técnica de detección espectral que permita identificar si está presente o no una señal de comunicación en un canal. En el contexto de este trabajo, un canal es un rango de frecuencias dentro del espectro radioeléctrico disponible para comunicaciones inalámbricas. Por ejemplo, en el rango de frecuencias utilizado para transmisión de señal de Televisión Abierta, un canal de comunicación corresponde a un rango de frecuencias de 6 MHz en la banda de UHF.

En el paradigma de radio cognitivo se busca mejorar el aprovechamiento espectral principalmente en los momentos donde las bandas de frecuencia no están siendo utilizadas. En primer lugar, dando preferencia a los usuarios que cuentan con licencias de uso exclusivo o usuarios primarios y también respetando su calidad en la transmisión, buscando no interferir en la comunicación de éstos. Detectar de manera precisa el instante de tiempo en el cual un canal de comunicación está desocupado se vuelve crucial al pensar en el funcionamiento del radio cognitivo, es por esto que en esta tesis se desarrolló un método de detección del estado del canal que puede servir en una primera fase de detección espectral dentro de un esquema más sofisticado.

El método de detección de ocupación de canal desarrollado en esta tesis se basa en la transformada Hilbert, mismo que se fundamenta en detectar la densidad de variación de fase de

un determinado número de muestras obtenidas directamente del canal observado. Utilizando la transformada Hilbert, la detección se realiza de manera rápida y sencilla, y se puede complementar con otro detector espectral para garantizar la robustez en la detección.

Hoy en día parece contraintuitivo no utilizar la inteligencia artificial (IA) para desarrollar tecnología, pero de la misma manera que el desarrollo tecnológico está volteando completamente a la IA se convierte de vital importancia rescatar y revisar técnicas y herramientas de procesamiento digital que estarían perdiendo el potencial de solucionar problemas de la actualidad.

Bajo esta premisa se aprovechó la transformada de Hilbert para generar la función analítica que, debido a sus propiedades de ortogonalidad permite discernir entre una señal con ruido o solamente ruido de canal AWGN para decidir sobre el estado de ocupación de un canal de comunicación. Así pues, se presenta el sustento teórico de la transformada de Hilbert y su aplicación al análisis de las muestras de señal de un canal de comunicación, así como su evaluación en la detección del estado del canal con señales moduladas en fase a diferentes niveles de Razón Señal a Ruido (SNR). Se encontró que una técnica de detección basada en la transformada Hilbert cumple con las características de simplicidad necesarias para una implementación práctica en tiempo cuasi real con un desempeño comparable con otros detectores de baja complejidad.

Finalmente se llevó a cabo la implementación en un Radio definido por Software (SDR) y se cumplió con la detección esperada.

Dentro de una sociedad donde la complejidad es la norma, la sencillez es un acto de rebeldía.

# Capítulo 1

## Introducción

Resulta casi imposible pensar en la vida moderna sin la disponibilidad de sistemas de comunicaciones que nos permiten estar en contacto con otras personas, y al mismo tiempo realizar actividades en todos los ámbitos de nuestra vida, desde entretenimiento, trabajo, educación y hasta liberarnos de tareas cotidianas delegándolas a sistemas electrónicos que pueden realizarlas de manera más eficiente.

Los avances tecnológicos han permitido incrementar el alcance, la calidad y cantidad de dispositivos conectados en prácticamente todos los campos de aplicación. Estos avances se traducen en que cada vez son más los usuarios que utilizan servicios de telecomunicaciones. En particular, son los sistemas inalámbricos los que facilitan muchas de las actividades que aprovechan las capacidades de comunicación. Al incrementar la densidad de dispositivos inteligentes en zonas residenciales, así como los requerimientos de los usuarios como lo es el ancho de banda, se vuelven críticos los recursos disponibles, en este caso el espectro radioeléctrico, para lograr una comunicación inalámbrica adecuada en cada servicio que lo requiera, es por esto que dicho espectro se debe aprovechar eficientemente.



En los sistemas inalámbricos, uno de los recursos más preciados es el espectro radioeléctrico requerido para establecer el enlace de comunicación a través de señales radio. Para aprovechar eficientemente el espectro radioeléctrico se han desarrollado distintas técnicas. Una de ellas es el Radio Cognitivo, estrategia que plantea la existencia de una interfaz radio capaz de adaptarse a la disponibilidad de recursos y aprovechar aquellos disponibles en un instante de tiempo determinado para lograr la comunicación. Entre las tareas que realiza el radio cognitivo se encuentra “observar” el espectro radioeléctrico en un proceso denominado “Detección Espectral”. De esta observación se determina, de las bandas de frecuencia existentes, cuáles de ellas están libres para ser utilizadas en un proceso de comunicación.

Se denomina detección de espectro a la acción de medir un rango de frecuencias con la finalidad de encontrar un espacio utilizable (hueco espectral) para la transmisión de información. Los principales retos para la detección de espectro son: Robustez en equipo en el caso de filtros de alto orden ya que para lograr un buen corte en frecuencia estos requieren más componentes físicos; alta velocidad de detección porque los periodos en los que exista un hueco espectral (oportunidad para el uso del espectro) son limitados y se tienen que detectar muy rápido para poder utilizarlos; y baja complejidad computacional en el algoritmo de detección para poder implementarlo en los equipos sin incrementar su costo de fabricación. [1]

Existen diversas técnicas para la detección de espectro, siendo la detección de energía la más utilizada por su simplicidad y buen desempeño general. La detección de energía mide la potencia de la señal recibida y la compara con un umbral. Tiene de ventaja el bajo costo computacional y no requiere conocer características de transporte de la señal a detectar. [2]

Si se conocen las características de la señal a detectar, una de las mejores técnicas de detección es el filtro acoplado. [3]. Éste va cambiando según las necesidades en el dominio de tiempo y frecuencia. Sin embargo, actualmente resulta impráctico en escenarios reales, porque requiere conocer todas las características de la señal para su demodulación.

También existe la detección de características ciclo-estacionarias, ésta explota la naturaleza periódica de las señales moduladas y necesita para la detección de la señal primaria conocer algunas de sus características como son la frecuencia portadora y la frecuencia cíclica. Ésta requiere para una detección confiable un gran número de muestras de datos de la señal. Adicionalmente a esta desventaja, la complejidad computacional de las técnicas de detección espectral basadas en las características ciclo-estacionarias constituye su mayor desventaja. [4]

En la actualidad se ha reportado el uso de la transformada de Hilbert junto con el algoritmo EMD en la denominada Transformada Hilbert Huang (HHT). El algoritmo EMD descompone una señal en funciones de modo intrínseco. Estas funciones permiten analizar eventos ocultos (si es que los hay) en la señal original, que no pueden ser apreciados sin la descomposición. Aunado a esto, al realizar la Transformada Hilbert (HT) a las funciones de modo intrínseco, se obtienen las frecuencias instantáneas obteniendo así un espectro de frecuencia más completo de la señal. [5]

Una ventaja de la HHT es que se obtiene un espectro en el dominio energía- frecuencia- tiempo lo cual ofrece una vista muy amplia del espectro en el dominio del tiempo siendo una candidata para implementar en una red de radio cognitivo sin embargo al emplear una descomposición mediante el algoritmo EMD justo antes de realizar la transformada de Hilbert, aumenta mucho el coste computacional y posiblemente el tiempo de ejecución al llevar más operaciones, lo cual podría generar una lectura muy lenta y desaprovecharía el espectro real. Por esta razón se busca implementar la transformada de Hilbert con un método más sencillo y obtener una lectura en tiempo real.

Las ventajas que se pueden presentar son alta precisión temporal para saber en qué momento está disponible un canal que pueda ser útil ya que puede discernir entre un canal con solamente ruido o un canal ocupado con una señal de comunicación.

A partir de estas ventajas de la HT, se plantea en este trabajo utilizar la función analítica obtenida con la aplicación de la HT en forma directa (sin descomposición en funciones de modo intrínseco) a las muestras obtenidas directamente de un canal de comunicación. Debido a la capacidad de la función analítica de identificar cambios instantáneos de frecuencia, es posible reconocer el momento en que se presenta un cambio en el estado de un canal de comunicación que se está monitoreando siempre y cuando la ventana de observación sea suficiente para observar la variación del canal.

Unos retos que se pueden presentar al implementar un detector de espectro con la HT es que el sistema sea muy sensible a variaciones del entorno que alteren el ruido blanco que se induce en la señal, en otras palabras, que el entorno cambie de tal forma que las variaciones electromagnéticas añadidas a la señal de radio frecuencia reduzca demasiado el SNR y como consecuencia indique una falsa alarma, por otra parte está la cuestión del tiempo, esto es si se implementa en un sistema que involucre otras operaciones que puedan generar carga a un sistema tal como podría ser complementar a la implementación de la transformada de Hilbert seguido de un análisis de Fourier de tal manera que el sistema que procesa los datos no alcance a informar en tiempo real el resultado, en el peor de los escenarios.

## Descripción del problema

La ruta de transmisión en los sistemas de telecomunicaciones sin importar el medio ni la aplicación, se denomina canal. Para efectos de la Detección de Espectro en el contexto del Radio Cognitivo, el canal puede tener dos estados: ocupado o desocupado. Cuando está ocupado se caracteriza por tener una señal mensaje más el ruido del canal, sin embargo, cuando está desocupado el ruido sigue estando presente aún sin señal mensaje.

Considerando que los canales de comunicación inalámbrica se consideran un recurso finito y escaso, existen diferentes propuestas tecnológicas para sobrellevar las limitantes observadas en la cantidad y calidad de los canales de comunicación disponibles. Entre estas propuestas, destaca el radio cognitivo como una estrategia que permitirá utilizar el espectro radioeléctrico disponible, en la forma de canales de comunicación, de una manera eficiente. Para ello, el radio cognitivo propone identificar bandas de frecuencia desocupadas y aprovecharlas en forma oportunista, ya sea cuando el usuario propietario del espectro no lo esté aprovechando, o bien cuando se trate de espectro abierto y ningún otro usuario cognitivo lo utilice. Es por ello que para una adecuada identificación del estado de ocupación de un canal se requieren esquemas de sensado que cumplan con ciertas características. A continuación, se tratará el tema del ruido que afecta los canales de comunicación desde la perspectiva del receptor de radio.

El modelo de ruido que percibe un receptor de comunicación inalámbrico tiene las características de ser aditivo, es decir que se suma a cualquier señal presente, es blanco, lo que significa que tiene una potencia uniforme a lo largo del espectro y es gaussiano, lo que hace que tenga una distribución normal con promedio cero. [6]

Sin embargo, debido a posibles cambios en la temperatura ocasionado por el calentamiento del equipo electrónico, interferencia electromagnética debida a otras señales, incluso factores ambientales como una tormenta eléctrica pueden alterar las propiedades como la potencia del ruido u otra métrica, haciendo que los sistemas de detección no logren estimar correctamente el ruido. Esta característica de no estacionariedad ocasiona que las métricas estadísticas del ruido (varianza) varíen en función del tiempo.

Esta característica de no estacionariedad demanda técnicas que sean capaces de cambiar en el tiempo o adaptarse, según las condiciones. Un aspecto a tener en cuenta es la cualidad de estimar en función del tiempo, esto, porque si se realiza una medición muy lenta, los resultados y por ende la técnica será obsoleta, las características habrán cambiado y el escenario será otro.

Observando los requerimientos para la detección de ruido en un canal, es adecuado mencionar un cambio de paradigma respecto al uso de la transformada de Fourier (FT), que prácticamente ha monopolizado las técnicas de detección de espectro. [7]

Sin embargo aunado a las exigencias actuales en los sistemas de radio como la no-estacionariedad de la potencia de ruido en la práctica, se necesita una técnica que interprete los datos de manera real, es decir con menos suposiciones y limitaciones como los que lidia la FT. En ese aspecto la transformada de Hilbert (HT) parece ser una buena opción. La HT ha demostrado suficiencia para manejar datos no estacionarios, no lineales y con menos muestras representativas de la señal, lo cual tiene sentido al manejar señales no estacionarias. La transformada de Hilbert es una herramienta que permite la obtención de componentes de fase precisos ubicados en el tiempo, y tiene la capacidad de operar con sistemas no lineales y no estacionarios sin perder una interpretación física de los datos. [8]

### **Trabajo relacionado**

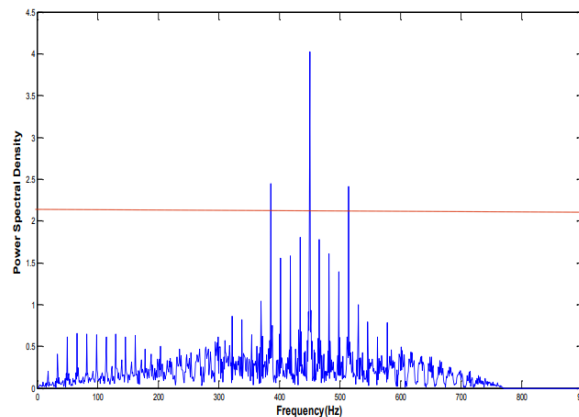
Introduciendo la sección de trabajo relacionado concerniente a este trabajo de tesis se aprecia en [9], que se alude el contexto del esquema de radio cognitivo (CR), así como también se profundiza en describir las técnicas de detección empleadas en este entorno. Aunado a esto también se aborda de manera destacable el concepto de incertidumbre de ruido que enfrentan los detectores de energía aplicados en redes de radio cognitivo, así como se propone reducir los efectos adversos que ésta incertidumbre causa en el desempeño del detector de energía utilizando técnicas de estimación de la potencia de ruido que posibilitan adaptar el umbral de detección del detector sometido a las variaciones en la potencia de ruido a causa de la dinámica del entorno de radio. Los resultados presentados en ese trabajo muestran una reducción de un 17% la tasa total de error para sistemas uni-receptor empleando un detector de energía adaptable (DEA) con respecto a un detector de energía convencional (DEC) cuando el SNR es -10 dB y se utilizan 1000 muestras para la detección. Así como un sistema multi-receptor específicamente 2, presenta una reducción del 52% en promedio en la tasa total de error comparado con el DEC.

A lo largo del desarrollo de la tecnología en torno al radio cognitivo se han ideado diversos métodos para detectar espectro en el entorno de radio cognitivo y un buen trabajo que muestra distintas aproximaciones concernientes a este tema es el presentado en [10], donde se observa una tendencia en el progreso de técnicas de machine learning las cuales sabemos suponen de cierta complejidad computacional para llevarse a cabo. También en [10] se presenta un amplio espectro de técnicas que forman parte de las distintos tipos de detección (detector de energía, filtro acoplado.. etc.) y son clasificadas según

corresponda como de banda ancha o banda angosta. Finalmente se discute acerca de como las redes cognitivas pueden enfrentar los retos futuros.

Ahora, en la línea de machine learning en [11] se muestra una técnica de detección en tiempo real, es decir que tiene la resolución temporal lo suficientemente alta para poder captar los cambios en cada instante de tiempo donde se utiliza una técnica tipo energía específicamente un promedio de periodograma para clasificar los canales según su ocupación (libre u ocupado) a su vez este método es ciego es decir que no requiere de información previa para desempeñar su función mas allá del set de datos con el que se entrenó el algoritmo de machine learning. Se reporta que el algoritmo utilizado converge con un 98.7% de precisión con los datos de entrenamiento. También este trabajo muestra un prototipo llevado a hardware lo cual lo hace candidato a aplicarse en una red de CR.

Otra técnica ciega que involucra la detección de energía es la presentada en [12]. Esta detección de energía se funde con una detección de características cicloestacionarias para así dar lugar a una detección de señales tipo OFDM. Esta detección se logra en dos etapas, donde la primera, que involucra la detección de energía, delimita el espectro que será evaluado en la siguiente etapa, esto comparando la densidad espectral de potencia (DEP) con un umbral calculado con la aproximación de Neyman-Pearson y donde se intersectan estos parámetros (ver figura 1), se procede a extraer las características cicloestacionarias de las señales OFDM sin explorar el espectro completo, logrando así reducir en gran medida el recurso computacional para operar ésta técnica y terminando con un buen desempeño en condiciones de bajo SNR según se reporta.



**Figura 1.1.-** “Donde se cruzan el umbral y la curva de Densidad Espectral de Potencia” [12]

Sobre aplicaciones de la transformada de Hilbert existen técnicas que involucran el espectro de Hilbert para detección espectral como [13] donde se utiliza una técnica llamada transformada de Hilbert-Huang, que es el resultado de utilizar el algoritmo conocido como EMD por sus siglas en inglés y que en español

se llama descomposición de modo empírico seguido del análisis espectral de Hilbert. Básicamente el algoritmo EMD se utiliza para extraer funciones en una señal con unos pocos criterios, cada función extraída se conoce como IMF o función de modo intrínseco, las IMF extraídas contienen componentes de frecuencia que podrán variar en el tiempo y estas son reversibles, es decir que, si se suman todas, se obtendrá la señal original.

Una vez realizada la extracción de las funciones IMF se aplica la transformada de Hilbert en cada una para obtener el espectro de Hilbert y una representación en tiempo- frecuencia- energía. Este tipo de análisis resulta ser muy efectivo ante sistemas no lineales y no estacionarios debida a su naturaleza adaptable. También en [13] se reporta que se logra detectar usuarios primarios con poca potencia o débiles, finalmente se comparó con un algoritmo de machine learning conocido como máquina de soporte vectorial SVM por sus siglas en inglés y se logró 98.7% de precisión al momento de detectar espectro. También se utiliza la transformada de Hilbert en [14] para caracterizar los bordes de las bandas de frecuencia. En este caso se propone un algoritmo que utiliza la respuesta al impulso de la transformada Hilbert para sensar espectro. Básicamente se busca encontrar los límites de la banda de frecuencias utilizada por un usuario primario, para así encontrar huecos espectrales. Se reporta que utilizar la transformada de Hilbert precedida por un filtro de suavizado gaussiano tiene mejor desempeño que el operador Canny para detectar bordes. Finalmente se comenta que ésta técnica presenta una inmunidad al ruido.

Todos estos trabajos coinciden en aportar en el sensado del espectro, sin embargo, estos al ser propuestos en una red de radio cognitivo se prevé que es necesario robustecerlos con otro método de detección para obtener una mejor interpretación del canal de comunicaciones.

Tomar una decisión precisa frecuencial y temporalmente es de suma relevancia al menos en materia ingenieril para aprovechar los huecos espectrales en una implementación adecuada del radio cognitivo entonces, considerando que la detección de espectro es un problema abierto que continúa estudiándose como parte de los sistemas de radio cognitivo así como la velocidad de sensado es relevante para optimizar recursos, en este trabajo se busca desarrollar una técnica de detección de ocupación de canal utilizando la transformada Hilbert.

En este trabajo se propone como **objetivo general**:

Desarrollar un método de detección de espectro que aproveche las prestaciones de la Transformada Hilbert para identificar cambios en el estado del canal a partir del comportamiento de la función analítica, misma que permite observar cambios instantáneos de frecuencia/fase relacionados con los cambios entre el comportamiento de la presencia de señales moduladas en un canal y la presencia solamente de ruido en el mismo.

Para lograr el objetivo planteado, se proponen los siguientes **objetivos particulares**:

- Analizar el desempeño de la técnica denominada Transformada de Hilbert y su potencial para ser utilizada en la detección de espectro
- Analizar el desempeño de la Transformada de Hilbert en la detección de cambios instantáneos en la presencia o ausencia de una señal de comunicación en un canal
- Desarrollar un método de detección de espectro basado en la Transformada de Hilbert
- Analizar el desempeño del método de detección de espectro basado en la Transformada de Hilbert.
- Implementar el método de detección de espectro basado en la Transformada de Hilbert utilizando un sistema de Radio Definido por Software como prueba de concepto.

El resto del documento se organiza de la siguiente manera: el Capítulo 2 presenta conceptos básicos de comunicaciones digitales y comunicaciones inalámbricas necesarios para comprender el contexto del problema de detección espectral, así como aspectos generales de la Transformada Hilbert; el Capítulo 3 presenta el desarrollo de la propuesta de detector espectral basado en la Transformada de Hilbert; el Capítulo 4 muestra los resultados obtenidos al evaluar la técnica de detección de estado de canal basada en la Transformada Hilbert; el Capítulo 5 presenta las Conclusiones y el Trabajo Futuro derivado de la realización de esta tesis; finalmente se muestran las referencias bibliográficas consultadas para la realización de este trabajo.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1 Conceptos de comunicaciones inalámbricas

Para la realización de esta tesis es necesario un conocimiento general de teoría de comunicaciones, en específico aquella relacionada con los conceptos generales de transmisión de señales en sistemas de comunicación inalámbricos. Se presentan a continuación los conceptos básicos necesarios para comprender el desarrollo de este trabajo.

Los sistemas más comunes de comunicación inalámbrica son los teléfonos celulares y los satélites. Estos sistemas de comunicación cuentan con los mismos elementos generales que cualquier otro, pero con la tarea específica de intercambiar información a distancia sin utilizar cables. Los elementos básicos que conforman estos sistemas son:

- Emisor: Puede estar constituido por diversos componentes, sin embargo, la labor del conjunto es encargarse de preparar la señal y difundirla a través de una antena.
- Receptor: También puede estar conformado de una gran cantidad de sub elementos,



encargados de captar la señal por medio de una antena.

- Canal: El canal de comunicación que utilizan los sistemas inalámbricos es el aire por medio de ondas electromagnéticas que se propagan en éste utilizando una porción del espectro de radiofrecuencia.

El espectro de radiofrecuencias también llamado espectro electromagnético, es el conjunto de frecuencias posibles en las que se manifiesta radiación electromagnética [15]. El rango teórico de frecuencias puede ir desde 0 hasta infinito. Interpretando el 0 como un evento que no está oscilando, y el infinito porque teóricamente se puede acortar la longitud de onda llegando hasta la longitud de Planck, misma longitud donde al traspasarla, aparentemente los fenómenos físicos afectan de manera diferente, esto porque el espacio deja de actuar de manera clásica.

A lo largo del espectro de frecuencias éste se puede segmentar de forma abstracta de tal manera que la distribución de frecuencias en él, conocido como ancho de banda, sea lo suficientemente grande según las necesidades de un sistema de comunicación inalámbrico y se pueda utilizar dichos segmentos para poder transmitir comunicaciones por radio. Estos segmentos también conocidos como bandas múltiples de frecuencia se dividen de manera simbólica según sus características ya sea por su longitud de onda o por su frecuencia, recordando que son inversamente proporcionales.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$\lambda$  : Longitud de onda en m

$c$  : constante de velocidad de la luz en el vacío en m/seg

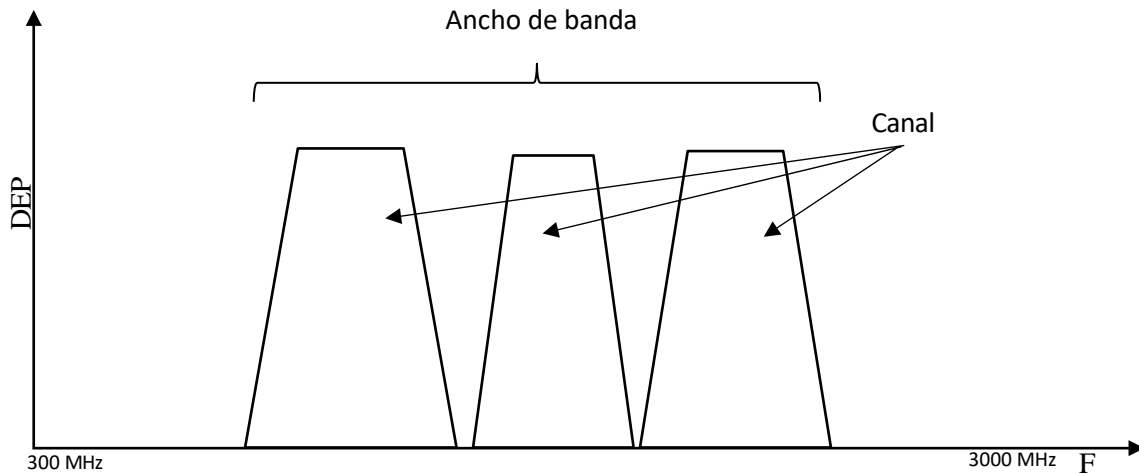
$f$  : frecuencia en Hz.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés) que se encarga de regular las telecomunicaciones de manera internacional, ha asignado los segmentos del espectro de radiofrecuencia para diferentes usos de acuerdo a las distintas propiedades de las ondas.

**Tabla 1.-** “Bandas de radiofrecuencia. Se aprecian las siglas comúnmente utilizadas. Frecuencias por encima de la banda EHF se denominan frecuencias de microondas.” [16]

Número	Nombre	Abreviatura	Frecuencias	Longitud de onda
0	Extra baja frecuencia	ELF	.3-3 Hz	1000 000 – 100 000 km
1	Extra baja frecuencia	ELF	3-30 Hz	100 000 – 10 000 km
2	Extra baja frecuencia	ELF	30-300 Hz	10 000-1000 km
3	Ultra baja frecuencia	ULF	300-3000	1000-100 km
4	Muy baja frecuencia	VLF	3-30 kHz	100-10 km
5	Baja frecuencia	LF	30-300 kHz	10-1 km
6	Media frecuencia	MF	300-3000 kHz	1 km-100 m
7	Alta frecuencia	HF	3-3 MHz	100-10 m
8	Muy alta frecuencia	VHF	30-300 MHz	10-1 m
9	Ultra alta frecuencia	UHF	300-3000 MHz	1 m – 100 mm
10	Super alta frecuencia	SHF	3-30 GHz	100-10 mm
11	Extra alta frecuencia	EHF	30-300 GHz	10-1 mm

Una de las bandas más utilizadas por los sistemas de comunicación es la UHF, y esta se segmenta aún más para dar lugar a los canales de comunicación. Ver figura 2.1

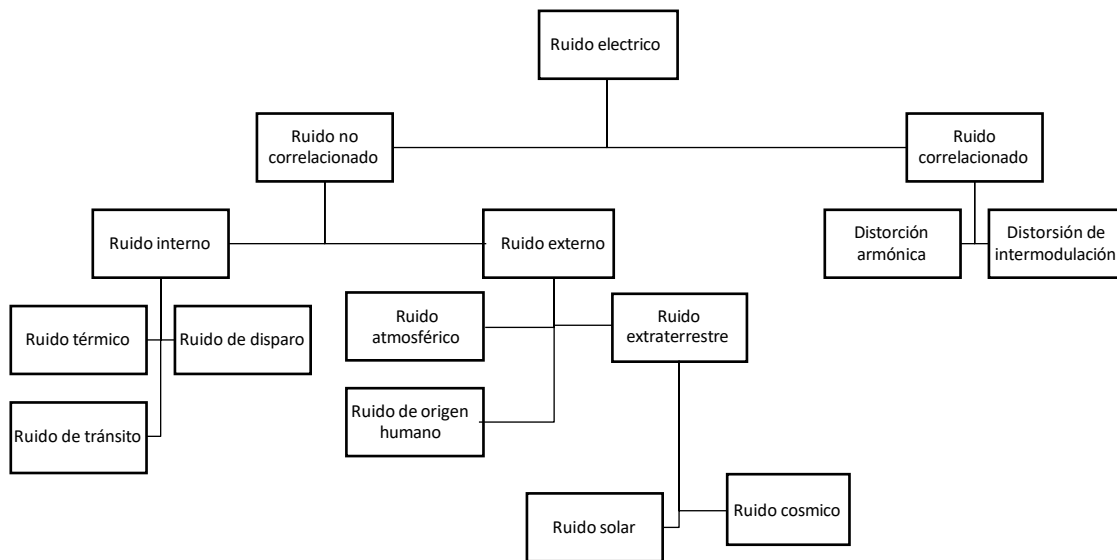


**Figura 2.1.-** “Segmentación del ancho de banda en canales útiles de comunicación”

Esta banda concentra la mayoría de los servicios de radio comunicación debido a sus características de propagación. [17] Estos canales organizados de acuerdo al tipo de sistema o estándar de comunicación, es el espectro en el que el receptor y el transmisor van a trabajar conjuntamente en el intercambio de información a través de señales que pueden verse afectadas por interferencias.

La interferencia más habitual en un canal de telecomunicación es el ruido. Este ruido puede definirse como cualquier tipo de señal eléctrica no deseada presente en la banda de frecuencias de la señal de información. [18]

El ruido electromagnético es una señal o un conjunto de señales indeseables de naturaleza aleatoria que se suma a la señal de información y que pueden ser la causa de algunos problemas en la comunicación, como por ejemplo que la señal recibida pierda calidad suficiente para dejar de ser recibida correctamente. Debido a la posible relación del ruido consigo mismo o con la señal mensaje, éste se puede clasificar distinguiendo entre diferentes tipos, ver figura 2.2.



**Figura 2.2.-** “Árbol taxonómico del ruido eléctrico, se muestra la clasificación según origen del ruido eléctrico” [19]

- Ruido correlacionado: Se manifiesta en presencia de la señal mensaje.
- Ruido no correlacionado: Este se puede presentar en el sistema aún con la inexistencia de la señal de comunicación. Por motivo de su naturaleza en este trabajo se ahondará en el ruido no correlacionado mismo que a su vez, teniendo en cuenta su origen, se puede subdividir en:
  - o Ruido externo tiene su origen fuera del medio, circuito o elementos que conforman el procesado de las señales y específicamente se puede identificar en función de la causa generadora las cuales son:

- Ruido atmosférico, coloquialmente conocido como electricidad estática, se debe a perturbaciones eléctricas en la atmosfera terrestre de manera natural, por ejemplo, las tormentas eléctricas.
- Ruido de origen humano: También llamado ruido industrial, dado que ahí es donde tiene su principal origen, puesto que la actividad industrial consta de diversos elementos que producen chispas como motores eléctricos, variadores de velocidad, conmutadores de ignición entre otros.
- Ruido extraterrestre: este tipo de ruido se caracteriza por tener el origen fuera de la atmosfera terrestre, donde los principales influyentes son las galaxias, el sol y la misma vía láctea. Este tipo de ruido se puede dividir en dos tipos, ruido solar y ruido cósmico.
  - El ruido solar: tiene una magnitud no estacionaria, en parte porque el sol la produce de manera constante cuando el sol está en calma, y otra cuando el sol genera perturbaciones de vez en cuando que genera radiación y se suma a la anterior.
  - El ruido cósmico: Este tiene de origen las distintas galaxias distribuidas en el espacio exterior, dada la distancia extremadamente grande entre unas y otras, este ruido tiene una intensidad relativamente menor y una distribución bastante uniforme.
- Según el origen, se puede clasificar de la siguiente manera:

Ruido interno: el cual tiene el origen en el medio de transmisión, en dispositivos de transmisión o en la circuitería de procesamiento de las señales, este tipo de ruido puede clasificarse en tres tipos:

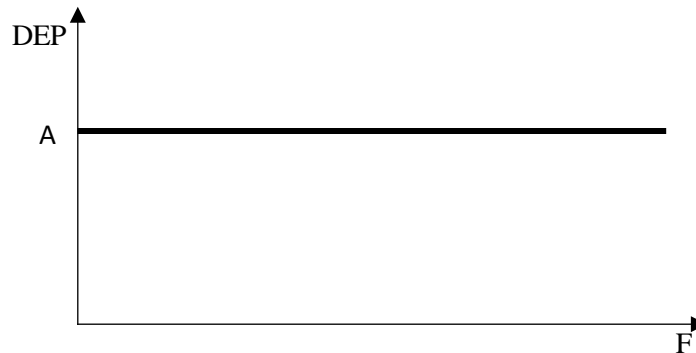
- Ruido de disparo: Este tipo de ruido está presente en componentes activos de circuitería electrónica como pueden ser válvulas termoiónicas, transistores o amplificadores. Al ser consecuencia del flujo aleatorio de electrones y huecos a la salida de los dispositivos, el comportamiento de la magnitud de este ruido así como de algunos otros dentro de esta taxonomía es de manera aleatoria.
- Ruido de tránsito: el ruido de tránsito se produce cuando existen variaciones de corriente durante el recorrido que hacen los electrones en ciertos dispositivos como el transistor, por ejemplo.
- Ruido térmico: Este tipo de ruido se debe a la agitación de manera browniana de los electrones libres encargados de la conducción eléctrica que forman parte de la materia presente involucrada en el sistema de comunicación.

Un sistema de telecomunicaciones está expuesto a todos estos tipos de ruido en diferentes etapas de la transmisión, y por esto, el ruido en sí se modela básicamente como Ruido Blanco Aditivo Gaussiano (AWGN por sus siglas en inglés). A continuación, se aclararán cada una de estas palabras asociadas al modelo:

*Aditivo:* Tal y como su nombre lo indica, esta propiedad tiene de característica que se agrega ruido a la señal de información. Se puede decir que la señal que se recibe  $g(t)$  es equivalente a la señal que se transmite  $f(t)$  más una señal de ruido  $r(t)$  :

$$g(t) = f(t) + r(t)$$

*Blanco:* El nombre hace referencia a la combinación de frecuencias de todos los colores visibles, así el resultado sería blanco, análogamente, la idea refiere a la propiedad de tener la misma potencia en todas las frecuencias, como se muestra en la Figura 2.3.

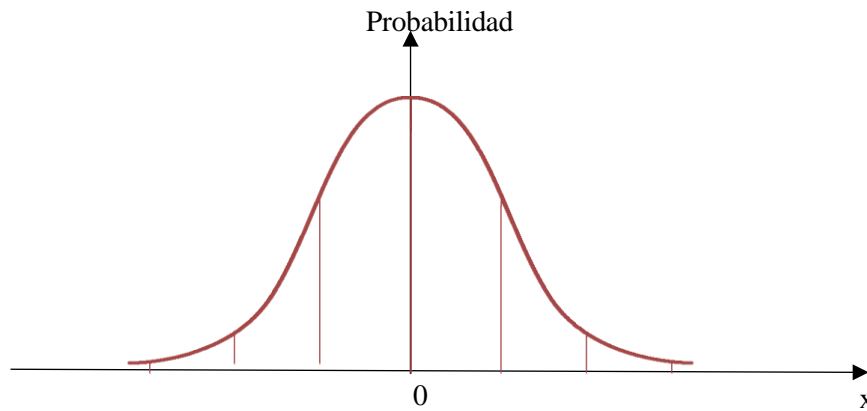


**Figura 2.3.-** “Distribución de potencia en el dominio de las frecuencias ejemplificando el ruido blanco ”

*Gaussiano:* Esta propiedad da el nombre al comportamiento de la distribución de probabilidad, esto debido a la naturaleza aleatoria de la fuente. Tiene un promedio cero y está definida como sigue:

$$\begin{aligned} \Phi_{\mu,\sigma^2}(x) &= \int_{-\infty}^x \varphi_{\mu,\sigma^2}(u) du \\ &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} du, x \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

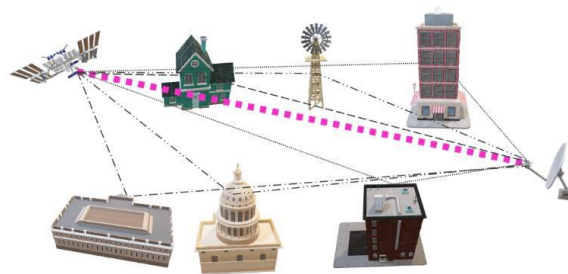
Donde  $\mu$  es la media,  $\sigma$  es la desviación estándar o típica,  $\sigma^2$  es la varianza,  $\varphi$  representa la función de densidad de probabilidad, como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4.-** “Distribución de probabilidad en forma de campana”

Las señales utilizadas en los sistemas de comunicación inalámbricas están regidas por los principios físicos descritos para las ondas electromagnéticas (OEM). De manera general se pueden resumir a aquellas que no necesitan un medio físico para la propagación, sino que pueden propagarse ya sea en el vacío o en un medio material, también es destacable que en el vacío la velocidad de propagación de la luz es de 300,000,000 metros por segundo, sin embargo, el medio de propagación de señales de comunicación como ondas electromagnéticas en la vida cotidiana va a estar más relacionado al aire que al vacío, lo que en fines prácticos sigue siendo un valor de velocidad muy cercano al del vacío. Esta velocidad es casi la misma porque las OEM se ven afectadas por la densidad del medio y el aire justamente tiene una densidad muy baja.

Aunado a esto la señal puede viajar en el aire por distintas trayectorias y llegar al destino por más de un camino diferente, encontrándose en el camino edificios, árboles o algún otro objeto que haga que la onda se refleje. Ver figura 2.5.



**Figura 2.5.-** “Propagación multitrayectoria, se observan distintos caminos que puede tomar una señal en llegar a su destino”

Conociendo las distintas maneras en las que la señal puede sufrir alteraciones, la técnica de modulación permite robustecer un poco la resistencia contra interferencias. Sin embargo, el principal factor por el que la modulación es un concepto relevante es que permite optimizar el ancho de banda que ofrecen los canales.

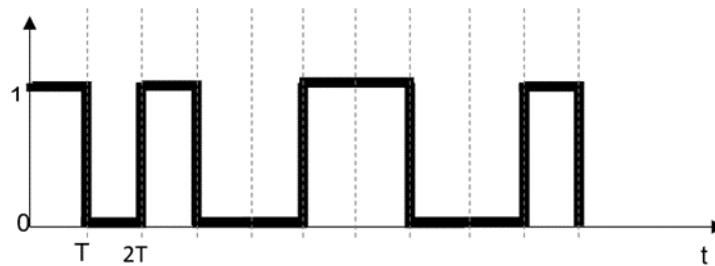
El proceso de modulación modifica las características de una señal analógica, conocida como señal portadora, empleando para ello una señal de información conocida como señal moduladora que lleva consigo la información que deseamos transmitir y es conveniente para ser transmitida por el medio físico de comunicación. [19]

Entendiendo que la modulación soluciona el problema de la transmisión de distintos emisores en banda base, por ejemplo, distintas emisoras de radio, desplazando el espectro de frecuencias correspondiente a una banda de frecuencias más elevada, se profundizará a continuación la descripción de las técnicas de modulación digital debido a que son las utilizadas por los sistemas de telecomunicaciones que intervienen en este documento.

Una modulación digital a diferencia de una modulación analógica es el proceso en el que la información digital altera algún parámetro de una señal portadora analógica, que es la que finalmente se transmite por el medio. La información digital juega un papel principal para comprender este tipo de modulación, en el aspecto de que una señal digital binaria común (Eq.3) como podría ser procedente por ejemplo de un computador, posee un ancho de banda que en teoría es infinito. Esto se considera así porque incluye un cambio de estado instantáneo, también incluye momentos donde la señal en función del tiempo es sostenida produciendo una componente de frecuencia cero. Figura 2.6.

$$d(n) = \begin{cases} 1 & n \geq \frac{T}{2} \\ 0 & n < \frac{T}{2} \end{cases} \quad \text{eq(3)}$$





**Figura 2.6.-** “Representación de una señal digital”

Transmitir ondas casi cuadradas sería ineficiente dado que se requeriría de todo el ancho de banda disponible en el medio de comunicación y no sería posible contar con transmisores ni tasas de transmisión como las hay hoy en día. Para paliar eso se utilizan portadoras analógicas que son modificadas en alguno de sus parámetros para propagarse por el espectro radioeléctrico o por otro medio.

Las ondas senoidales se pueden variar en 3 parámetros que son amplitud, frecuencia y fase, y estos son los que las señales digitales alteran para dar paso a las siguientes modulaciones.

### **Modulación ASK**

La modulación por desplazamiento de amplitud es una modulación en amplitud en la que los datos de información digital modifican la magnitud de una señal portadora analógica cuya frecuencia y fase se mantienen constantes.

### **Modulación FSK**

En la frequency shift keying (FSK) o modulación por desplazamiento de frecuencia, la señal digital de información  $i(t)$  modula la frecuencia de la portadora. Es decir, se utiliza una frecuencia de portadora distinta por cada símbolo.

## Modulación PSK

Phase Shift Keying (PSK) o modulación por desplazamiento de fase es una modulación angular que emplea una fase distinta por cada símbolo de la señal de información moduladora.

Así por ejemplo si tenemos una señal de información binaria, podríamos emplear un desfase de 180 grados entre los dos símbolos, quedando la señal psk de la siguiente forma:

$$ps(t) = \begin{cases} A\cos(\omega t) & \text{si } i(t) = 1 \text{ binario} \\ A\cos(\omega t + \pi) & \text{si } i(t) = 0 \text{ binario} \end{cases}$$

Con respecto a los anteriores esquemas de modulación, existen esquemas de modulación digital más complejos que se complementan con una codificación y que tienen la característica de incrementar la capacidad de transmitir información sin que el ancho de banda necesario también se incremente.

Por ejemplo, existen los esquemas de modulación en cuadratura, en los que se utiliza como portadoras las funciones seno y coseno de manera simultánea. Esto es así porque resulta muy sencillo separar la información en cada una de ellas ya que estas dos funciones son ortogonales.

Al momento de utilizar dos portadoras de manera simultánea, es posible incrementar la velocidad de transmisión al doble sin que se vea incrementado el ancho de banda de la señal ni la probabilidad de error.

## Modulación en cuadratura

La modulación en cuadratura digital es la técnica de utilizar como portadoras una función seno y una función coseno simultáneamente. Se puede utilizar el esquema de modulación en cuadratura a cualquiera de los sistemas de modulación digital vistos con anterioridad de tal forma que se puede tener por ejemplo modulaciones QASK, es decir modulación ASK en cuadratura, QFSK, que es la modulación FSK en cuadratura o modulación QPSK que no es más que la modulación PSK en cuadratura.

## Modulación QPSK

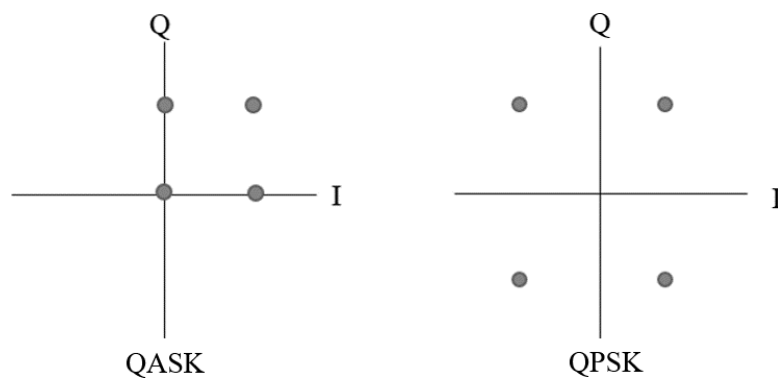
Ahora se hablará de la modulación QPSK, debido a que es la que cuenta con un cambio de fase en cada forma de onda, es decir, en cada símbolo. En esta técnica de modulación se aprovecha la relación de las funciones seno y coseno, así como su ortogonalidad que es justamente la cuadratura que existe entre ellas.

De la misma manera que la modulación PSK en QPSK la información deseada se encuentra en los cambios de fase de la señal que funge como portadora, en este caso la fase puede tomar 4 posibles valores equidistantes.

Dentro del esquema de modulación está implícita una codificación de dos bits por cada fase distinta. Ver tabla 2.1.

**Tabla 2.1.-** " Ejemplo de asignación de valores típicos de fase, así como también de la codificación Gray para cada símbolo en el esquema de modulación QPSK"

Símbolo	Fase	bits
<b>S1</b>	$\frac{\pi}{4}$	<b>10</b>
<b>S2</b>	$\frac{3\pi}{4}$	<b>00</b>
<b>S3</b>	$\frac{5\pi}{4}$	<b>01</b>
<b>S4</b>	$\frac{7\pi}{4}$	<b>11</b>



**Figura 2.7.-** "Diagrama de constelación de modulaciones en cuadratura"

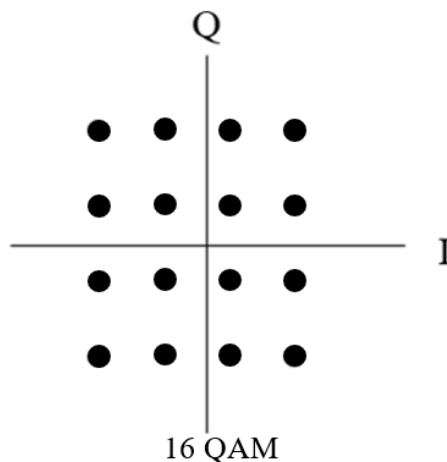
## Modulación con codificación multinivel

En modulación con codificación multinivel la señal de información digital es codificada utilizando  $2^n$  símbolos posibles. Siendo  $n$  el número de bit de transferencia por símbolo.

Un esquema que utiliza la técnica de modulación en cuadratura y a la vez la codificación multinivel es la llamada modulación de amplitud en cuadratura (Quadrature Amplitud Modulation) QAM.

La modulación de amplitud en cuadratura QAM, se basa en modular mediante la técnica ASK de manera independiente dos señales portadoras que están desfasadas  $90^\circ$  entre sí y que poseen la misma frecuencia. La señal QAM se obtiene de sumar las señales ASK, lo cual es posible, ya que sus componentes pueden operar en el mismo canal porque justamente están en cuadratura. La información codificada existirá tanto en los cambios de amplitud y los cambios de fase de la señal.

Los modelos más usados son las técnicas llamadas 16QAM y 32QAM donde se utilizan 16 y 32 estados respectivamente, sin embargo, la tecnología ha llevado a sobre pasar estas cantidades de estados utilizando señales de hasta 4096 símbolos QAM [20]. El diagrama de constelación de la modulación QAM es la mezcla de los diagramas de constelación individual de las modulaciones ASK y PSK. Ver figura 2.8.



**Figura 2.8.-** “Diagrama de constelación 16 QAM”

## **2.2 Subutilización de espectro**

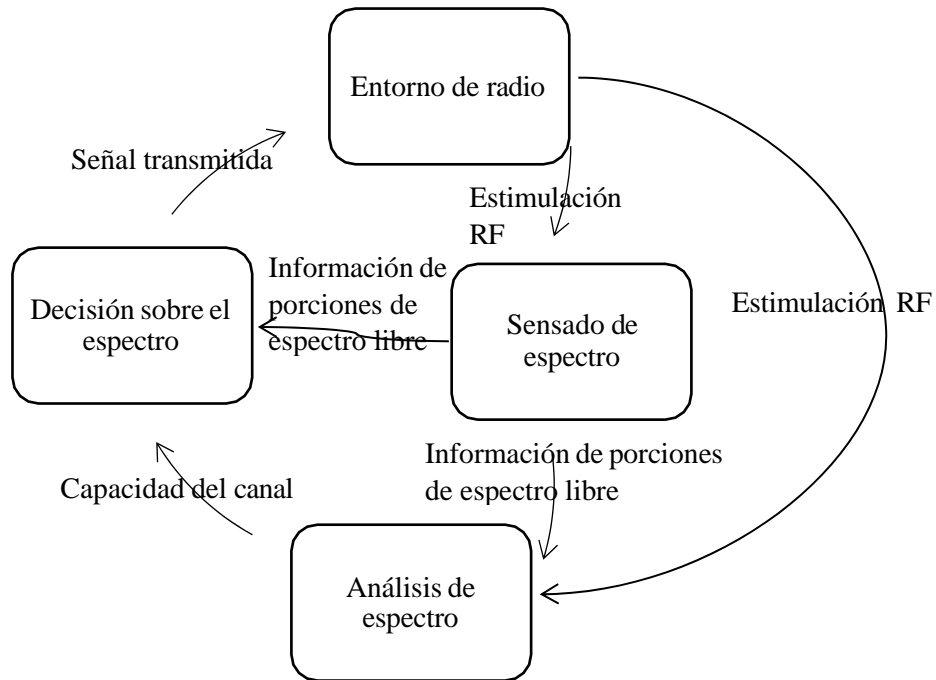
Según la comisión federal de comunicaciones de los Estados Unidos (FCC) y las mediciones que realizaron en algunas ciudades importantes [21], ciertas porciones del espectro de radio permanecen sin utilizar durante periodos de tiempo considerables. Esto significa que el uso de las bandas de frecuencia o la transmisión y recepción de datos es de manera intermitente, de tal forma que el canal queda desaprovechado, dando así lugar a la búsqueda de técnicas de aprovechamiento del espectro para incrementar la eficiencia de los sistemas de comunicación que pudiesen utilizar este recurso subutilizado.

### **Radio Cognitivo**

Algunas de las propuestas para atacar esta subutilización del espectro son el Software Defined Radio (SDR) y el cognitive Radio (CR) ambos términos acuñados por Joseph Mitola.[22]

SDR es un sistema de radio en el que su operación está categóricamente definida por software y cuyo comportamiento tiene que verse alterado mediante los cambios en dicho software. [23]. Por otra parte, según la FCC [24] un radio cognitivo es un radio que puede cambiar sus parámetros de transmisión basado en la interacción con el entorno en el que opera. De esta manera, un radio cognitivo tendrá la tecnología necesaria para leer la información y los cambios en su ambiente, así como para variar de manera dinámica distintos parámetros con respecto a estos cambios en el entorno.

Los modelos cognitivos propuestos pueden ser muy diversos los unos a los otros sin embargo la estructura general es la misma. Las etapas que se requiere para operar de manera cognitiva son las mostradas en el Figura 2.9.

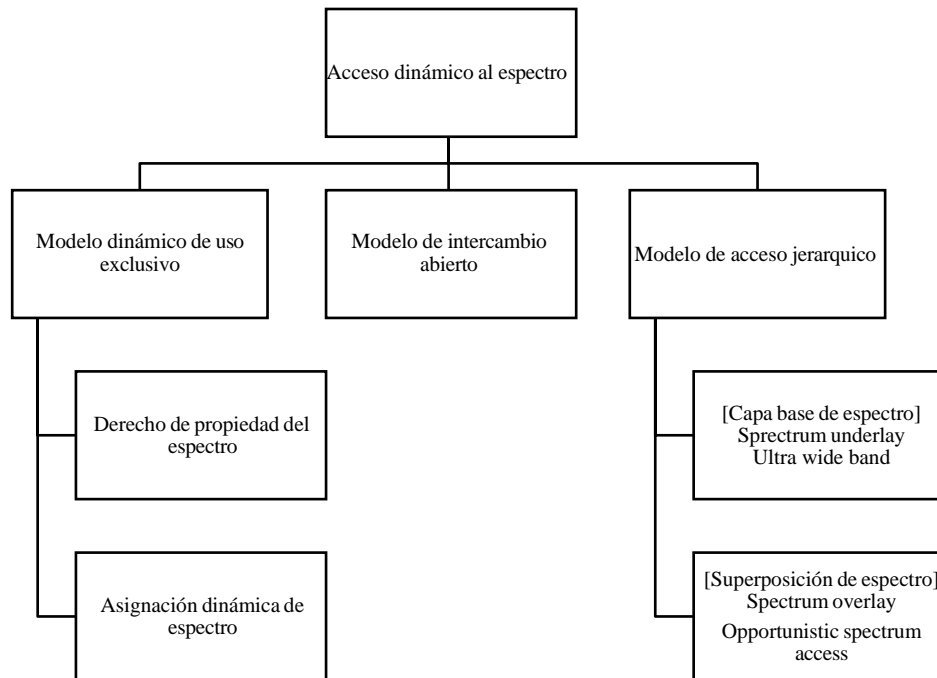


**Figura 2.9** “Etapas del flujo de entorno cognoscitivo” [23]

Según [23] la etapa de sensado de espectro es la que afronta las mayores dificultades técnicas, y esto puede entenderse porque es el primer contacto del sistema de radio con el entorno y debe realizarse correctamente, ya que de errar en esta etapa con un mal sensado, acarreará datos imprecisos desde el inicio.

Con respecto a las etapas de análisis de espectro y decisión sobre el espectro, destacan técnicas de acceso dinámico de espectro (25), las cuales se definen de manera general, como el procedimiento empleado para obtener acceso al espectro de frecuencias necesario para la transmisión de manera activa (dinámica).

Como se comentó anteriormente, la etapa que parece ser más crítica en el proceso de radio cognitivo es una etapa de sensado y detección del espectro, en la actualidad existen técnicas de detección muy diversas, así como lo son sus rendimientos en la efectividad de detección y sus diferentes requisitos para operar.



**Figura 2.10** “Taxonomía del acceso dinámico al espectro” [25]

### **Tipos de radios cognitivos**

Desde que se planteó han existido diversas propuestas de radio cognitivos con diferentes características. [26] Adapt4 XG1, Corvus, KNOWS, CORTEKS, Spectrum pooling [27]. Como se comentó anteriormente, la etapa que parece ser más crítica en el proceso de radio cognitivo es una etapa de sensado y detección del espectro. En la actualidad existen técnicas de detección muy diversas así como lo son sus rendimientos en la efectividad de detección y también cuentan con diferentes requisitos para operar.

### **Técnicas de detección**

Los sistemas de detección involucran fundamentalmente tres tipos de técnicas de detección básicas, de las cuales, emergen técnicas más complejas y elaboradas. Las técnicas básicas son:

#### **Detección de energía**

La detección de energía (DE) consiste en calcular la energía dentro de un ancho de banda, después comparar esa energía con un umbral y decidir si existe o no presencia de usuario

primario. Llevar a cabo este algoritmo depende en mayor medida de la sensibilidad del sistema detector, esto debido a que la técnica incluye un umbral de energía, el cual, de ser sobre pasado con la energía de la señal, lleva a la conclusión de que el canal está ocupado. Siguiendo las siguientes consideraciones:

$$H_0\{ x[n] = w[n]$$

$$H_1\{ x[n] = s[n] + w[n]$$

Siendo  $n$  el índice de muestra,  $H_0$  y  $H_1$  las hipótesis de ausencia de señal y presencia de señal respectivamente.  $w[n]$  es la función correspondiente al ruido, y  $s[n]$  la señal buscada. Entonces el sistema tomará una hipótesis de acuerdo a:

$$\begin{cases} H_0 & \text{si } \varepsilon < v \\ H_1 & \text{si } \varepsilon > v \end{cases}$$

Donde  $\varepsilon$  es igual a la energía estimada al recibir la señal. Y  $v$  es la varianza del ruido. [28] Como esta técnica no requiere de alguna o ninguna información sobre las características de la señal, se considera ciega o semi ciega.

### **Detección con filtro acoplado**

Esta técnica está catalogada como “basada en información” ya que involucra conocer las características de la señal a detectar, lo que hace que su complejidad aumente, con respecto a técnicas como el DE sin embargo, es el método óptimo si se conoce la señal a detectar porque maximiza la relación señal- ruido (SNR) y requiere un menor tiempo de procesamiento. Básicamente esta técnica correlaciona la señal con una copia de la misma para lograr detectar si la señal está presente en la recepción.

### **Características ciclo estacionaria**

Para detectar con este tipo de técnica la presencia de usuarios primarios, se explota la naturaleza periódica de las señales moduladas, es decir, que las señales con cambios repetitivos portan información lo cual hace que sea muy diferente del ruido. En este caso, durante periodos iguales de tiempo existen cambios consecutivos los cuales pueden ser: cambios de símbolo a cierta velocidad ocasionados por una modulación previa.



Las características cicloestacionarias permiten a un CR detectar de mejor manera una señal, tanto es así, que las características cicloestacionarias se pueden inducir a una señal de manera intencional para que sea mejor detectada. [29]

De esta forma las técnicas de detección involucran distintos mecanismos para detectar, desde elevar al cuadrado el módulo (energía) hasta procesamiento más complejo que involucra inteligencia artificial pasando por filtro acoplado y características ciclo estacionarias entre otros. Utilizar técnicas modulares que se complementen entre sí y agreguen robustez a un sistema de detección es necesario para implementar un radio cognitivo. Un método que aparentemente permite detectar la presencia de señal primaria con características de modulación en fase, involucra la transformada de Hilbert.

### 2.3 Transformada de Hilbert

Observando la amplia gama de técnicas utilizadas en la detección como se ve en [29] y teniendo en cuenta la complejidad que se requiere para llevar a cabo exitosamente la etapa de detección de espectro, se puede reflexionar en técnicas que pueden coexistir con otras en un sistema de detección de espectro, sin esperar que una sola técnica resuelva el problema, sino que varias se complementen para llevar a cabo la tarea, pudiendo ser que cada técnica obtenga información para completar las características de la señal real. De esta forma, se plantea el uso de un método de detección de estado de ocupación de un canal en el que se involucra la Transformada Hilbert de manera fundamental.

La transformada de Hilbert (TH) está definida de tal forma que:

$$\mathcal{H}\{x(t)\} = \hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau$$

Definida como una transformación integral, lineal, donde se toma el valor principal de Cauchy debido a la singularidad  $t = \tau$ . Así  $\hat{x}(t)$  es la integral de convolución de  $x(t)$  con

$$\frac{1}{\pi t}. [16]$$

$$\hat{x}(t) = x(t) * \frac{1}{\pi t}$$

Es una herramienta matemática que permite describir la envolvente compleja de una señal real, así como también es utilizada para crear un desfase en una señal. Ésta transformada tiene propiedades convenientes en el procesamiento de señales tal y como son:

- Linealidad:

$$\mathcal{H}\{ax(t) + by(t)\} = a\hat{x}(t) + b\hat{y}(t)$$

- La transformada Hilbert de una transformada Hilbert es la señal original con el signo negativo:

$$\mathcal{H}\{\mathcal{H}\{x(t)\}\} = -x(t)$$

- Si  $x(t)$  es par entonces  $\hat{x}(t)$  será impar, y viceversa.
- Una señal y su transformada de Hilbert son ortogonales.
- La transformada de Hilbert de una constante es cero.

En este caso la HT es relevante porque con una señal desfasada ortogonal y la señal original se puede crear la señal analítica para procesamiento digital.

### Señal analítica

La señal analítica se puede obtener con la Transformada Hilbert y está conformada de la siguiente manera:

$$s(t) = x(t) + i\hat{x}(t)$$

Donde  $x(t)$  es la señal original y  $\hat{x}(t)$  es la señal transformada. Según [30] la señal analítica fue propuesta por primera vez por Denis Gabor definiendo una generalización de la ecuación de Euler.

$$e^{iz} = \cos(z) + i\sin(z)$$

Esta función tiene la propiedad de eliminar las componentes de frecuencia negativas, así como la capacidad de obtener una frecuencia instantánea.

### Obtención de fase y frecuencia instantánea

Fase Instantánea: Aprovechando el desfase en cuadratura obtenido de la transformada de Hilbert se puede calcular la fase de la señal en un instante de tiempo, es decir:

$$\varphi_{inst} = \omega t + \varphi(t)$$

$$\omega t = 2\pi f_c t$$

Siendo  $f_c$  la frecuencia

Así, frecuencia instantánea  $\omega_i$  será la derivada con respecto al tiempo de la fase instantánea:

$$\omega_i = \frac{d}{dt} (\omega_c t + \varphi(t))$$

$$\omega_i = \omega_c + \frac{d}{dt} \varphi(t)$$

De esta manera, quedan expuestos los conceptos de frecuencia instantánea y fase instantánea, donde, no son más que la frecuencia y la fase respectivamente, para un instante de tiempo concreto.

Sin embargo, analizar físicamente la razón de cambio de la componente angular de las señales puede caer en terrenos abstractos. La posibilidad de realizar esto parece ser el sinodal para ir más allá, y dentro de estas abstracciones se introduce un modelo de detección con la transformada de Hilbert que utiliza la razón de cambio angular de las señales moduladas en fase para detectar su presencia en los canales, lo cual pareciera que por la naturaleza de la técnica ésta es un híbrido entre las técnicas de detección de energía y características cicloestacionarias, puesto que habría que hacer un consenso sobre qué es la razón de cambio angular de una señal sino es energía, así como de que al provenir de señales moduladas en fase se considera que poseen propiedades cicloestacionarias. Sin embargo, esto no se demuestra en este trabajo considerando como un trabajo de mayor profundidad poder comprobar estas interpretaciones del comportamiento de las señales y su análisis utilizando la Transformada de Hilbert.

# Capítulo 3

## Desarrollo

La génesis del presente proyecto fue la posibilidad de utilizar la descomposición de modo empírico (EMD) que se realiza en el proceso de la llamada Transformada Hilbert Huang (HHT), para identificar la presencia de señales distintas al ruido en un conjunto de muestras de señal capturadas directamente de un canal de comunicación. Es por ello que, partiendo de esta idea, se investigó primero el proceso de la HHT evaluando el contenido de cada una de las funciones de modo intrínseco (IMF) obtenidas por el proceso de descomposición. A continuación se describen estos procesos.

En general el cálculo de la Transformada Hilbert Huang (HHT) se divide en dos etapas. La primera, utiliza el algoritmo de descomposición de modo empírico (EMD) para separar las funciones de modo intrínseco (IMF). La segunda etapa consiste en aplicar el análisis espectral de Hilbert a las funciones IMF, y así obtener una frecuencia instantánea.

A consecuencia de las cualidades de la HHT parece idóneo aplicarla al fenómeno del ruido. Sin embargo parece pertinente mencionar, que la transformada de Hilbert-Huang debido al proceso de descomposición tiende a ser más costoso computacionalmente, en comparación a una transformada de

Fourier, lo cual puede ser crítico en la velocidad de implementación y procesamiento, pero, observando el increíble crecimiento de la capacidad de procesamiento y cómputo de los últimos años, parece ser viable implementar una detección de espectro utilizando la transformada Hilbert-Huang.

En el procesamiento de señales ha reinado como herramienta de análisis espectral la Transformada de Fourier. El cual permite expresar una función periódica mediante una suma infinita de senos y cosenos por medio de la serie de Fourier, también por medio de la transformada de Fourier se puede observar la distribución espectral de potencia. Este análisis suele ser suficiente en múltiples casos incluso suficiente en algunas áreas de conocimiento, sin embargo, debido a su naturaleza, la transformada de Fourier queda vulnerable al tratar con sistemas no lineales y no estacionarios, campo donde la transformada de Hilbert se ha mostrado más efectiva.

La transformada Hilbert Huang se conforma de la descomposición de modos empíricos (EMD) y el espectro de Hilbert. Utilizando esta técnica se puede obtener la frecuencia instantánea, razón por la cual la HHT se distingue entre otras transformadas.

La transformada de Fourier (TF) es una de las herramientas para el análisis de señales más poderosas en la actualidad, debido a su versatilidad es capaz de realizar su transformación en muchas señales. La TF permite observar el espectro de frecuencias de una señal, pero no permite saber en qué posición temporal están estas frecuencias.

En el análisis de Fourier se hacen suposiciones de las señales con respecto a su comportamiento en el tiempo, básicamente es decir que la señal tiene que ser lineal y periódica en el tiempo, lo cual limita mucho la aplicación de análisis a representaciones de fenómenos físicos.

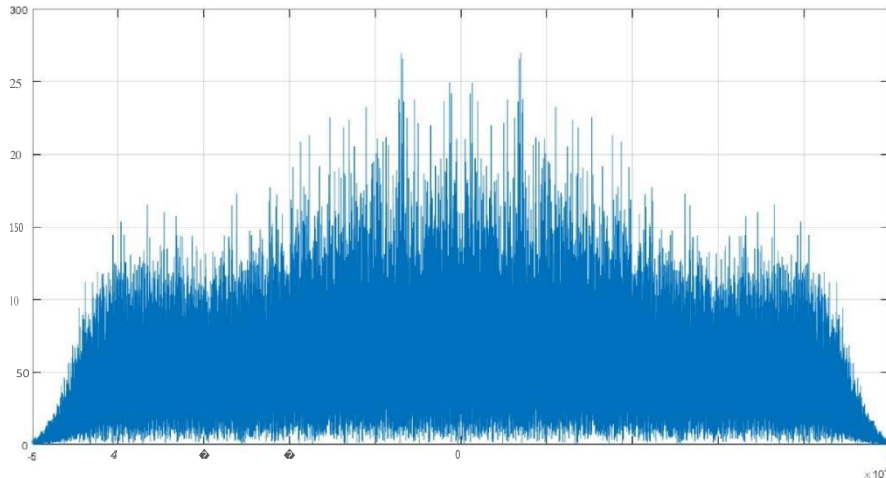
El objetivo del método EMD es descomponer una señal no lineal y no estacionaria multicomponente en una suma de diferentes señales mono componentes denominadas Funciones de Modos Intrínsecos que cumplen con dos condiciones [31].

- Simetría en las envolventes superiores e inferiores (Media cero)
  
- El número de extremos y el número de cruces por cero debe ser el mismo o diferir exactamente en uno.

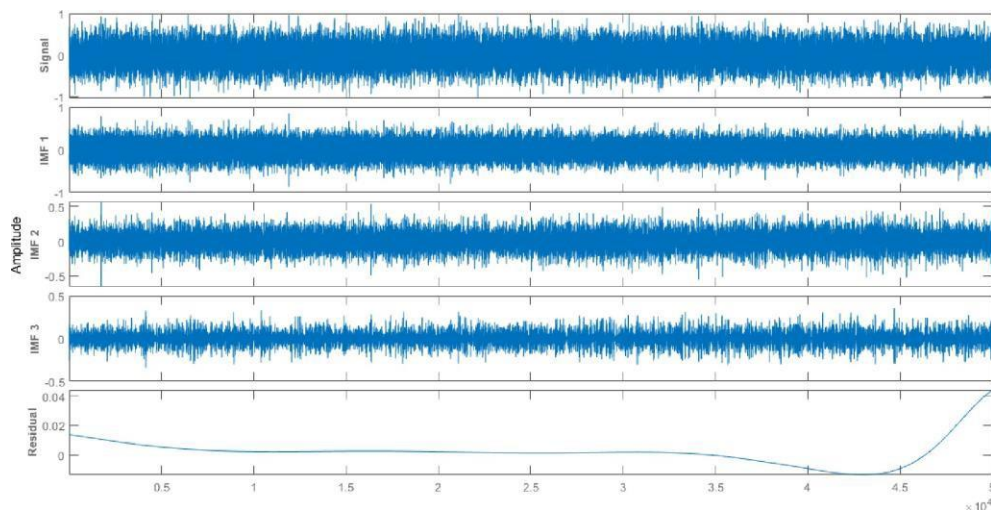
HHT puede aplicarse como se ha venido comentando al análisis de fenómenos no estacionarios como por ejemplo las velocidades del viento, siendo esto importante ya que este presenta una gran variabilidad y anomalías, pudiendo afectar a los sistemas de transmisión o conversión de energía en aplicaciones donde se requiera aprovechar la energía eólica entre otros.

Sin duda las transformadas, las herramientas y operadores matemáticos están para complementarse unos a otros y así poder realizar un mejor análisis de señales que nos permita comprender mejor nuestro universo.

“Los datos es lo único que nos conecta con la realidad”- Norden E. Huang



**Figura 3.1.-** “Ejemplo de la Densidad Espectral de Potencia de una señal QPSK afectada por ruido AWGN.”



**Figura 3.2.-** “Ejemplo de Descomposición de Modo Empírico de una señal QPSK afectada por AWGN. Se muestran las primeras tres Funciones de Modo Intrínseco (IMF).”

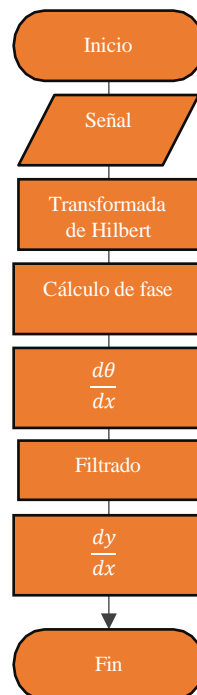
Al analizar los resultados obtenidos al aplicar la HHT a señales de comunicaciones afectadas por ruido, se identificó que las primeras IMF mantenían un comportamiento muy similar a la señal original. Esto es, mostraron un comportamiento aleatorio que al analizarse directamente con la transformada Hilbert para observar sus componentes espectrales, no permitía identificar en forma directa la presencia o ausencia de una señal de comunicación.

Al analizar los resultados obtenidos al aplicar la HHT a señales de comunicaciones afectadas por ruido, se identificó que las primeras IMF mantenían un comportamiento muy similar a la señal original. Esto es, mostraron un comportamiento aleatorio que al analizarse directamente con la transformada Hilbert para observar sus componentes espectrales, no permitía identificar en forma directa la presencia o ausencia de una señal de comunicación.

Por lo anterior, y observando que se obtenían resultados similares al trabajar la HT directamente con la señal original (sin la descomposición EMD) se decidió aplicarla directamente y evitar el gasto computacional requerido por el proceso de descomposición. A continuación se describe el método propuesto.

### Modelo propuesto

El proceso empleado para detectar la presencia de señales moduladas en fase en un canal de comunicación es el descrito en la Figura 3.3.



**Figura 3.3.-** “Proceso empleado del modelo propuesto.”

El objetivo del método de detección basado en la Transformada Hilbert consiste en distinguir entre una señal de un sistema de comunicación afectada con ruido y una señal compuesta solamente por ruido, utilizando para esto la variación de fase de la función analítica de la señal observada.

Para llevar a cabo esta detección, primero la señal pasa por un filtro de Hilbert que realiza la transformada de Hilbert (TH).

Como se presentó en la sección 2.3, la TH se define como:

$$HT\{f(t)\} = f(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi t} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau$$



Donde  $f(t)$  es la señal que está presente en el canal de comunicación que ingresa al filtro Hilbert. Este produce un desfaseamiento de  $90^\circ$  en la señal. Al implementar el filtro de Hilbert se obtiene una señal compleja, llamada señal analítica. La señal analítica se conforma de números complejos donde la parte real es la señal original y la parte imaginaria es la señal desfasada.

$$f_s(t) = f(t) + j\hat{f}(t)$$

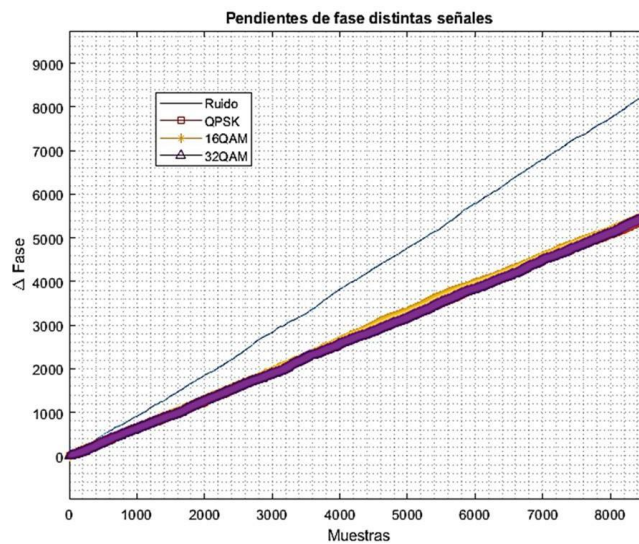
Una vez conformada una señal analítica se procede a calcular la fase en cada instante de tiempo:

$$\angle(t) = \arg\{f_s(t)\}$$

$$\angle(t) = \arg\{f(t) + j\hat{f}(t)\}$$

$$\angle(t) = \text{atan} \frac{j\hat{f}(t)}{f(t)}$$

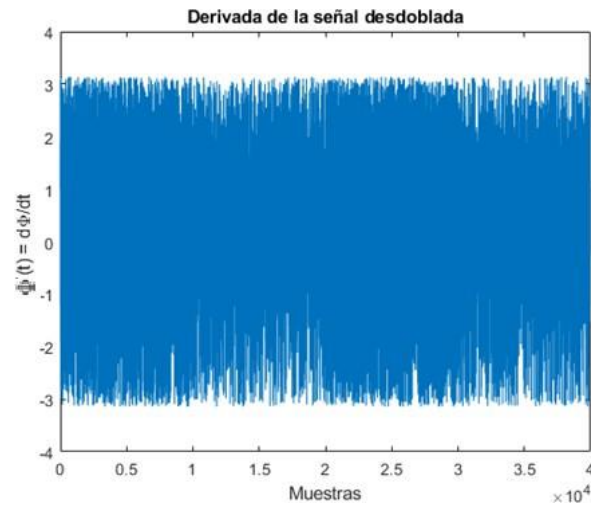
Esta fase instantánea se procesa en forma continua (unwrapped - desdoblada) de tal manera que se conforma una señal ascendente, donde la pendiente de esa señal (señal desdoblada) refleja las variaciones de fase, como se muestra en la Figura 3.4.



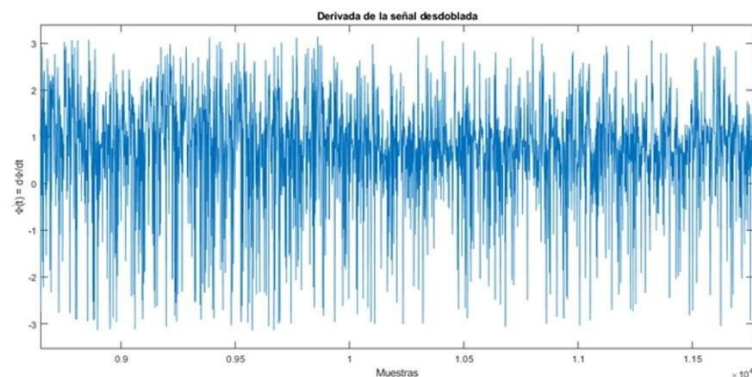
**Figura 3.4.-** “Ejemplo de fase de la función analítica, las señales de comunicación tienen el mismo nivel de SNR”

Al ordenar de esta manera la fase, la función unwrap corrige los saltos de fase multiplicando por  $\pm 2\pi$  cuando el salto a la fase inmediatamente siguiente es superior a  $\pi$ . Esta señal de fase desdoblada a través del tiempo se deriva de tal manera que se reflejan las variaciones de fase en cada instante:

$$\varphi'_u(t) = \frac{d\varphi_u(t)}{dt}$$



**Figura 3.5.-** “Segmento de la señal derivada de la fase, se observan los valores máximos y mínimos de fase son de  $\pi$  a  $-\pi$  respectivamente.”

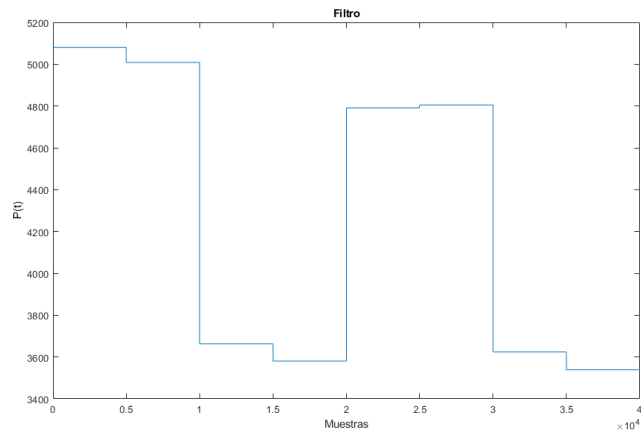


**Figura 3.6.-** “Zoom alrededor de la muestra 10000, se observa un componente de offset”

A la señal derivada  $\varphi'_u(t)$  se le aplica una operación de suma que hace las veces de filtro, con esto se busca distinguir entre las variaciones de fase de ruido y de la señal.

$$P(t) = \sum_{1}^N \varphi'_u(t)$$

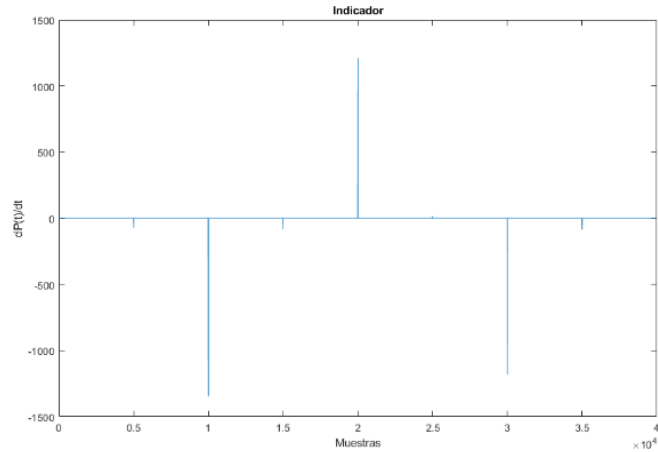
Donde N es el número de muestras que conforman un segmento del filtro, y  $\varphi'_u(t)$  la señal de derivadas. Luego entonces el valor obtenido P(t) sustituye a las N muestras sumadas mostrada en la Figura 3.7, logrando con esto un valor estable directamente proporcional con el número de muestras para la identificación de los cambios de fase, ya que entre más grande sea el bin del filtro mejor será la distinción del estado de ocupación del canal.



**Figura 3.7.-** “Visualización del efecto de filtrado en la señal”

$$I_p(t) = \frac{dP(t)}{dt}$$

Si un bin del filtro difiere en magnitud del anterior, la señal derivada  $I(t)$  mostrará un impulso que servirá como indicador del cambio de estado en un canal de comunicación.



**Figura 3.8.-** “Señal derivada del proceso de filtrado, donde se observan los indicadores de estado de canal”.

Sin embargo, la utilización de pocas muestras para el filtro trae consigo un exceso de indicadores en forma de impulsos, por lo que es necesario discriminar entre ellos. Para eso se utiliza un umbral de selección de los impulsos.

Serán seleccionados como indicadores los impulsos que cumplan la siguiente condición:

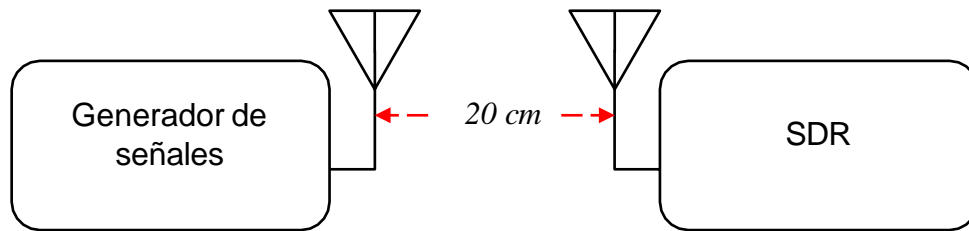
$$Indicador = I_p(t) \geq |U \sum_{1}^M I_p(\tau)|$$

Siendo  $M$  el número de muestras a tener en cuenta al comparar y  $U$  el factor de discriminación de indicadores alterando el umbral. Se recomienda que este último sea ajustable en una implementación práctica.

## Implementación

Se consiguió llevar a cabo la implementación del detector de ocupación utilizando la transformada Hilbert y variación de fase en un dispositivo SDR utilizando señales provenientes de un generador vectorial de señales transmitidas vía inalámbrica a través de una antena. Y mediante software se identificó los cambios de estado del canal, es decir cuando había transmisión y cuando no.

El objetivo es distinguir de estos dos estados de ocupación partiendo de la fase instantánea que se obtiene de la transformada de Hilbert, esto porque se busca una alternativa al detector convencional.



**Figura 3.9.-** “Esquema de disposición de dispositivos”

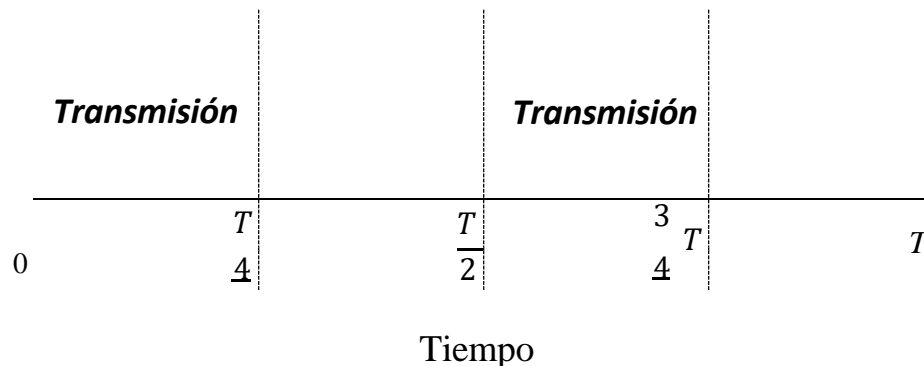


**Figura 3.10.-** ”ZeptoSDR utilizado para la implementación del detector”



**Figura 3.11.-** ”Generador vectorial de señales SMU 200A”

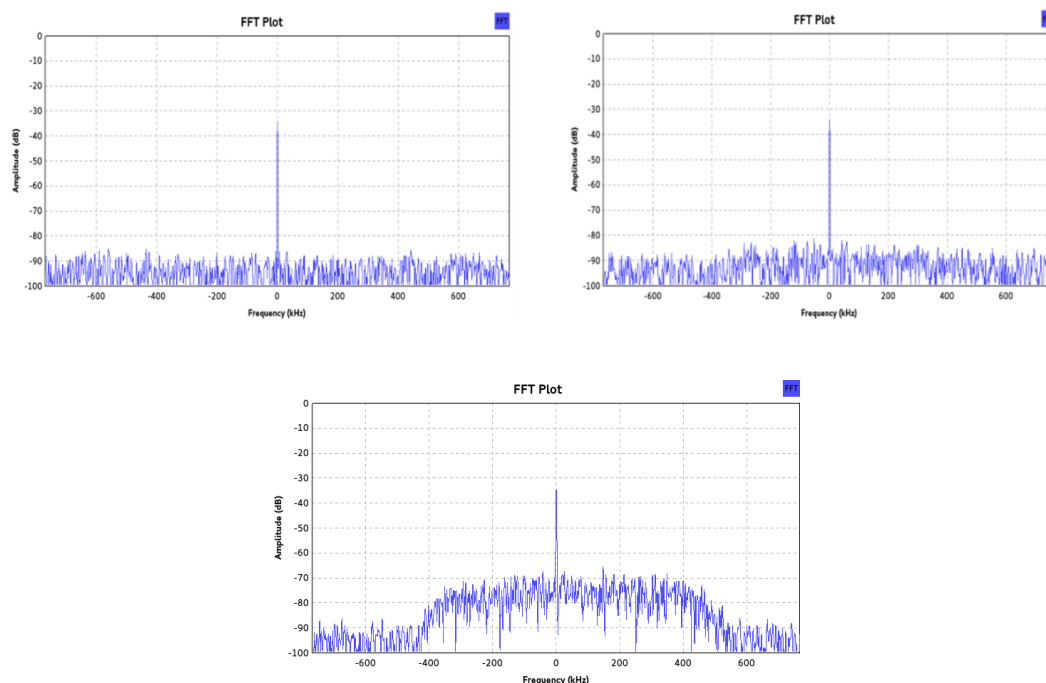
La forma de evaluar la implementación de la técnica de detección fue transmitir de manera intermitente por medio del generador de señales de manera que el SDR reciba instantes de ruido de canal e instantes de señal con ruido.



Las características de las señales de prueba son :

Tipo de modulación	QPSK
Frecuencia portadora	1.25 GHz
Symbol rate	750 Ksym /s

A niveles de SNR bajos es más difícil discernir si hay presencia de alguna señal de comunicación en el canal utilizando el dominio de Fourier como se ve en la Figura 3.12.



**Figura 3.12** “Espectro de frecuencias del receptor. (Izquierda) solamente ruido de canal, (derecha) presencia de señal transmitida a una potencia de -20 dB, (abajo) espectro de frecuencias de presencia de señal transmitida a 0dB”

Se utilizaron los bloques de código en GNURadio mostrados en la figura 3.13 en la versión 1.6 del software ya que es la versión que permitía implementarse en el SDR, los cuales son en orden de ejecución: transformada de Hilbert, calculo de fase, derivada, valor absoluto, filtrado, derivada y umbral.

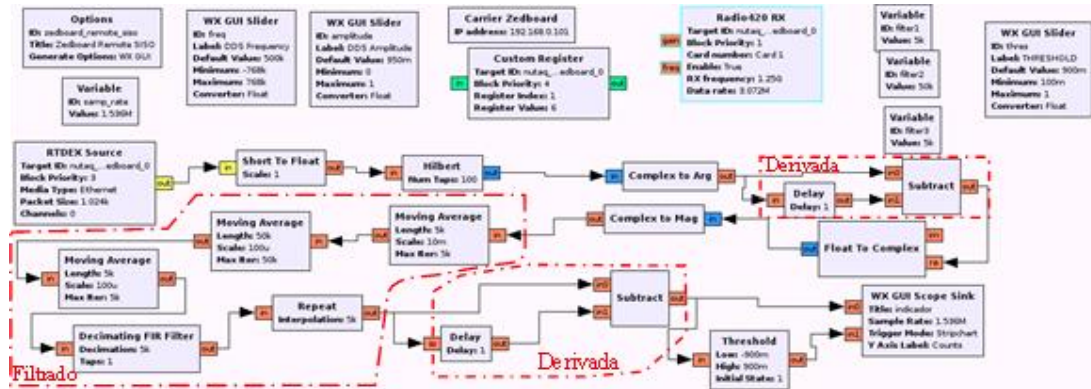


Figura 3.13 “Bloques utilizados en el detector en GNURadio”

El SDR logro interpretar los cambios de estado del canal en tiempo real. En la figura 3.14 se muestra la salida después de derivar la etapa de filtrado lo que otorga una señal continua de impulsos siendo unos considerablemente con mayor amplitud que otros, siendo los impulsos grandes los que representan el cambio de estado del canal y la amplitud de estos se ve reflejada por la relación señal a ruido. Una vez obtenida las señal de indicadores basta con poner un umbral ajustado para detectar los impulsos que sobresalen a la variación promedio.

De esta manera se obtiene una señal de cambio de estado del canal dependiente del umbral. Que como se ve en la figura 3.15 en rojo es más fácil interpretar ya sea para un ser humano o para una máquina si se desea seguir con algún procesamiento.

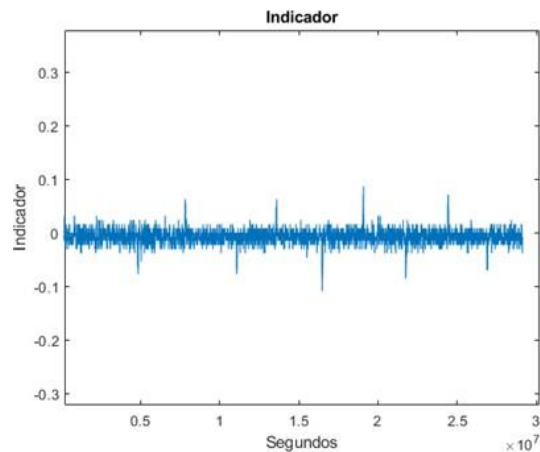
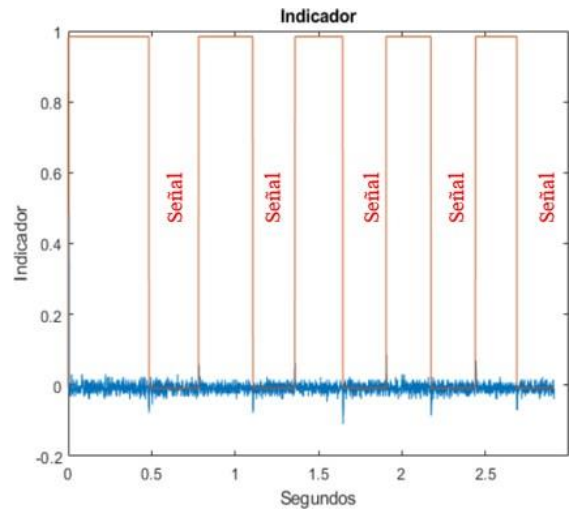


Figura 3.14 “Señal de indicadores de cambio de estado y posible ubicación de umbral”



**Figura 3.15.** “Indicador resultado de aplicar un umbral”



# Capítulo 4

## Resultados

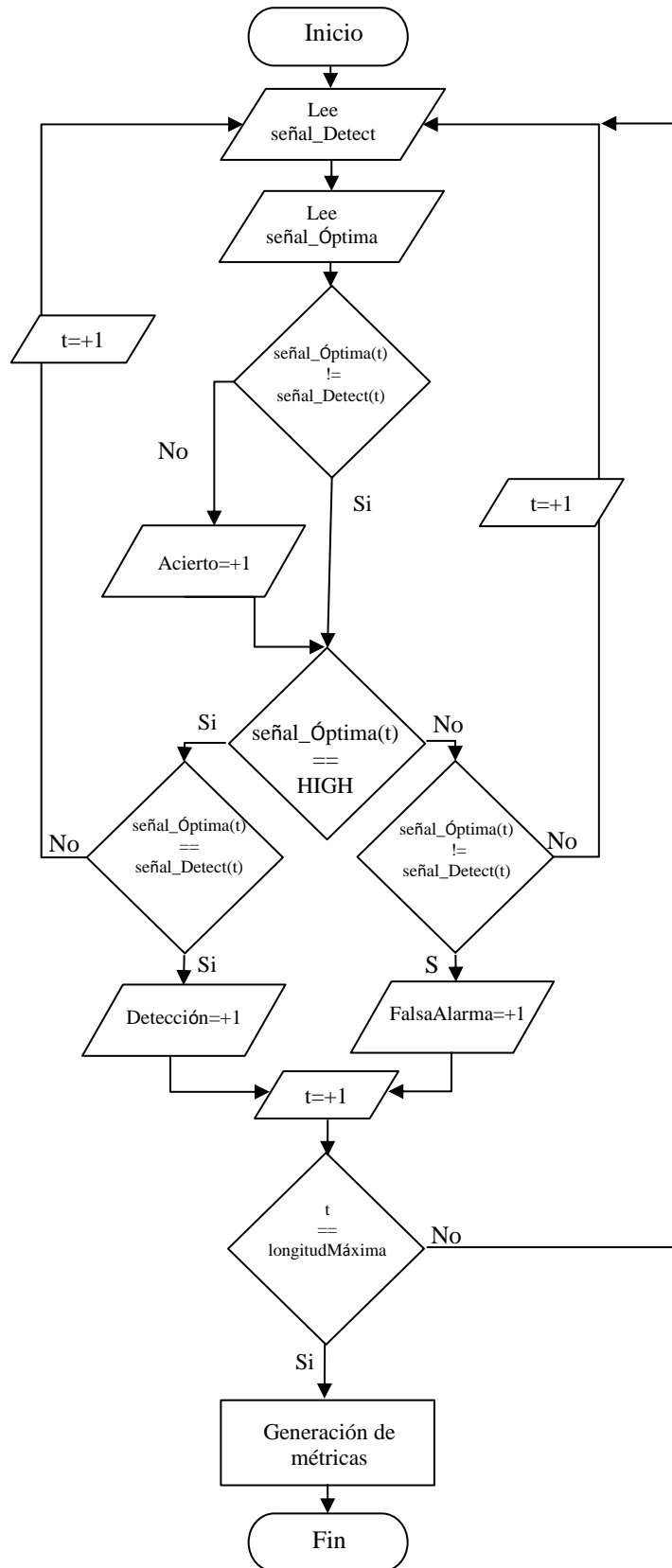
En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la experimentación utilizando el método de identificación del estado de ocupación de canal basado en la transformada de Hilbert. Se describe la manera en la que se evalúa el desempeño de la técnica utilizada. También se detallan las condiciones del experimento y las características de las señales de prueba.

### **Descripción del modelo de simulación**

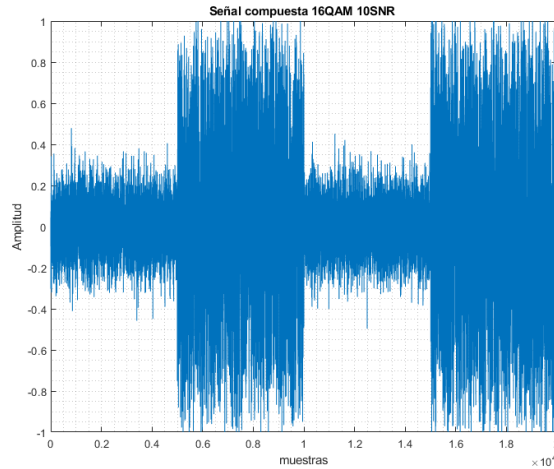
Para evaluar el método de identificación del estado de ocupación de canal basado en la transformada de Hilbert se empleó la técnica mostrada en la figura 4.1 con el diagrama de flujo de la técnica de obtención de las métricas. A fin de validar los resultados de evaluación se utilizaron 5,000 realizaciones del proceso de detección por métrica salvo en casos donde se modifica este factor, aumentado o reduciendo el número de evaluaciones, y se puso a prueba la técnica para detectar los cambios de ocupación de estado de un canal de comunicación. Teniendo en cuenta las posibles aplicaciones del método, para evaluarlo se optó por crear una señal compuesta con segmentos de señal modulada a cierto SNR y segmentos de ruido AWGN alternándose entre ellos como se ve en la

figura 4.2, emulando el comportamiento de un canal utilizado por dispositivos de radio, en donde en un momento finito existe presencia de señal y en el momento siguiente existe solo ruido en el canal. Las señales de prueba utilizadas constaron de muestras de ruido AWGN así como señales de muestra con modulación y se generaron utilizando el generador vectorial de señales SMU200A con una tasa de muestreo de 1 MHz y una tasa de símbolos de 100 KHz, la potencia del ruido se fijó a -50 dBm para todas las muestras. Se utilizaron técnicas de modulación de fase como lo son las señales de tipo QPSK, 16QAM y 32QAM.

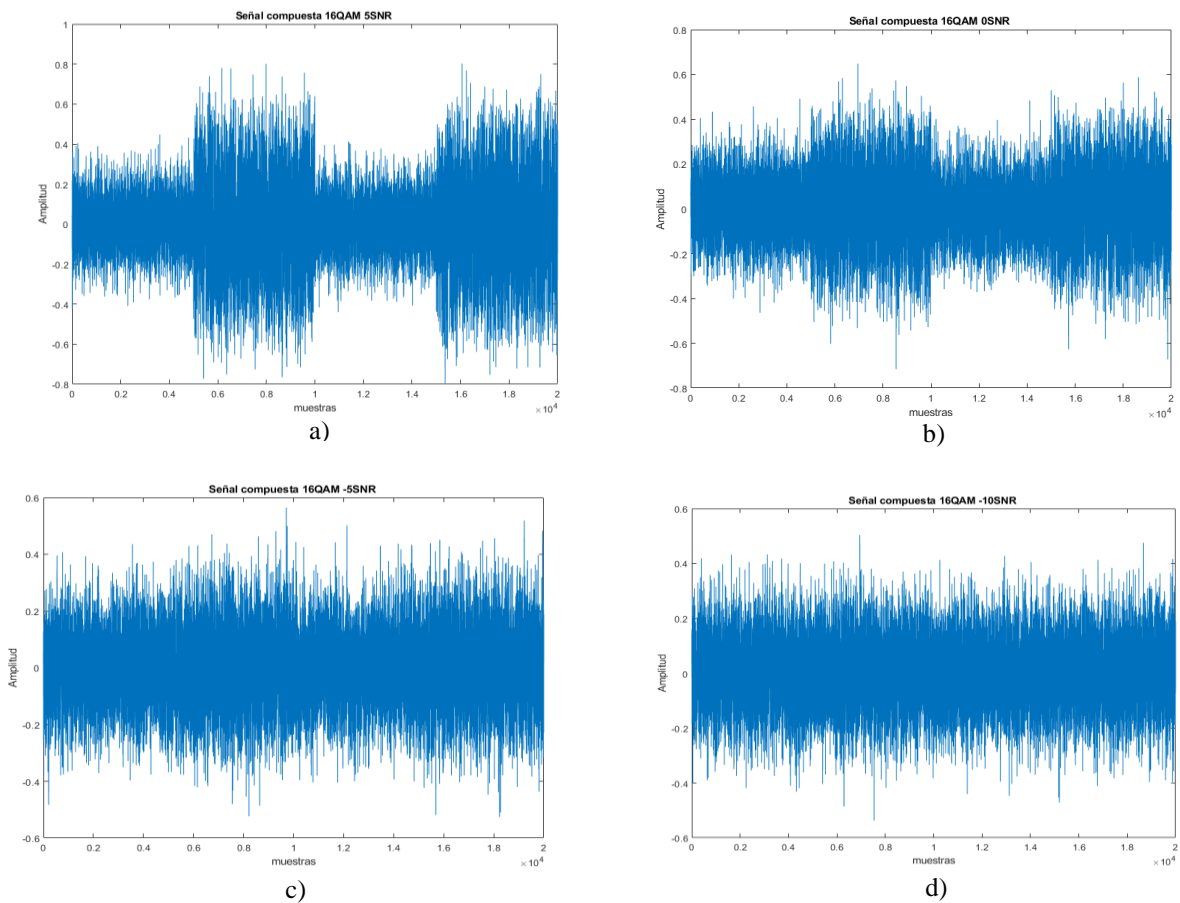
En la figura 4.2 se puede observar de manera clara la diferencia abrupta en la amplitud de un segmento en presencia de señal y un segmento en ausencia de esta, sin embargo, este fenómeno se da por el nivel de SNR de la señal, sin embargo, la figura 4.3 muestra la señales compuestas utilizando diferentes niveles de SNR, en donde se aprecia que a medida que disminuye el nivel de SNR también la diferencia observable entre segmentos empieza a disminuir.



**Figura 4.1.-** “Diagrama de flujo de la técnica de obtención de métricas de evaluación del método de identificación del estado de ocupación de canal basado en la transformada de Hilbert”



**Figura 4.2.-** “Señal compuesta con segmentos de ruido AWGN y señal modulada QPSK a 10 dB SNR”



**Figura 4.3.-** “Comparación de señal de prueba con distintos niveles de SNR y una modulación 16QAM, (a) 5 dB, (b) 0 dB, (c) -5 dB y (d) -10 dB. ”

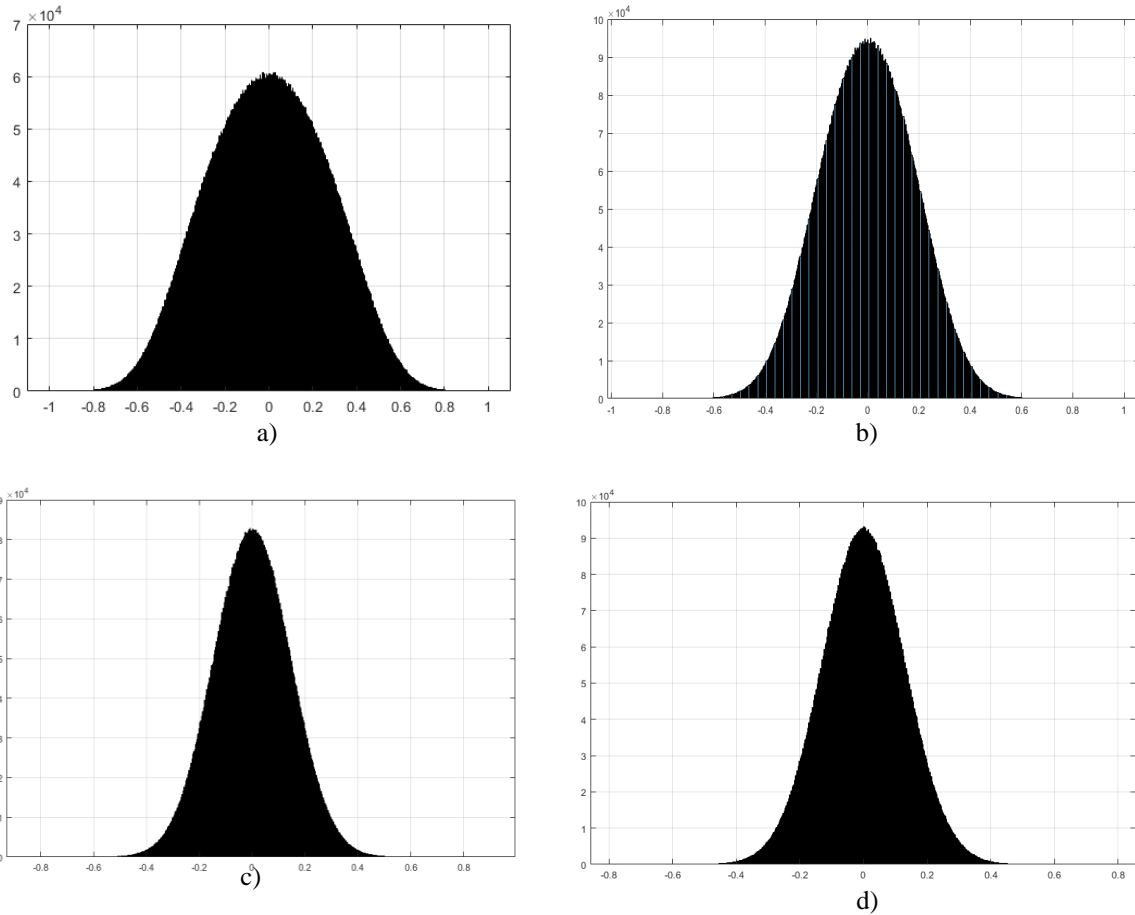
## Descripción de la construcción de las señales compuestas

La generación de señales de prueba se llevó a cabo con señales de 15,000,000 de muestras de longitud obtenidas de un generador vectorial SMU200A y la selección de las muestras de los segmentos de señal y ruido que se utilizan en cada evaluación del proceso es completamente independiente en cada iteración y se hace de manera aleatoria con el código de MATLAB mostrado en la Figura 4.4, donde la variable *seg* se puede modificar alterando la longitud de las muestras en cada segmento, el vector *Ruido* contiene la señal de ruido AWGN, la variable *matriz* contiene las señales de un solo tipo de modulación ordenadas de menor nivel de SNR a mayor nivel de SNR, por ejemplo: *matriz*= [16QAM-20dBm ; 16QAM-17dBm ; 16QAM-5dBm] y la variable *SNR* corresponde al número de niveles de SNR alojados en *matriz*.

```
seg=5000;
r = randi([1 14000000],1,4);
C = [] ;
for i=1:length(r)
    senial=[];
    if mod(i,2)==1
        for j=1:seg
            senial(j)= Ruido(r(i)+j);
        end
    elseif mod(i,2)==0
        for j=1:seg
            senial(j)= matriz(r(i)+j,SNR);
        end
    end
    C=[C senial];
end
```

**Figura 4.4.-** “Algoritmo utilizado para la generación de la señal de prueba”

Como se puede ver en la figura 4.5 las señales moduladas a diferente nivel de SNR tienen una distribución de probabilidad distinta ya que la campana de distribución se va a acortando según disminuya el nivel de SNR.



**Figura 4.5.-** “Histograma distribución de señales moduladas, (a) 5 dBm, (b) 0 dBm, (c) -5 dBm, (d) -10 dBm”

**Métricas de evaluación**

**Probabilidad de detección.** Estadística utilizada para evaluar la probabilidad de un detector de decidir que una banda espectral está ocupada cuando realmente ésta lo está.

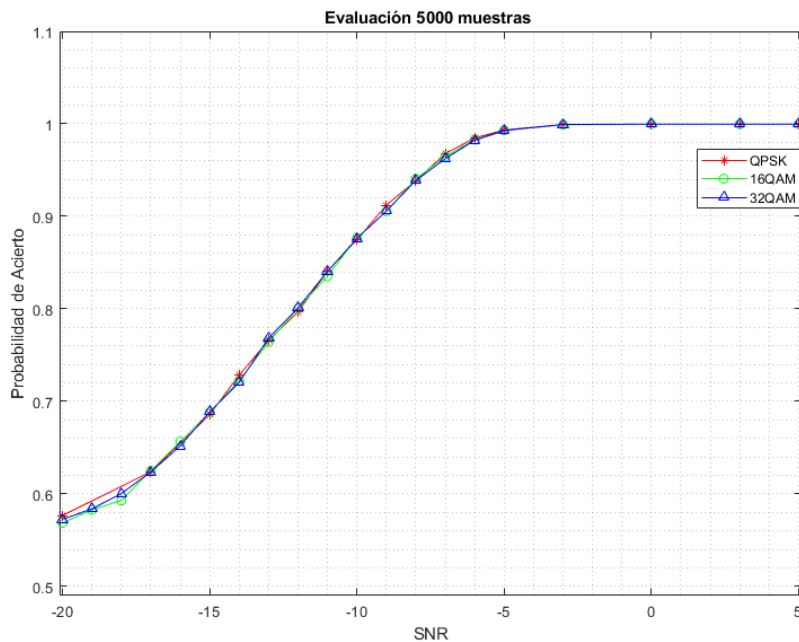
**Falsa alarma.** Se utiliza para definir la probabilidad en la que un detector decide que un canal está ocupado cuando en realidad existe una vacante espectral.

**Probabilidad de acierto.** Consiste en calcular la posibilidad del detector de acertar en la interpretación del canal ya sea cuando éste está ocupado o desocupado, es decir existe un hueco espectral.

**SNR Wall.** Utilizado en el entorno de la detección de energía en donde las características conocidas de las señales son muy pocas. Se utiliza para determinar que tan robusto es un detector ante la incertidumbre de ruido independientemente de la duración de la detección para diferentes valores de relación señal a ruido (SNR). Si el valor de SNR es menor que el SNR Wall, se interpreta que el detector no logrará mantener una robustez ni el rendimiento deseado. [32]

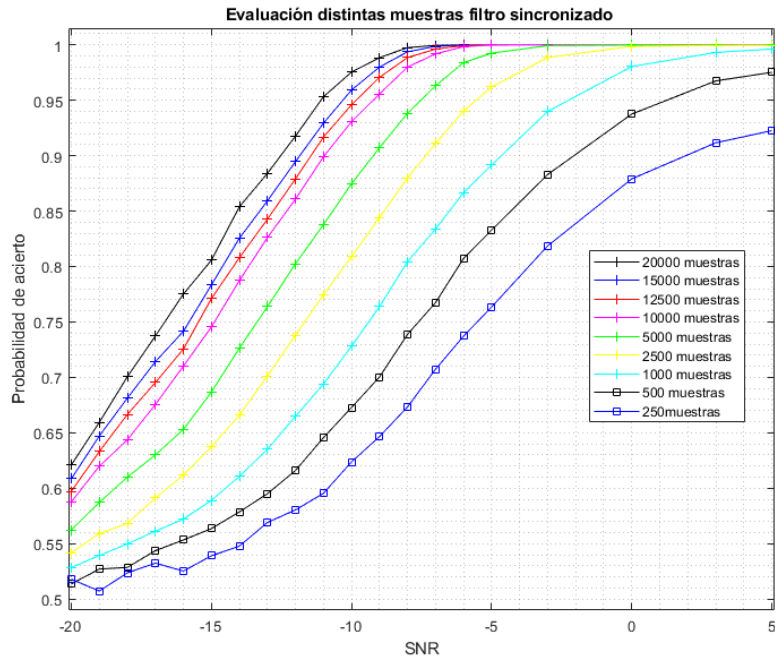
## Resultados de la evaluación del desempeño del detector

El principal resultado se muestra en la Figura 4.6, donde se ve el desempeño del método utilizando señales de tipo: QPSK, 16QAM, 32QAM. Se utilizaron señales moduladas en fase debido a la naturaleza del método, el cual utiliza los cambios de fase para detectar el cambio de estado y se utilizó un rango de SNR que va desde -20 dB hasta 5 dB. Se observa que se alcanza una probabilidad de detección de .9 al nivel de SNR de -9db por lo que se interpreta éste como su SNR Wall.



**Figura 4.6** “Curva de probabilidad de acierto con distintos tipos de señales”

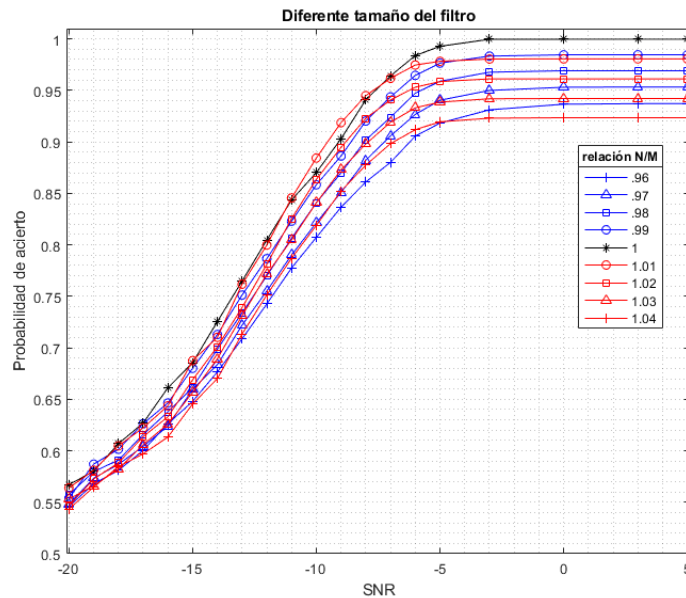
Este resultado se obtuvo teniendo en cuenta 5000 muestras. En la figura 4.7 se muestra el desempeño del detector utilizando diferentes longitudes tanto del filtro como de la duración del segmento del canal, es decir están sincronizados.



**Figura 4.7.-** “Evaluación del detector utilizando diferentes longitudes de muestras en el filtro”

También se observa en la figura DM que conforme el tamaño del filtro aumenta la probabilidad de acierto también lo hace.

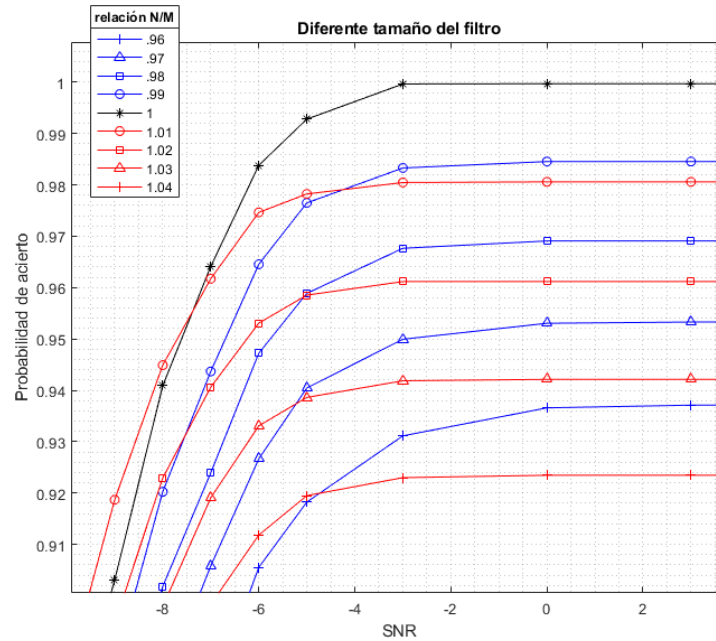
No obstante, este resultado se consigue cuando el filtro está sincronizado con el segmento evaluado obteniendo una relación  $N/M = 1$  lo que en la práctica es muy improbable lograr. En la Figura 4.8 se evaluó diferentes relaciones  $N/M$  para situaciones cuando el filtro no es sincronizado con el segmento y compararlo cuando sí lo está.



**Figura 4.8.-** “Evaluación desincronización de filtro y segmento”



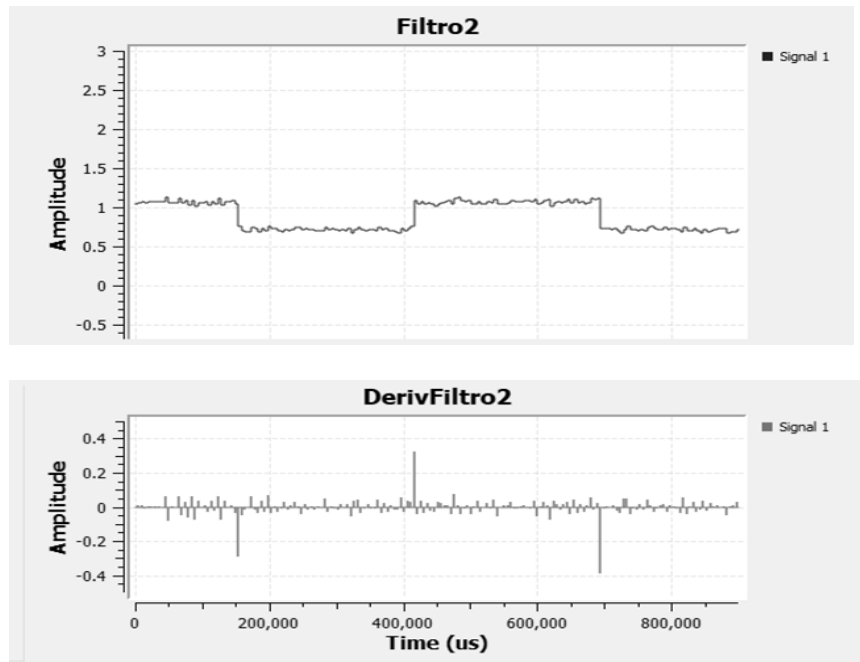
En la figura 4.9 se observa un zoom a la figura N/M donde se ve el efecto que tiene reducir o aumentar el filtro conforme el nivel de SNR



**Figura 4.9.- “Acercamiento en la zona de inflexión”**

Se observó que para SNR menores de -5 dBm utilizar  $N > M$  tiene mejor desempeño mientras que para SNR mayor a -5 dBm se obtiene un desempeño mejor cuando  $M > N$ .

Finalmente, a manera de validar el método, se realizó una simulación utilizando el software especializado GNURadio implementando el método de detección emulando una detección a tiempo real. En la figura 4.10 se observa cómo el método puede arrojar dos indicadores, ya sea uno en forma de nivel o escalón y otro en forma de impulso, que según la ejecución puede utilizarse uno u otro.



**Figura 4.10.-** “Implementación del método de detección de estado por variación de fase utilizando GNURadio”

### **Resumen del capítulo**

El detector de estado de canal por variación de fase ofrece una implementación sencilla considerando los procesos y operaciones utilizadas, siendo una buena alternativa a complementar un detector de energía tradicional. El método mostró un buen desempeño, sin embargo, también se muestra afectado por factores como la desincronización y longitud de las muestras.

De acuerdo a lo anterior, se aconseja si es posible utilizar longitudes de muestreo ligeramente más grandes con respecto a lo planeado ya que será improbable lograr la sincronización con el cambio de estado de canal.

# Capítulo 5

## Conclusiones

En este trabajo se comprobó que la transformada de Hilbert puede utilizarse en un detector para identificar cambios en el estado de ocupación de un canal de comunicación inalámbrico, obteniendo un resultado satisfactorio con señales moduladas en fase como se ve en la figura 5.1 ya que el método de detección de ocupación por variación de fase utiliza la Transformada de Hilbert para calcular la fase instantánea y así ponderar la variación de fase como se ve en la figura 5.2 para distinguir una señal de comunicación de ruido AWGN.

También como se puede ver en la figura 5.2 que a medida que se toman mas muestras para considerar el estado del canal es mas fácil discernir entre la ocupación de éste. En la figura 5.3 se consideró esto y se observa el resultado de realizar la evaluación teniendo en cuenta diferentes muestras, y se observó que como era de esperarse el desempeño del detector mejora conforme aumenta el número de muestras, cabe mencionar que la limitante de utilizar un mayor número de muestras para obtener un mejor resultado en la detección es un mayor tiempo de ejecución así como de gasto computacional, también hay que mencionar que esta evaluación se realizó teniendo en cuenta una sincronización del detector al tomar las muestras y del segmento finito del estado del canal.

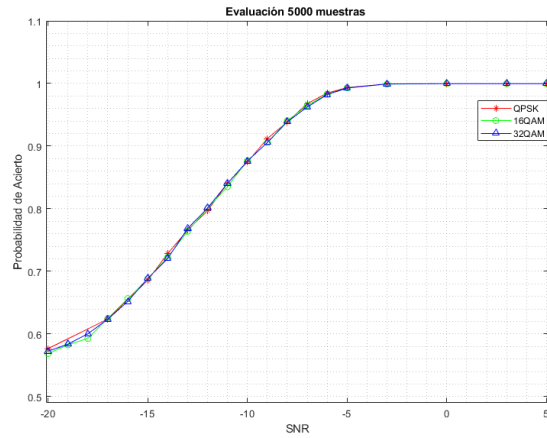


Figura 5.1.- "Evaluación del método con 5000 muestras y filtro encajado "

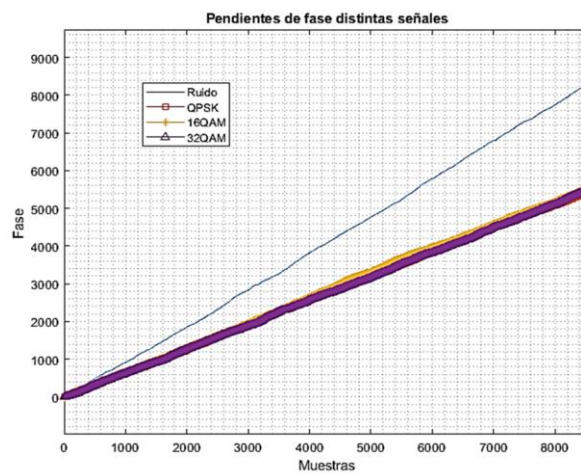


Figura 5.2.- "Pendiente de fase de diferentes señales"

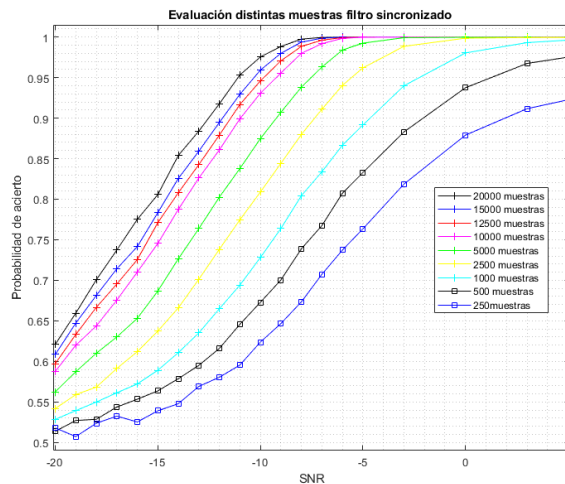
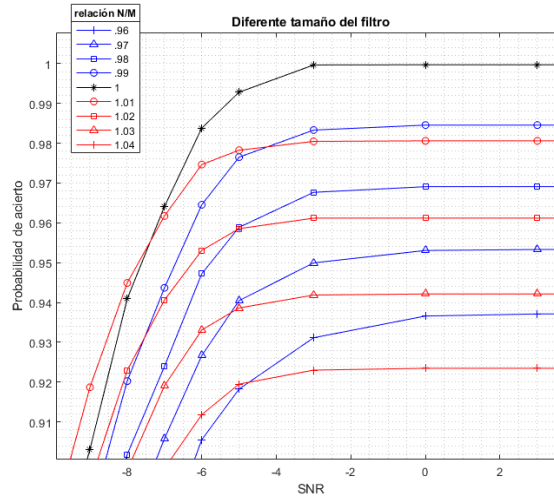


Figura 5.3.- "Evaluación del método con un filtro encajado y diferente número de muestras"

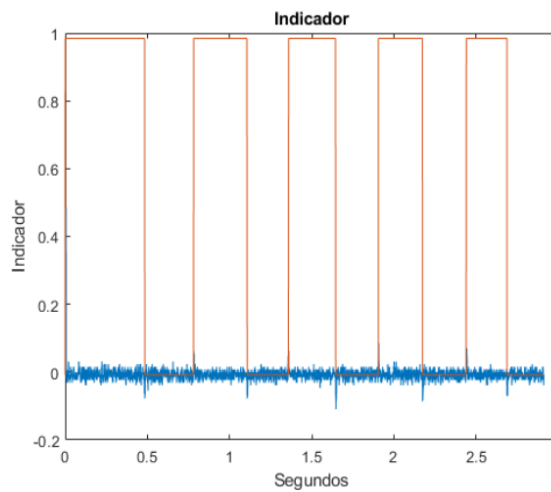


**Figura 5.4.-** “Evaluación del método con diferente filtro descajado”

Además, se realizó una evaluación con un filtro levemente desfasado, ya sea que contaba con más muestras que un segmento de señal del canal o menos muestras y como se observa en la figura 5.4 se logra un mejor desempeño cuando el detector toma ligeramente más muestras que cuando se toman menos muestras para realizar la detección.

Lo cual lleva a concluir que a sabiendas de que en un escenario real no se puede garantizar la sincronización del detector con el cambio de estado del canal se recomienda a medida de lo posible un factor de muestreo alto ya que, a pesar de las limitantes de procesar muchas muestras, se compensan los beneficios en mayor medida gracias al avance tecnológico en las plataformas tecnológicas disponibles (FPGA, procesadores y DSP) los cuales nos permiten realizar cálculos suficientemente rápidos y no demuestra problema alguno que afecte la implementación del detector basado en la Transformada de Hilbert ya que el filtro para realizar la Transformada de Hilbert es de fácil implementación, lo cual permite pensar en una aplicación de detección en tiempo real, esto es, una detección de un hueco espectral con el potencial para transmitir, y donde se verá reflejado la capacidad de procesamiento con la se cuenta, así como el número de muestras a procesar, se prevé que se tendrá que encontrar el equilibrio entre capacidad de detección y la velocidad de ejecución para poder implementarlo en un sistema real y considerarse en tiempo continuo.

Ahora, al llevar el método a una implementación física en un entorno de pruebas en laboratorio utilizando un Zepto SDR que utiliza GNURadio se observó un buen desempeño después de ser calibrado manualmente, teniendo en cuenta las variaciones en tiempo real del canal de comunicación, como se ve en la Figura C5 donde la señal roja es el estado de transmisión y la señal azul la señal indicador donde se ven los impulsos de detección y se observa que coinciden las subidas y bajadas.



**Figura 5.5** “Indicador y señal estado del canal”

Una de las ventajas del detector basado en la TH, es la inmunidad a la incertidumbre de ruido. Debido a que la TH se utiliza para detectar cambios en la fase instantánea de la señal analizada, estos cambios se mantienen y no se distorsionan cuando la potencia se modifica. Por lo tanto, ante el fenómeno de incertidumbre de ruido, el desempeño del detector basado en la TH se mantiene, lo cual adquiere una robustez intrínseca por sí mismo al considerar solamente los cambios de fase.

A pesar de los buenos resultados obtenidos en la experimentación, este método no es infalible ni mucho menos, ya que se detectó que, si se cambia el nivel de SNR en la señal analizada a uno mucho más bajo, éste puede interpretarse como un hueco espectral.

Finalmente, ya que el desempeño del detector basado en la TH depende de la sincronización del proceso con los cambios en la señal, su desempeño puede ser inferior al de un detector de energía tradicional. Sin embargo, el detector de energía tradicional carece de inmunidad a la incertidumbre de ruido, y es muy sensible a la cantidad de información a procesar, lo cual permite una posible coexistencia entre ambos detectores para dar así lugar a un detector más robusto que podría contar con diversas etapas.

## **Trabajo futuro**

En este trabajo se realizaron diversas evaluaciones teniendo en cuenta un umbral fijo, sin embargo, se propone analizar e incorporar un umbral adaptativo para lograr un desempeño óptimo. También se realizó el modelo y se teorizó un poco la técnica de detección de estado por variación de fase en un canal de comunicación llevando a cabo simulaciones y experimentación bajo condiciones controladas, sin embargo, es perfectible la manera de evaluar, por esta razón implementar la técnica con una evaluación calibrada de desempeño para demostrar su factibilidad en aplicaciones reales de radio cognitivo.

## REFERENCIAS

- [1] Y. Zeng, Y.-C. Liang, A. T. Hoang, and R. Zhang, "A Review on Spectrum Sensing for Cognitive Radio: Challenges and Solutions," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2010.
- [2] Wei Lin and Qinyu Zhang, "A design of energy detector in cognitive radio under noise uncertainty," 2008 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, 2008.
- [3] F. Salahdine, H. E. Ghazi, N. Kaabouch, and W. F. Fihri, "Matched filter detection with dynamic threshold for Cognitive Radio Networks," 2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), 2015.
- [4] K.-L. Du and Wai Ho Mow, "Affordable cyclostationarity-based spectrum sensing for cognitive radio with smart antennas," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 4, pp. 1877–1886, 2010.
- [5] S. V. Cheerla, D. Venkata Ratnam, A. Sai Nitin, and T. Durga Sai Sruthi, "Spectrum sensing for cognitive radio using Hilbert- Huang Transform average ratio detector," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 34, 2015.
- [6] K. McClaning and T. Vito, *Radio Receiver Design*. Atlanta, GA: Noble Pub. Corp, 2000.
- [7] D. D. Ariananda, M. K. Lakshmanan, and H. Nikookar, "A survey on spectrum sensing techniques for Cognitive Radio," 2009 Second International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management.
- [8] M. Feldman, "Hilbert transform applications in mechanical vibration," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011.
- [9] D. Martinez Plata, *Detección de energía robusta a la incertidumbre de Ruido para la identificación de espectro para radios Cognitivos*. Mexicali, Baja California, 2021.
- [10] Y. Arjoune and N. Kaabouch, "A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research

- Directions,” *Sensors*, vol. 19, no. 1, p. 126, Jan. 2019.
- [11] S. Srivastava, M. Hashmi, S. Das and D. Barua, "Real-time blind spectrum sensing using USRP," 2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2015, pp. 986-989, doi: 10.1109/ISCAS.2015.7168801.
- [12] G. Prema and P. Gayatri, "Blind spectrum sensing method for OFDM signal detection in Cognitive Radio communications," 2014 International Conference on Communication and Network Technologies, 2014, pp. 42-47, doi: 10.1109/CNT.2014.7062722.
- [13] K. Narayanankutty, A. Nair, D. Soori, D. Pradeep, V. Teja and V. K.B., "Cognitive Radio Sensing Using Hilbert Huang Transform," *Wireless Engineering and Technology*, Vol. 1 No.
- [14] S. E. El-khamy, M. S. El-mahallawy and E. S. Youssef, "CS. Multiscale Hilbert Transform Approach to Wideband Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks," 2013 30th National Radio Science Conference (NRSC), 2013, pp. 193-201, doi: 10.1109/NRSC.2013.6587944
- [15] J. Luque, "Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico", *ACTA*, vol. 062, pp. 17- 20, 2012.
- [16] ITU, "V.431 : Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones", 2015.
- [17] IFT, "El Espectro Radioeléctrico en México. Estudio y Acciones". [Accessed 3 November 2021].
- [18] Durán Torrea Rodolfo, Millán Benjamín, J. E. Brieva, and Ramón Alvarez Bada José, "Simulación de Ruido Electromagnético," thesis, Tecnológico de Monterrey, México, 2004.
- [19] S. Gallardo Vázquez, *Elementos de sistemas de telecomunicaciones*, 1st ed. 2015.
- [20] E. McCune and Q. Diduck, "4096-QAM microwave transmitter providing efficiency exceeding 50% and EVM below 1%," 2019 49th European Microwave Conference (EuMC), 2019.
- [21] FCC Spectrum Policy Task Force, "Report of the Spectrum Efficiency Working Group", 2002.
- [22] M. I. I. I. Joseph, "An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," dissertation, KTH, Kista, Sweden, 2001.



- [23] Galvis Quintero, "ACCESO DINAMICO AL ESPECTRO: ESTADO ACTUAL, TENDENCIAS Y RETOS", Entre ciencia e ingeniería, 2008.
- [24] FCC, "Cognitive Radio for Public Safety", Federal communications commission. [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/general/cognitive-radio-public-safety>. [Accessed: 03- Nov- 2021].
- [25] Zhao and Swami, "A SURVEY OF DYNAMIC SPECTRUM ACCESS: SIGNAL PROCESSING AND NETWORKING PERSPECTIVES", 2007.
- [26] J. H. Aguilar and A. Navarro, "Cognitive Radio – State of the art," *Sistemas y Telemática*, vol. 9, no. 16, p. 31, 2011.
- [27] H. R. Ramos, "Arquitecturas de Radio Cognitiva: Una Revisión actual," *Revista Tecnura*, vol. 18, no. 39, pp. 181–181, 2013.
- [28] G. M. Salama and S. A. Taha, "Cooperative Spectrum Sensing and Hard Decision Rules for Cognitive Radio Network," 2020 3rd International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCAIS48893.2020.9096740.
- [29] L. Pedraza, F. Forero and I. Páez, "Detección de espectro para radio cognitiva", *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 20, 2012
- [30] S. L. Hahn, "The history of applications of analytic signals in electrical and Radio Engineering," EUROCON 2007 - The International Conference on "Computer as a Tool", Sep. 2007.
- [31] J. Villanueva, M. Bueno, J. Simón, M. Molinas, J. Flores and P. Méndez, "Aplicación de la transformada de Hilbert-Huang en el análisis de señales de comunicación satelital", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 17, no. 2, p. 181, 2020. Available: 10.4995/riai.2019.10878.
- [32] Shbat MS, Tuzlukov V. "SNR Wall Effect Alleviation by Generalized Detector Employed in Cognitive Radio Networks". *Sensors (Basel)*. 2015 Jul 3.