

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**“MODELO OFDM BASADO EN TRANSFORMADAS WAVELETS PARA
REDUCIR LA INTERFERENCIA INTERSIMBÓLICA E INTERCANAL
EN LOS SISTEMAS MULTIPORTADORA”.**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN
INGENIERÍA ELÉCTRICA

AUTOR: ALFREDO BALTAZAR VÁSQUEZ BARRIOS.

Callao, 2017

PERÚ

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a Dios que me dio la oportunidad de tener una familia maravillosa.

AGRADECIMIENTOS

- A mi familia, mi esposa y mis tres hijos, por el sacrificio de tantas horas de ausencia en casa sobre todo los fines de semana.
- A mis padres, por sus enseñanzas para aprender a caminar en la vida, por sus principios, para ser siempre una persona de bien y conservar la humildad en todo momento.
- A mis amigos, del trabajo y de la Universidad, quienes en todo momento aportaron con sugerencias, ideas y conceptos muy útiles para conseguir el objetivo, de culminar con éxito el objetivo trazado.
- A los profesores de la Universidad, por sus enseñanzas y aportes para darle forma a la tesis.
- A todas las personas que brindaron su ayuda, apoyo y asesoría para la elaboración de esta tesis.

CARÁTULA	
PÁGINA DE RESPETO	
HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE	1
TABLAS DE CONTENIDO	3
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
SOMMARIO	7
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.1 Identificación del problema.	8
1.2 Formulación del problema.	10
1.3 Objetivos de la investigación (general y específicos).	10
1.4 Justificación.	11
II. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Marco Filosófico.	13
2.2 Antecedentes del estudio.	14
2.2.1 Estado del arte.	18
2.3 Marco Conceptual.	19
2.3.1 Fundamentos Ontológicos.	19
2.3.2 Fundamentos Epistemológicos.	22
2.3.3 Fundamentos Metodológicos.	23
2.4 Definición de términos Básicos.	24
2.5 Abreviaturas utilizadas.	25
III. VARIABLES E HIPÓTESIS	27
3.1 Definición de las variables.	27
3.2 Operacionalización de variables.	27
3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas.	27
IV. METODOLOGÍA	30
4.1 Tipo de investigación.	30

4.1.1 Generalidades.	30
4.1.2 Modelo de un Sistema de Transmisión-Recepción OFDM.	45
4.2 Diseño de la investigación.	49
4.3 Población y muestra.	67
4.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos.	68
4.5 Procedimientos de recolección de datos.	68
4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos.	68
V. RESULTADOS.	69
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	76
VII. CONCLUSIONES	77
VIII. RECOMENDACIONES	78
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS.	83
ANEXO A-Matriz de Consistencia.	83
ANEXO B-Capacidad de Transferencia de un Canal de Comunicaciones.	84
ANEXO C- Comandos principales de Matlab utilizados.	86
ANEXO D-Potencia pico y efectos no lineales.	87

TABLAS DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS.	
Tabla 3.1 Matriz de Congruencia	29
Tabla 02 Matriz de Consistencia	83
LISTA DE FIGURAS	
Figura 2.1 Árbol Jerárquico	21
Figura 2.2 Aplicación de la Transformada de Fourier	21
Figura 2.3 Aplicación de la Transformada de Wavelet	21
Figura 2.4 Relación entre la Modulación OFDM y Wavelets	22
Figura 2.5 Relación de los Wavelets con las funciones ortogonales	22
Figura 4.1 Señal Seno y Wavelets Daubechies	36
Figura 4.2 Comparación entre la STFT y el Análisis Wavelets	37
Figura 4.3 Aplicación de la Transformada Wavelet	37
Figura 4.4 Discontinuidad de una señal Sinusoidal	38
Figura 4.5 Aplicación de los Coeficientes de Wavelets	38
Figura 4.6 Subespacios para Análisis Multiresolución	42
Figura 4.7 Bloques de un Sistema de Transmisión Digital	47
Figura 4.8 Modulador/Demodulador OFDM	48
Figura 4.9 Esquema del Diseño de la Investigación	49
Figura 4.10 Ejemplo de Interferencia entre símbolos ISI	50
Figura 4.11 Efecto de Multitrayecto con Intervalo de Guarda	51
Figura 4.12 Extensión Cíclica del Símbolo OFDM	52
Figura 4.13 Constelación de QAM-16 que representa a una señal de OFDM con 48 subportadoras	53

Figura 4.14	Sistema OFDM basado en IFFT y FFT	54
Figura 4.15	Árbol de filtros DWT en Análisis y Síntesis	56
Figura 4.16	Transmisor IDWT	58
Figura 4.17	Receptor DWT	58
Figura 4.18	Wavelet Packet Transform	60
Figura 4.19	Transmisor Wavelet Packet	60
Figura 4.20	Receptor Packet Wavelet	61
Figura 4.21	Banco de Filtros de Análisis DTCWT(demodulación)	63
Figura 4.22	Banco de Filtros de Síntesis con IDTCWT(Modulación)	64
Figura 4.23	Diagrama de Bloques Funcional de la Modulación con Wavelets Compleja utilizando la DTCWT	66
Figura 5.1	Probabilidad de error por Símbolo sin Prefijo Cíclico	69
Figura 5.2	Probabilidad de error por símbolo con Prefijo Cíclico	70
Figura 5.3	Simulación de la ICI para $E_bN_o=5$ dB	71
Figura 5.4	Simulación de la ICI para $E_bN_o=10$ dB	71
Figura 5.5	Simulación de la ICI para $E_bN_o=15$ dB	72
Figura 5.6	Simulación de la ICI para $E_bN_o=20$ dB	72
Figura 5.7	Comparación entre DWT-OFDM y FFT-OFDM	73
Figura 5.8	Perfomance BER del OFDM convencional versus WPM	74
Figura 5.9	BER para OFDM basado en DTCWT y con diferente tipo De filtros	74
Figura 5.10	Diagrama Simulink DWT	75
Figura 5.11	Diagrama Simulink DWT-OFDM	75

RESUMEN

La presente tesis refleja uno de los problemas más importantes en el proceso de las comunicaciones, es decir las interferencias producidas por diferentes elementos que intervienen, desde el Transmisor, Canal de Comunicación y Receptor. Una herramienta matemática que permite reducir la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los sistemas Multiportadora es la Transformada Wavelet cuyo rendimiento y eficiencia es mejor que el uso de la transformada de Fourier con ventana, debido a que se concentra en fenómenos transitorios y de alta frecuencia gracias a su tamaño de ventana adaptado a los requerimientos de frecuencia, en vez de la transformada de Fourier en donde se elige un tamaño de ventana fijo.

La aplicación de Wavelets en los moduladores y demoduladores OFDM (Orthogonal Frequency División Multiplexing) es necesario en el sentido que OFDM es la técnica de multiplexaje más utilizada en la tecnología actual como WI-FI, WI-MAX, LTE, por sus características de Ortogonalidad y de Soporte Compacto.

Una de las principales razones por las que se utiliza OFDM, en los sistemas de Telecomunicaciones es porque esta técnica incrementa la robustez en contra del desvanecimiento por selección de frecuencia o interferencia de banda angosta. Normalmente OFDM se implementa mediante FFT e IFFT. La Transformada de Fourier detecta la presencia de una determinada frecuencia, pero no brinda información acerca de la evolución en el tiempo de las características espectrales de la señal. Muchos aspectos temporales de la señal, tales como el comienzo y el fin de una señal finita y el instante de aparición de una singularidad en una señal transitoria, no pueden ser analizados adecuadamente por el análisis de Fourier.

Queda pendiente proseguir el camino de investigar nuevas Transformadas Wavelets, que hagan de los moduladores OFDM de mejor performance que aquellos usados en el presente trabajo. Transformadas Wavelets como las de doble densidad, o las Dual Tree Complex Wavelet Packet, por ejemplo.

ABSTRACT

This thesis reflects one of the most important problems in the communication process, interference from different elements involved, from the Transmitter, and Receiver Communication Channel. A mathematical tool to reduce Intersymbol and Interchannel interference in multicarrier systems is the wavelet transform whose performance and efficiency is better than the use of the Fourier transform with window, because focuses on transients and high frequency phenomena by window size adapted to the requirements of frequency, instead of the Fourier transform wherein a fixed window size is chosen.

The application of Wavelets in the modulators and demodulators OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is necessary in the sense that OFDM is the technique of multiplexing most widely used current technology such as WI-FI, WI-MAX, LTE, for its characteristics of orthogonality Compact and support.

One of the main reasons why OFDM is used in Telecommunications Systems is because this technique increases the robustness against fading frequency selection or narrowband interference. Normally OFDM is implemented using FFT and IFFT. Fourier Transform detects the presence of a certain frequency but does not provide information about the evolution over time of the spectral characteristics of the signal. Many temporal aspects of the signal, such as the beginning and end of a finite signal and the time of occurrence of a singularity in a transient signal, cannot be adequately analyzed by Fourier analysis.

Continue along the path to investigate new Wavelets Transforms, which make the OFDM modulators better performance than those used in this work is pending. Wavelet Transforms as double density, or Complex Wavelet Packet Tree Dual, for example.

SOMMARIO

La tesi attuale riflette uno dei problemi più importanti nel processo di comunicazione, vale a dire le interferenze prodotte da diversi elementi che intervengono, dal trasmettitore, dal canale di comunicazione e dal ricevitore. Uno strumento matematico per ridurre intersimbolica e intercanale interferenza nei sistemi multiportante viene trasformata wavelet cui prestazioni e l'efficienza è meglio che l'uso della trasformata di Fourier con finestra, perché concentrati nei fenomeni transitori di frequenza e di altezza per la sua dimensione della finestra adatta ai requisiti di frequenza, invece della trasformazione di Fourier dove viene scelta una dimensione di finestra fissa.

L'applicazione di Wavelets in modulatori e demodulatori OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) è necessaria, nel senso che OFDM è la tecnica di moltiplicazione più comunemente usato nella tecnologia odierna, come Wi-Fi, connessione Wi-MAX, LTE, per le sue caratteristiche di Ortogonalidad e Supporto Compatto.

Una delle ragioni principali per l'utilizzo di OFDM nei sistemi di telecomunicazione è che questa tecnica aumenta la robustezza contro la dissolvenza dalla selezione delle frequenze o da interferenze a banda stretta. L'OFDM viene generalmente implementato utilizzando FFT e IFFT. La trasformazione di Fourier rileva la presenza di una certa frequenza, ma non fornisce informazioni sull'evoluzione nel tempo delle caratteristiche spettrali del segnale. Molti aspetti temporali del segnale, come l'inizio e la fine di un segnale finito e l'istante di apparizione di una singolarità in un segnale transitorio, non possono essere analizzati adeguatamente dall'analisi di Fourier.

Resta da proseguire la strada per indagare i nuovi Wavelets Transforms, che fanno di modulatori OFDM di migliori prestazioni rispetto a quelli utilizzati nel presente lavoro. Ad esempio trasformazioni Wavelet come doppia densità o pacchetto Wavelet Complex Dual Tree.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Identificación del problema.

Ubicamos el tema de investigación dentro de la Ingeniería Eléctrica de acuerdo a lo siguiente:

Programa: Telecomunicaciones

Subprograma: Procesamiento de Señales

Línea de Investigación:

- Clasificación según el medio de transmisión: Inalámbrica
- Clasificación según el alcance: Wide Área Network (WAN)
- Clasificación por Tecnología de Ancho de Banda: OFDM
- Clasificación por Tecnología de Acceso: WI-FI, WI-MAX, LTE
- Clasificación por servicios: Transmisión de video, voz y datos, acceso a internet, cuarta generación en tecnología celular.

En función de la fragmentación propuesta se ha realizado una investigación en el programa de Telecomunicaciones que agrupa al subprograma de Procesamiento de Señales, la misma que a su vez agrupa a las líneas de investigación según el medio de transmisión, alcance, medio de transmisión, tecnología de ancho de banda y específicamente se hizo una investigación referente al “Modelo OFDM basado en Wavelets para reducir la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora”. Se puso énfasis en el problema de las interferencias temporales producidas al transmitir símbolos en los canales inalámbricos.

En un sistema de comunicación digital se busca un punto óptimo de operación; este consiste en transmitir y recibir datos a la mayor velocidad admisible con la mínima tasa de error de bit (BER) posible. La limitante principal para alcanzar este punto de operación está dada por el canal de comunicaciones, el cual tiene una respuesta física finita a unas señales de pruebas impulsivas (CIR) en el que el tiempo máximo τ_{\max} determina la transmisión tradicional a una tasa máxima de $1/\tau_{\max}$ para evitar la interferencia entre símbolos (ISI).

En un sistema de comunicaciones modulado tradicionalmente a medida que aumenta la tasa de transmisión mayor que $1/\tau_{\max}$, los datos se sobreponen unos a otros, de manera que el receptor no logra diferenciar bien los datos y comienza a caer en errores en la estimativa de la información. Con la modulación OFDM es posible transmitir y recibir datos satisfactoriamente a una tasa superior de $1/\tau_{\max}$.

Si no se pierde la Ortogonalidad y mientras permanezca un sincronismo perfecto, OFDM podría suministrar tasas de transmisión casi infinitas, sin embargo, dado los problemas típicos de su implementación y la distorsión impuesta por el canal se pueden mencionar las siguientes limitantes:

- El efecto Doppler en el canal quiebra la Ortogonalidad de las subportadoras aumentando la BER y disminuyendo el desempeño OFDM.
- El ruido de fase presente en las subportadoras es causado por que ellas no oscilan perfectamente y causan pérdida de sincronismo en el sistema.
- PAPR es la razón entre la potencia pico y la potencia media de la señal transmitida que genera unos desbalances en potencia entre cada subportadora degradando la señal transmitida.

Las limitaciones descritas anteriormente se deben a la implementación de la física de los semiconductores involucrados en el estándar respectivo y al medio de propagación móvil.

La Transformada de Fourier es ampliamente utilizada en el procesamiento y análisis de señales y con resultados satisfactorios en los casos en que estas señales son periódicas y lo suficientemente regulares, pero no ocurre lo mismo para el análisis de señales cuyo espectro varía con el tiempo (señales no estacionarias).

OFDM con Fourier requiere un prefijo cíclico para eliminar la ISI. Esto provoca sobrecarga que puede ser a veces muy grande para que el sistema sea eficaz. OFDM con Wavelet tanto en la modulación como en la demodulación es más efectiva en la reducción del ISI y la ICI. La Transformada de Wavelet ofrece una mayor supresión de lóbulos laterales.

1.2 Formulación del problema

General. -

¿De qué manera el uso de OFDM utilizando Wavelets permite reducir las Interferencias Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora?

Específico.

- 1- ¿En qué medida se reduce la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora al aplicar la Transformada de Fourier?
- 2- ¿En qué medida se reduce la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora al aplicar diversas Transformadas de Wavelet?
- 3- ¿Cuál es el modelo óptimo a partir de las diversas Transformadas de Wavelets para el Análisis de las Interferencias Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora?

1.3 Objetivos de la investigación

a) Objetivo General.

Determinar un sistema OFDM basado en Wavelets para reducir las Interferencias Intersimbólica e Intercanal en los sistemas Multiportadora.

b) Objetivo Específico.

- 1- Determinar los niveles de interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora al aplicar la Transformada de Fourier.
- 2- Determinar la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los sistemas Multiportadora producida por aplicación de diversas Transformada de Wavelet.
- 3- Identificar alternativas para elegir el modelo óptimo para el Análisis de las Interferencias Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.

1.4 Justificación

La justificación del presente trabajo de investigación, se basa en lo siguiente:

Por su naturaleza es necesario establecer comunicaciones fiables, seguras y rápidas. Sin embargo, es necesario acondicionar las señales a este medio.

El análisis de Fourier de una señal (supongamos temporal) permite determinar sus frecuencias, pero pierde la información de tipo temporal sobre la señal (no dice cuando aparece cada frecuencia). Lo que se puede hacer es subdividir la señal en ventanas, y analizar cada una de ellas. Esto nos da una información básica sobre el orden temporal en el que se dan las frecuencias. La resolución temporal y la resolución en frecuencias de una señal están acopladas [Principio de Incertidumbre similar al de Heisenberg: $\Delta t \Delta \omega \geq p$]. Fourier alcanza la máxima resolución espectral sacrificando la resolución temporal. Los Wavelets sí dan información simultánea de t y ω .

El Análisis de Wavelets está especialmente indicado para señales con pulsos o intermitencias: sucesos que ocurren de manera **no periódica**.

Fourier es “inestable” frente a señales de tipo intermitentes: si añadimos un impulso localizado en el tiempo a una señal, todo el espectro de Fourier se verá afectado, mientras que solo algunos coeficientes de wavelets se modificarán. Las técnicas de filtrado de ruido basadas en wavelets dan mejores resultados.

Por su magnitud es posible utilizar esta investigación en diferentes aplicaciones como DAB (Digital Audio Broadcasting), ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), DVB (Digital Video Broadcasting), PLC (Power Line Communications), WI-FI, WI-MAX, LTE.

Por su carácter científico para generar nuevas líneas de investigación estableciendo nuevas formas de transmisión, confiables y de calidad como desafío en el sector de las Telecomunicaciones. Enviar mayor cantidad de información, tener mayor capacidad de rechazo al ruido y mejorar el indicador de calidad de servicio o QoS, abren permanentemente nuevas líneas de investigación.

Por su trascendencia, este trabajo se justifica por su trascendencia porque aportará al desarrollo y al uso de las Telecomunicaciones en un lapso de tiempo significativo. Todos los grupos socioeconómicos se verán favorecidos ya que las

telecomunicaciones se emplean sin distinción alguna convirtiéndose en la era actual en un servicio básico.

Por su viabilidad tendrá los suficientes recursos financieros, humanos y materiales para poder concluir con éxito la investigación. El tiempo estimado para realizarla será de 18 meses. Se contará con la ayuda de los laboratorios de un Instituto de Investigación para la realización de la misma.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.

2.1 Marco Filosófico

Los cambios en la tecnología obligan a replantear el que y el porqué es necesario utilizar matemáticas más avanzadas para entender mejor el conocimiento relacionado con OFDM y es que son muy sensibles a los grandes cambios que se producen en las innovaciones trascendentales. Las Matemáticas es uno de los grandes soportes, en el caso de esta investigación, se trata de los Wavelets.

Al disponer de los avances realizados en los Wavelets en los últimos años, en ámbitos como compresión de imágenes, y en menor escala hacia los moduladores de OFDM, hizo necesario dedicarle un mayor esfuerzo en conocer e investigar la aplicación de esta matemática avanzada al procesamiento digital de señales y permitir mejorar los niveles de interferencia en los sistemas de comunicaciones. Para ello fue necesario la ayuda de los trabajos realizados por investigadores en este campo, así como el conocimiento de los moduladores de OFDM construidos bajo el esquema antiguo para poder realizar los cambios respectivos.

La teoría de Wavelets ha sido un paso transcendental en el avance vertiginoso de muchas disciplinas, en especial en temas relacionados al Procesamiento Digital de Señales; en toda esta secuencia el ser humano se ha ido adaptando a este nuevo entorno de maneras de comunicarse.

El conocimiento ha sido paulatino, se ha venido generando con el tiempo. Sin embargo, las necesidades y la realidad con la que se enfrenta el hombre son retos, que se han venido superando, trayendo nuevas corrientes que dieron y siguen dando luz a la problemática presentada. Así tenemos que desde los antiguos siempre hubo formas de establecer comunicación, ya sea en forma de señales de humo, con sonidos, o con personas destinadas a realizar la función de llevar los mensajes desde el punto de transmisión hacia el punto de recepción. De esta forma llegamos al descubrimiento de las ondas de radio y se establecieron comunicaciones en áreas más extensas. El avance en las comunicaciones nos lleva

al descubrimiento de las microondas, al satélite, fibra óptica, comunicaciones espaciales, cada una de ellas con sus propios problemas de implementación y desarrollo.

En cada transición se ha ido perfeccionando la cantidad y velocidad de los datos enviados; así como otros parámetros, tales como la fiabilidad, escalabilidad, redundancia. En este proceso, el conocimiento previo, ha sido fundamental para entender y comprender los distintos axiomas matemáticos, que hacen posible la eficiencia en las comunicaciones.

Las comunicaciones comunican personas, pueblos, equipos móviles; traen desarrollo, nos acercan más al mundo, en el sentido que la información la tenemos en tiempo real. El hombre es por naturaleza sociable, lo hace tanto por instinto o impulso como por la razón-es cosa natural a los hombres- como decía Aristóteles: Ser sociables y vivir en compañía de otros hombres, formando pueblos, ciudades, reinos, etc.

Este trabajo de tesis trata de incentivar en el lector la búsqueda de nuevos conocimientos, que ayuden a seguir innovando las teorías de las Telecomunicaciones, tales como banco de filtros que superen a los de reconstrucción perfecta, nuevas Wavelets con características superadas a las que se emplean hoy, así como nuevos algoritmos.

Hay que señalar toda innovación refleja cambios no solo tecnológicos, sino también de normativa, de esta manera nuestro país tiene que adaptarse a los cambios de la legislación mundial. Ello conlleva muchas veces a establecer secreto en las Telecomunicaciones y por otro lado una defensa férrea acerca al derecho a la comunicación.

2.2 Antecedentes del Estudio.

El trabajo precursor de Haar (alrededor de 1909) referido a bases no condicionadas en espacios funcionales clásicos tuvo un cariz matemático y fue continuado por Goupillard, Grossman y Morlet con la formulación (1982) de lo que hoy se conoce como Transformación Wavelet Continua (CWT) para el análisis de ondas sísmicas en la prospección petrolífera. La introducción de las

Wavelets Discretas (DWT) es debida a Strömberg (1983), siendo importante el aporte de la belga Ingrid Daubechies con sus Wavelets Ortogonales de Soporte Compacto. La estructuración del Análisis Multiresolución por parte de Mallat (1989), y la interpretación tiempo-frecuencia de la CWT debida a Delprat (1991), continúa siendo fecundado por la intensa labor de Coifman, Graps, Meyer y Aboufadel, entre otros investigadores.

Las Transformadas Wavelet han sido adoptadas como herramientas para un vasto número de aplicaciones de naturaleza diversa, reemplazando a la Transformada de Fourier convencional. Otras áreas que han experimentado este cambio son: Procesamiento de imágenes, análisis de señales médicas, análisis de proteínas y de ADN, climatología, topografía y geografía, reconocimiento del habla, gráficos computacionales, Procesamiento de Señales y Análisis Multifractal.

A continuación, un recuento histórico de la secuencia de los estudios realizados:

- 1807 (1822) –Joseph Fourier indica que toda función periódica puede ser expresada como una suma infinita de senos y cosenos de distintas frecuencias. [8]
- 1909 El matemático húngaro Alfred Haar descubre una base de funciones que con el tiempo demostrarán ser los primeros Wavelets. [1]
- 1946 El físico Dennis Gabor descompone una señal en paquetes de frecuencia-tiempo. [3]

1971 Weinstein y Ebert propusieron el uso de la Transformada Discreta de Fourier(DFT) para realizar la modulación y demodulación en banda base. Su trabajo se enfocó a introducir un procesado eficiente y eliminar los desajustes propios de un banco de osciladores (el banco de osciladores era necesario en el transmisor y en el receptor, un oscilador para cada uno de los subcanales, apareciendo serios problemas de sincronización y sintonización). Para combatir la ISI y la ICI ellos usaron tanto un intervalo de guardia entre símbolos como un enventanado de tipo coseno alzado en el dominio del tiempo. Este sistema no conseguía una Ortogonalidad perfecta entre subportadoras sobre un canal dispersivo, pero era ya una mejora considerable para la época [8].

- 1980 Peled y Ruiz introdujeron el prefijo cíclico o la extensión cíclica (CP o GI, período de guarda), que resolvía el problema de la Ortogonalidad. En lugar de usar un período de guarda vacío, ellos propusieron transmitir en ese espacio una extensión cíclica del símbolo OFDM. Esto efectivamente simula un canal que realizará una convolución cíclica, lo que implica Ortogonalidad sobre canales dispersivos cuando el CP es mayor que la respuesta impulsiva del canal. Esto, sin embargo, introduce una pérdida de energía proporcional a la longitud del CP, pero que queda justificada por una ICI nula [5].
- 1981 El ingeniero Jean Morlet encuentra el modo de descomponer una señal sísmica en cierto tipo de “Wavelets” de forma constante [7].
- 1984 Con la ayuda del físico cuántico Alex Grossman, Morlet desarrolla su modelo. El término Wavelet aparece por primera vez [1].
- 1985 Ives Meyer descubre la primera Wavelet Ortogonal Suave [1].
- 1986 Stephane Mallat muestra que los métodos de Haar, Gabor, Morlet, están relacionados por el mismo algoritmo de Wavelets [1].
- 1987 Ingrid Daubechies construye el primer Wavelet Ortogonal con soporte compacto. Las Wavelets pasan a ser una importante herramienta práctica de cálculo [9].
- 1990 David Donoho y Johnstone usan las Wavelets para eliminar el ruido de una señal [5].
- 1992 El FBI usa los Wavelets para comprimir su base de datos de huellas dactilares [1].
- 2004 Se constituye en estándar para el IEEE802.16-2004, es decir WIMAX [2]
- 2005 OFDMA es candidato para el 3GPP Long Term Evolution (LTE) [2]
- 2007 Se completó la primera implementación de LTE que incluye OFDM-MIMO, SC-FDMA y multi-user MIMO UPLINK [2].
- 2008 Se desarrollaron aplicaciones de Compresión de audio basados en codificación de subbandas Wavelets, trabajos realizados en la Universidad de Campiñas, Brasil.

- 2009, se realizaron investigaciones sobre modelamiento en sistemas RF, aplicando las Transformadas Wavelets, según las conferencias sobre microondas, Comunicaciones, Antenas y Sistemas Electrónicos, COMCAS IEEE INTERNATIONAL
- 2011, Se hicieron trabajos de Análisis de Estabilidad en Controladores PID utilizando Wavelets, estos trabajos fueron desarrollados en Méjico, en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- 2012, la Universidad Tecnológica Nacional en Argentina publicó un trabajo acerca de la Determinación de la Densidad de potencia irradiada por estaciones base GSM 1900 haciendo uso de la Transformada Discreta de Wavelet.
- 2013 El Instituto Aeronáutico Argentino publicó en la IEEE Latin American Transactions, un Análisis Comparativo de Wavelets y EMD en el filtrado de señales de radar afectado por ruido marrón o browniano. (EMD: Empiric Mode Decomposition)
- 2015, La Universidad de San Martín de Porres en Perú, publicó un trabajo acerca del uso de Wavelets en reconocimiento de patrones de voz, utilizando entropía residual acumulativa y máquinas vectoriales de soporte.

Como se puede notar de los trabajos realizados, a partir de la Transformada de Fourier, se le dio mayor aplicación al OFDM en los sistemas de Comunicaciones y es bajo este esquema el que se ha venido procesando las señales en WI-FI, WIMAX y LTE, inclusive también en comunicaciones por líneas eléctricas. Con el estudio de los Wavelets, se abre un campo más amplio en diversos sectores de la tecnología. En el campo de las Comunicaciones se han realizado algunos trabajos en filtrado de ruido de la señal, pero no son de conocimiento amplio sino a un nivel muy básico. Es por ello la importancia de esta investigación, en donde se trata de incidir en las diferentes opciones que nos ofrece los Wavelets, para elegir una familia de ellas con las cuáles podamos aplicarlas a OFDM y conseguir de esa manera señales más limpias, con menos interferencias, es decir una mejor relación señal a ruido.

2.2.1 Estado del arte.

Se puede establecer que los trabajos realizados se han enfocado en su gran mayoría a la aplicación de la Transformada de Wavelets a comprimir Imágenes, sin embargo, en Telecomunicaciones se sigue utilizando la Transformada de Fourier excepto la tecnología aprobada por el grupo de trabajo de la IEEE IP1901 en diciembre de 2008 y cuyos documentos de este grupo de trabajo fueron liberados a inicios de 2011, fue presentada por Panasonic Corporation y Panasonic System Networks Co. Ltd. Para comunicaciones de banda ancha sobre líneas eléctricas (BPL). Esta tecnología de OFDM basada en Wavelets, propiedad de Panasonic es usada en productos de casa, tal como cámaras de video vigilancia, redes de computadoras, intercomunicadores. Asimismo, tiene aplicaciones en redes más grandes a nivel de oficinas, fábricas, y un amplio rango de industrias. Panasonic espera que esta tecnología se convierta en un estándar global para comunicaciones de alta velocidad por líneas eléctricas.

http://www.panasonic.net/pcc/products/plc/download/img/blpa300a_300kta.pdf

La información respecto a esta tecnología es muy reservada debido a que es una patente de Panasonic, es por ello la necesidad de investigar este problema. En España se han realizado investigaciones con modelo de redes neuronales basado en Wavelets aplicados en la predicción y aproximación de series en tiempo caóticas (García Treviño, Edgar, año 2006) y se ha avanzado mucho en las aplicaciones de Wavelets en PLC (Power Line Communication) a tal punto que cuenta con la principal empresa DS2 dedicada al diseño de circuitos para PLC.

En Colombia, existen grupos de investigación quienes han hecho grandes aportes a las aplicaciones de Wavelets, entre los que destacan: Análisis de la extracción de características de un sistema de reconocimiento de vocales basado en TW, Compresión de señales de voz en tiempo real usando paquetes Wavelet, Aplicación de la TW a los sistemas de comunicación, Implementación de la FFT sobre FPGA para sistemas de comunicación OFDM, Encriptación de señales binarias por medio de Wavelets.

En el caso de Perú las investigaciones han estado enfocadas a las técnicas de mejoras de estimación de canal para sistemas de comunicaciones no estandarizadas OFDM, compresión de señales de audio, compresión de imágenes.

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Fundamento Ontológico

En filosofía la Ontología es una disciplina que estudia lo que es; en tanto es y existe. Cabe precisar que toda cosa es un sistema o un componente de algún sistema, es decir que todo lo que existe y lo que es objeto de estudio para el científico, no es asistémico, las cosas u objetos están relacionados a los sistemas, Las pautas Ontológicas tienen que ser tomadas en cuenta al momento de realizar cualquier tema de investigación. Para el caso de esta Tesis, los conceptos y subsistemas más importantes son los siguientes:

Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM, Constituye un caso particular de las Modulaciones Multiportadora MCM (Multicarrier Modulation), en el cual un simple flujo de datos es transmitido sobre un número finito de subportadoras.

Funciones Ortogonales, Dos vectores son ortogonales en un espacio Hilbert H si su producto interno es cero.

Sistema Ortogonal, Si e_i, e_j son dos elementos del sistema y $i \neq j$, entonces $\langle e_i, e_j \rangle = 0$.

Sistema Ortormal, Si e_i, e_j son unitarios ($\|e_i\| = 1$, para todo e_i)

Delta de Kroenecker, Es una función de dos variables que vale 1 si son iguales y 0 si son diferentes.

Espacios Topológicos, Estudia el concepto de los conjuntos abiertos.

Conjuntos abiertos, Son los conjuntos A que satisfacen la condición de que, para cualquier x en A , existe un intervalo (a,b) tal que $x \in (a,b)$ incluido A .

Conjuntos cerrados, Complemento de los conjuntos abiertos.

Convergencia débil, Prueba la igualdad entre funciones o la convergencia de una sucesión de funciones con la ayuda de funciones en el espacio de Hilbert L^2 .

Convergencia fuerte, Estudia la convergencia usando la norma en el espacio L^2 .

Producto interno, Definido en un espacio vectorial determinará la posibilidad de definir un espacio de Hilbert.

Isometría, Los operadores T_b ; J_a ; E_c preservan el producto interno.

Grupos topológicos localmente compactos, Constituyen la base para obtener medidas invariantes por la izquierda y por la derecha. De esta manera obtenemos la fórmula de reconstrucción para la Transformada Wavelet.

Espacio de Hilbert L^2 , Espacio Hilbert de todas las funciones cuadrado integrables.

Operador Traslación, Sea h una función y $b, r \in \mathbb{R}, r > 0$. Denotamos por T_b a las traslaciones de h : $(T_b h)(x) := h(x - b)$

Operador Dilatación, Sea h una función y r , denotamos por J_a a las dilataciones: $(J_a h)(x) := h(rx)$.

Wavelet, Familias de funciones que se encuentran en el espacio y se emplean como funciones de análisis, examinan a la señal de interés para obtener sus características de espacio, tamaño y dirección y son generadas a partir de funciones madre.

Wavelet madre, Es una función localizada, perteneciente al espacio, que contiene todas las funciones con energía finita y funciones de cuadrado integrable definidas.

Coefficientes de filtro, Coeficientes de función de escala y Wavelet Madre.

Wavelet discreta, Puede obtenerse de la CWT restringiendo los parámetros de escalado y translación a valores discretos.

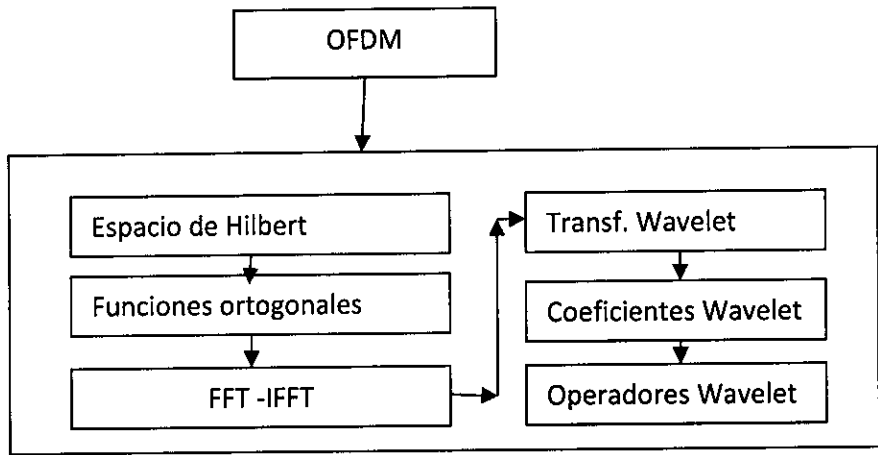
Wavelet Continua, Es un operador lineal que asocia con cada señal de energía finita y con una función particular denominada Wavelet Madre, elegida convenientemente en función de la señal, un número real o complejo, una vez seleccionado el instante y la escala de observación.

Wavelet Ortogonal, conjunto de funciones ortogonales entre sí que representan la señal.

Wavelet Bi-ortogonal, La TW asociada es invertible pero no necesariamente Ortogonal.

Taxonomías.

FIGURA N° 2.1
ÁRBOL JERÁRQUICO



El árbol jerárquico que sirve para clasificar los conceptos que van a dar origen a la investigación, está ordenada en la taxonomía anterior. La Modulación OFDM requiere conocer desde los espacios de Hilbert hasta los conceptos de Wavelets. La Transformada de Fourier aplica tanto a la Transformada rápida como la Transformada inversa de Fourier. De la misma forma la Transformada de Wavelet utiliza la Transformada Continua como la Discreta de Wavelets.

FIGURA N° 2.2
APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

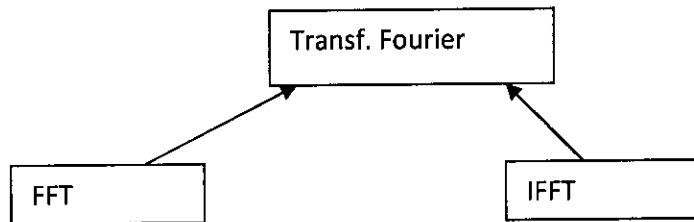


FIGURA N° 2.3
APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE WAVELET

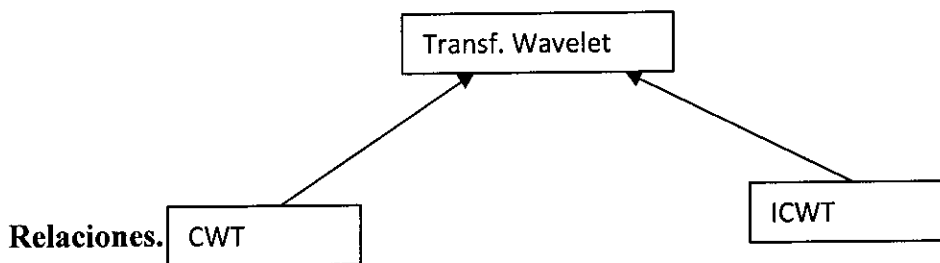


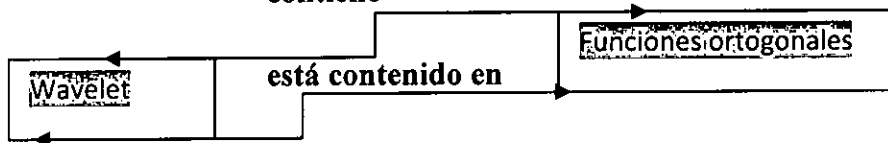
FIGURA N° 2.4
RELACIÓN ENTRE LA MODULACIÓN OFDM Y WAVELETS
contiene



Está contenido en

En la figura anterior se muestra la relación existente entre la modulación OFDM y los Wavelets. OFDM contiene Wavelets y a su vez estos están contenidos en OFDM.

FIGURA N° 2.5
RELACIÓN DE LOS WAVELETS CON LAS FUNCIONES ORTOGONALES
contiene



En la figura anterior se muestra que los Wavelets contienen a las funciones ortogonales y estas a su vez están contenidas en los Wavelets.

Cada elemento considerado en esta tesis tiene una explicación y una finalidad, asociados con subsistemas y sistemas necesarios para una buena investigación científica y tecnológica, donde el conocimiento de Transformadas de Wavelets hace que el funcionamiento de este sistema sea más eficiente y confiable y en consecuencia conseguimos solucionar problemas de la realidad.

2.3.2 Fundamentos Epistemológicos.

En años anteriores se ha venido utilizando las comunicaciones con niveles aceptables de interferencias, o relaciones aceptables de señal a ruido. Sin embargo, al aumentar el ancho de banda, y la cantidad de información transportada por los canales de comunicaciones, este indicador se hace más crítico de conservar.

La idea fundamental de esta investigación ha sido establecer un modelo OFDM basado en Wavelets de tal forma que el nivel de interferencias disminuya considerablemente en el proceso de transmitir información en los diferentes medios o canales de comunicaciones. Es decir, el algoritmo es de mejor performance que los algoritmos tradicionales basados en Fourier e inclusive dentro de la misma familia Wavelet; este algoritmo suprime las interferencias ISI e ICI con mejores resultados que los descritos anteriormente.

La forma en que conoceremos el objeto de estudio está basada en un método teórico, en el sentido de la aplicación de las matemáticas basadas en Wavelets en los algoritmos de OFDM. Se hizo uso de la simulación en Matlab versión 15 para establecer las curvas de comparación entre los distintos algoritmos y que permiten validar la hipótesis.

La aportación fundamental de esta Tesis Doctoral es la propuesta de un método de modular las señales de una manera diferente a la que se venía haciendo, pero que sea compatible con el estándar. Los beneficios se darán al obtener una comunicación más clara, nítida y todo ello significa un beneficio para el usuario.

2.3.3 Fundamentos Metodológicos.

La estrategia empleada en esta investigación ha sido en orden progresiva y escalonada, hasta llegar a contrastarla hipótesis. Ello significó realizar estudios preliminares, y luego descriptivos, explicativos.

Investigación preliminar o exploratoria. Para el desarrollo de esta tesis se estableció un horario semanal de dedicación exclusiva contando con el soporte de profesionales de ciencias matemáticas y siguiendo el Reglamento de la Universidad Nacional del Callao según Resolución Rectoral N° 826-2016-R y Directiva N° 009-2016-R para la presentación de Planes de Tesis y trabajos de Tesis de Posgrado.

La etapa inicial consistió en conocer y explorar todo el conjunto de fuentes como libros, artículos científicos, revistas, publicaciones y boletines diversos, y en general toda información útil. La relación de libros y material consultado aparece en el capítulo IX de las referencias bibliográficas.

Se realizó consultas directas a expertos o especialistas en la materia, que suelen tener un buen conocimiento del material existente.

Investigación descriptiva. En esta etapa se seleccionó el material de acuerdo al tema específico; es decir se estableció diferencias entre el material exclusivamente de Transformadas Wavelet, Diferencias entre las Transformadas Wavelet Discretas y la Transformada de Fourier, Transformada Wavelet Packet y su diferencia con respecto a las Transformadas Discretas Wavelet, Transformada DUAL TREE COMPLEX WAVELET TRANSFORM DTCWT y su diferencia, o ventaja con respecto a otras transformadas. El material correspondiente a la información base de esta investigación, comprende lo referente a Espacios Euclidianos, Espacios de Hilbert, Ortogonalidad y Ortonormalidad.

Investigación explicativa o causal. En esta parte, se elaboró el algoritmo con condiciones óptimas y que es el núcleo de toda la investigación, basado en la información reunida, el aporte de profesionales experimentados en el tema y la experiencia del autor para clasificar y decidir sobre un modelo que signifique un aporte a las Telecomunicaciones.

2.4 Definiciones de términos básicos.

Vector Espacio, es un conjunto $V=\{v_i\}$, donde dos vectores v_i pueden sumarse para formar un tercer vector y del mismo modo un escalar a_i se puede multiplicar con un vector v_i para formar un tercer vector.

Base, se forma a partir de un subconjunto $\{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ perteneciente a V , donde los vectores v_i son linealmente independientes.

Base ortogonal, el producto interno de dos vectores pertenecientes a V , $\{v_i/v_k\}$ es cero para $i \neq k$; es decir $\int_{t_1}^{t_2} v_i(t) v_k(t) dt = 0$

Base Ortonormal, si el producto interno de un vector consigo mismo es igual a 1;

$$\langle v_i, v_k \rangle = \int_{t_1}^{t_2} |v_i(t)|^2 dt = 1$$

Complemento Ortogonal, Si V_0 es un subconjunto del vector espacio V_1 , se define el Complemento Ortogonal W_0 , como el conjunto de todos los vectores de V_1 que son Ortogonales a cada elemento de V_0

Momentos de desvanecimiento permite conocer la forma de la Wavelet y es un parámetro para saber qué tan hábil es la Wavelet para suprimir un polinomio dado.

Orden de la Transformada Wavelet está dado por el número de momentos de desvanecimiento que existan.

Soporte Compacto propiedad de que la Wavelet sea de duración finita, lo que permite una menor complejidad en los cálculos, menor resolución en el tiempo y pobre resolución en frecuencia.

Simetría propiedad que permite que los filtros sean de fase lineal.

Análisis de Multiresolución cada componente de frecuencia es analizada con una resolución diferente.

Desplazamiento Doppler Consiste en un cambio en las frecuencias recibidas respecto a las transmitidas cuando existe un movimiento relativo entre transmisor y receptor.

Medidas de Haar es una manera de asignar un "volumen invariante" a los subconjuntos de grupos topológicos localmente compactos y de definir enseguida una integral para las funciones sobre esos grupos.

2.5 Abreviaturas utilizadas.

1-D One Dimensional

2-D Two Dimensional

FT Fourier Transform

DFT Discrete Fourier Transform

FFT Fast Fourier Transform

WT Wavelet Transform

DWT Discrete Wavelet Transform

MRA Multi-Resolution Analysis

WP Wavelet Packet Transform

STFT Short Time Fourier Transform

CoWT Continuous (Analog) Wavelet Transform

CWT Complex Wavelet Transform

FIR Finite Impulse Response
GUI Graphical User Interface
SDW Symmetric Daubechies Wavelets
DT-DWT Dual Tree Discrete Wavelet Transform
PCWT Projection based Complex Wavelet Transform
OHCWT Orthogonal Hilbert Transform Filterbank based Complex Wavelet Transform
MSE Mean Square Error
RMSE Root Mean Square Error
SNR Signal to Noise Ratio
PSNR Peak Signal to Noise Ratio
MSD Mean Square Distance
AWGN Additive White Gaussian Noise
BER Bit Error Rate
BPSK Binary Phase Shift Keying
BWA Broadband Wireless Access
CP Cyclic Prefix
DL Down Link
FDMA Frequency Division Multiple Access
ICI Inter-Channel Interference
ISI Inter-Symbol Interference
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
QAM Quadrature Amplitude Modulation
QPSK Quadrature Phase Shift Keying
SC Single Carrier
UL Up Link
WiFi Wireless Fidelity
WiMax Wireless Microwave Access

CAPÍTULO III

VARIABLES E HIPÓTESIS.

3.1 Definición de las variables.

Obtenemos las siguientes variables e indicadores de la siguiente forma.

Variable X= Uso de wavelets en modelos OFDM

Variable Y= Reducir las Interferencias Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.

Se establece una relación de causa- efecto entre las variables de investigación. La causa viene dada por la modificación del algoritmo que utiliza OFDM basado en las transformadas de Fourier por uno basado en las transformadas de Wavelets.

El efecto viene dado por la mejora de la performance en las comunicaciones.

3.2 Operacionalización de variables

La Matriz de congruencia nos muestra la relación de los indicadores con las variables X e Y, tanto para la Hipótesis general como para la Hipótesis Específica. (Tabla 3.1)

3.3 Hipótesis General e Hipótesis Específica

Hipótesis General.

Aplicando la Transformada de Wavelet en OFDM disminuimos en gran medida la Interferencia Intersimbólica e Intercanal producidas en los Sistemas Multiportadora.

Hipótesis Específica 1

Aplicando la Transformada de Fourier se consigue reducir la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.

Hipótesis Específica 2

Aplicando diversas Transformadas de Wavelets se consigue medir la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.

Hipótesis Específica 3

Es posible establecer un modelo óptimo luego de aplicar la Transformada de Fourier y las diversas Transformadas Wavelets, que reducen de mejor manera las Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.

TABLA 3.1
MATRIZ DE CONGRUENCIA

Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores
Objetivo general	Hipótesis general	<u>Variable X</u> Uso de Wavelets en Modelos OFDM. <u>Variable Y</u> Reducir las Interferencias Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.	- Tasa de aumento en requerimientos de ancho de banda. -Tasa de aumento en la velocidad de transferencia. - Factor de escala -Tasa de error de bit BER
Determinar un Sistema OFDM basado en Wavelets para reducir las Interferencias Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.	Aplicando la Transformada de Wavelet en OFDM disminuimos en gran medida la Interferencia Intersimbólica e Intercanal producidas en los Sistemas Multiportadora.		
Objetivo específico	Hipótesis específicas	Variables	Indicadores
-Determinar los niveles de Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora, al aplicar la Transformada de Fourier. -Determinar la interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora producida por aplicación de diversas Transformada Wavelet. - Identificar alternativas para elegir el modelo óptimo para el Análisis de las Interferencias Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.	-Aplicando la Transformada de Fourier se consigue reducir la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora. -Aplicando diversas Transformadas de Wavelets se consigue medir la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora. -Es posible establecer un modelo óptimo luego de aplicar la Transformada de Fourier y las diversas Transformadas Wavelets, que reducen de mejor manera las Interferencias Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.	Variable X -Aplicación de diversos tipos de Transformadas de Wavelets. -Aplicación de coeficientes de Wavelets. Variable Y Reducir la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora.	- Tasa de aumento en la Interferencia Intersimbólica -Tasa de aumento en la Interferencia Intercanal -Coeficientes o filtros pasa-bajos y pasa-altos.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo de investigación.

Esta investigación puede clasificarse como explicativa ya que el fin es determinar un modelo que produce una reducción en la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los sistemas Multiportadora cuando aplicamos un modelo OFDM basado en Wavelets y a la vez se analiza los mecanismos de su procesamiento al transmitirse en un Sistema de Comunicaciones.

El enfoque de esta investigación es Cuantitativa, ya que es posible medir sus efectos y probar la hipótesis. Hace uso del análisis causa-efecto y es desarrollada de una manera secuencial y deductiva en un orden riguroso

Temporal. El estudio es del tipo longitudinal. Su ejecución se inició el 1º de mayo de 2014 y su posible término será el 15 de agosto de 2017.

Espacial. La investigación se llevó a cabo en la ciudad de Lima, pero su aplicación se expande a nivel mundial.

4.1.1 Generalidades.

Señales Estacionarias

Son localizadas en el tiempo, ya que su frecuencia no varía, este tipo de ondas son estudiadas por medio del análisis de Fourier, que permite su descomposición en términos de sus componentes sinusoidales, es decir, transforma la señal de la base de tiempo a la base de frecuencia y de igual manera permite el paso del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, sin embargo, en este último se pierde información necesaria, que, por ser de carácter estacionario, no resulta relevante.

Si uno observa una señal estacionaria, durante unos momentos y después espera una hora y vuelve a observar, esencialmente se vería igual, eso es, su nivel general sería casi lo mismo y su distribución de amplitud y su desviación estándar serían casi lo mismo. Ejemplo, la maquinaria rotativa produce señales de vibración estacionarias.

Las señales estacionarias se dividen en señales deterministas y aleatorias. Las señales aleatorias son impredecibles en cuanto a su contenido de frecuencia y a su nivel de amplitud, pero todavía tienen características estadísticas relativamente uniformes sobre el tiempo. Una señal aleatoria es estacionaria cuando el tiempo no influye en el resultado al realizar distintas mediciones del mismo fenómeno y calcular cualquier propiedad estadística

Ejemplo, la lluvia cayendo en un techo, el ruido de un motor a reacción, turbulencia en los patrones de flujo de una bomba y cavitación.

Señales no estacionarias

En el caso de las señales con comportamiento no-estacionario, es decir, aquellas cuya frecuencia varía en el tiempo, al tener la señal producto de la transformada de Fourier resulta imposible realizar el paso al dominio del tiempo porque no permite determinar en qué momento presentan un cambio en la frecuencia.

Las Señales no estacionarias se dividen en continuas y transitorias. Ejemplos de señales no estacionarias continuas son la vibración producida por una perforadora manual, y el sonido de fuegos artificiales. Transitorias se definen como señales que empiezan y terminan al nivel cero y duran una cantidad de tiempo finita. Pueden ser muy breves o bastante largos. Ejemplos, el golpe de un martillo, el ruido de un avión que pasa, o la forma de vibración de una máquina arrancando o terminando de funcionar.

Espacios de Hilbert

El espacio H de Hilbert es un espacio vectorial cuyos elementos pertenecen al plano complejo C . Sea H el conjunto de elementos del espacio H . Los vectores complejos de este conjunto pueden ser sumados con las reglas usuales de la aritmética de vectores (propiedad aditiva) y multiplicados por escalares (números complejos).

El espacio H está dotado de una métrica y de un producto interno. Consideraremos en particular el espacio H formado por funciones vectoriales f_n .

Si f y g son funciones del conjunto H de H , el producto interno para este conjunto de funciones es un escalar definido por

$$\langle f, g \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(x)^* dx \quad (4.1)$$

Donde $g^*(x)$ es el complejo conjugado de $g(x)$. El producto escalar o interno de la función f con sí misma es un número real no negativo. En particular, si la función $f \in \mathbb{C}$, entonces satisface la condición:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (4.2)$$

Este espacio métrico recibe el nombre de Espacio de Hilbert $L^2[-\infty, +\infty]$.

Ortogonalidad - Bases Ortonormales

Se dice que dos vectores x e y son Ortogonales en un Espacio Hilbert H si su producto interno es cero:

$$\langle x, y \rangle = 0 \quad (4.3)$$

Se le llama conjunto Ortogonal a aquel conjunto de vectores en el cual cualquier par de sus elementos es ortogonal. Además, este conjunto es Ortonormal si la norma de los vectores es igual a uno:

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} = 1 \quad (4.4)$$

Tasa de Error de Bit (BER)

Es el parámetro que se utiliza para representar el número de bits recibidos, que han sido alterados por el ruido, distorsión e interferencia. BER mide la performance completa del Sistema de Comunicaciones, incluyendo el transmisor, receptor y medio de Comunicación entre los dos.

Matemáticamente el parámetro es definido como:

$$\text{BER} = \frac{\text{Número de errores}}{\text{Número de bits enviados}}$$

BER es evaluado para diversos σ (varianza de ruido). Los ploteos son para BER vs $(\frac{1}{\sigma^2})$

Coefficientes y Series de Fourier

Los desarrollos en Series de Fourier, Ec. (4.5), tienen dos aplicaciones fundamentales:

(a) Representar una función $f(x)$ definida en el intervalo $(-c, c)$, para valores de x en ese intervalo, ó

(b) Representar una función periódica con período $2c$ para todos los valores de x .

La función $f(x)$ puede ser proyectada en una base Ortonormal de funciones $\{\phi_k(x)\}$, dela siguiente forma:

$$f(x) = c_1\phi_1(x) + c_2\phi_2(x) + \dots + c_k\phi_k(x) + \dots \quad (-c < x < c), \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.5)$$

Se espera que el desarrollo de $f(x)$ converja a la función $f(x)$.

Se puede demostrar que los coeficientes c_k de la suma son los coeficientes de Fourier de $f(x)$ con respecto a la base Ortonormal $\{\phi_k(x)\}$. Estos coeficientes pueden expresarse como:

$$c_k = \int_{-c}^c f(x)\phi_k^*(x)dx \quad k=1,2,\dots(4.6)$$

Siendo ϕ^* el complejo conjugado de ϕ .

La serie de la Ecuación. (4.5) con estos coeficientes es la Serie de Fourier genérica, correspondiente a la función $f(x)$, y se define como:

$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \phi_k(x)$$

Transformada de Fourier DFT y FFT

Para obtener una representación que pueda ser válida para todos los valores de x cuando $f(x)$ no es periódica, es natural intentar extender la representación anterior dejando que c tienda a infinito, lo que da lugar a la Transformada de Fourier.

La Transformada de Fourier de una función no periódica $f(x)$ está definida por:

$$F(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx$$

donde k es una variable real continua.

La función puede ser reconstruida a partir de sus componentes de Fourier, por medio de la transformada inversa de Fourier:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{ikx} dk$$

La Transformada de Fourier en $L^2 [-\infty, +\infty]$ satisface las siguientes propiedades:

- Es una transformación de Fourier uno-a-uno de $L^2 [-\infty, +\infty]$ en sí mismo.
- Preserva la norma,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} |F(k)|^2 dk$$

- Preserva el producto interno,

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) g(x)^* dx = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) G(k)^* dk$$

La Transformada de Fourier $F(k)$ de una función $f(x)$ de soporte finito se extiende entre $[-\infty, +\infty]$. Luego de aplicar cualquier algoritmo de análisis a $F(k)$ se pierde información al realizarse la antitransformación en un intervalo finito.

Transformada de Fourier por ventanas, o Transformada de Gabor,

Es necesario contar con una representación localizada en el tiempo y la frecuencia, como consecuencia de la desventaja presentada por el análisis de Fourier. De esta manera Gabor implementa el uso de la STFT (Short Time Fourier Transform), que consiste en analizar una pequeña sección de la señal a través de una ventana de longitud fija, llevando la información contenida en este pequeño intervalo del dominio del tiempo a la escala bidimensional de tiempo y frecuencia, donde se puede conocer cuándo y a qué frecuencia ocurre un suceso. Con la STFT se logra una mejor localización de la aparición de una singularidad en una señal. Pero solo se conocerá en qué intervalo de tiempo se produce la singularidad, debido a que la localización depende del ancho elegido para la función ventana. Además, los eventos no podrán ser resueltos si aparecen muy cerca unos de otros, ya que no será posible distinguir diferentes comportamientos dentro de una misma amplitud de ventana.

La expresión que nos permite este análisis es:

$$STFT(b, f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} g * (t - b) dt$$

Donde la variable b indica la posición en la que se hace el análisis.

La deficiencia de la STFT viene a ser el tamaño fijo de la ventana temporal, que impide analizar pequeños detalles en señales de frecuencia variable.

En la STFT una vez que el tamaño de la ventana es elegido, todas las frecuencias son analizadas con las mismas resoluciones de tiempo y frecuencia.

La señal $f(t)$ puede recuperarse mediante:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} STFT(b, f) e^{i\omega t} d\omega dt$$

La misma sintetiza la señal como la superposición integral de las funciones elementales $g(t - b) e^{i\omega t}$

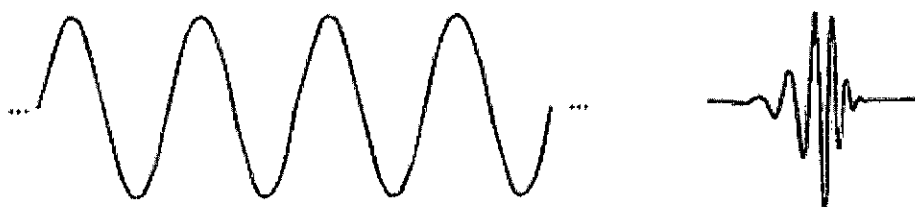
Cuando un sistema es lineal y los modos de vibración son modos propios del

sistema, el análisis de Fourier proporciona mucha información sobre los mismos. Pero si no es así, la descomposición en modos propios no da información interesante, ya que mezcla la información de los varios modos de oscilación.

Wavelets

Una Wavelet es una "pequeña onda" de duración limitada, es decir, su energía está concentrada en el tiempo alrededor de un punto, lo que proporciona una adecuada herramienta para el análisis de fenómenos transitorios, no estacionarios, variables en el tiempo y aquellos que presenten discontinuidades (Figura 4.1). Las Wavelets pueden ser irregulares y asimétricas

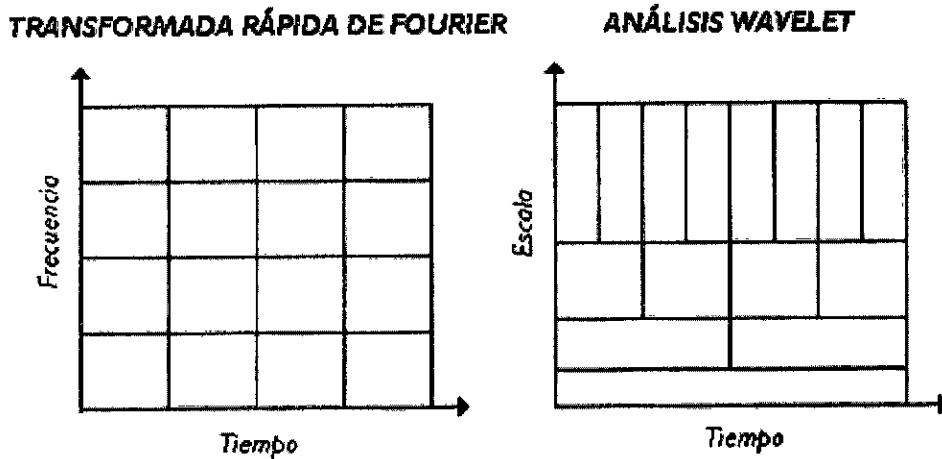
FIGURA 4.1
A) SEÑAL SENO B) WAVELET DAUBECHIES



Es así como se introduce el análisis Wavelet como herramienta que permite obtener una representación, descomposición y reconstrucción de señales, que presenten cambios abruptos en sus componentes de tiempo-frecuencia en forma instantánea, a través del análisis de Multiresolución con ventanas de longitud variable, adaptadas al cambio de frecuencia de la señal.

Es decir, esta técnica permite el uso de intervalos grandes de tiempo en aquellos segmentos en los que se requiere mayor precisión en baja frecuencia (dilatación), e intervalos más pequeños donde se requiere información en alta frecuencia (contracción). (Figura 4.2)

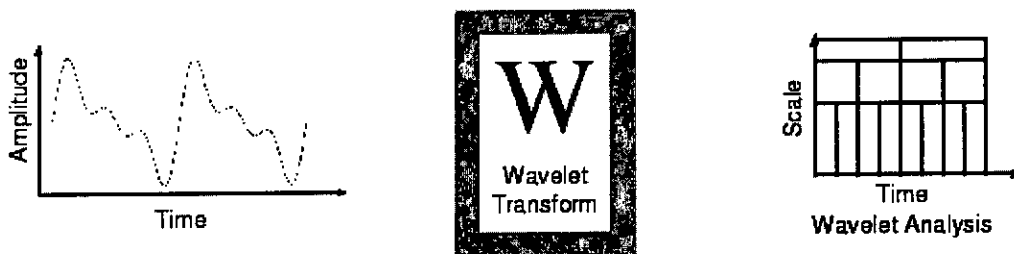
FIGURA 4.2
COMPARACIÓN ENTRE LA STFT (TIEMPO-FRECUENCIA) Y EL
ANÁLISIS WAVELET(TIEMPO-ESCALA)



A diferencia de Fourier, en donde las funciones base son senos y cosenos de duración infinita, en el análisis Wavelet la base son funciones localizadas en frecuencia (dilatación) y en tiempo (traslación).

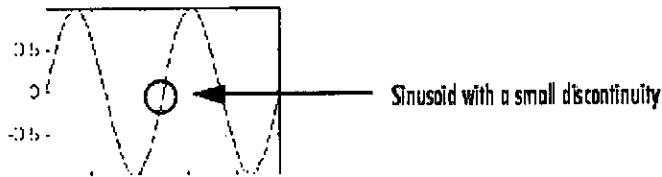
El análisis de Wavelet no utiliza una región de tiempo-frecuencia, sino una de tiempo-escala, Figura 4.3

FIGURA N° 4.3
APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE WAVELET



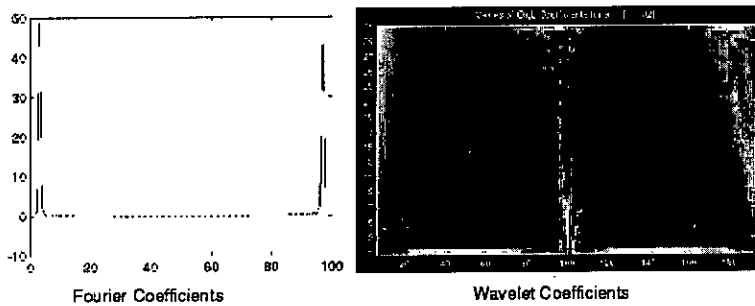
La más grande ventaja es su habilidad para realizar análisis local—es decir, analizar un área localizada de una señal más grande. Veamos un ejemplo, figura 4.4

FIGURA N° 4.4
DISCONTINUIDAD DE UNA SEÑAL SINUSOIDAL



Una gráfica de los coeficientes de Fourier muestra sólo un espectro plano con dos picos que representan una sola frecuencia. Sin embargo, una gráfica de los coeficientes de **Wavelets** muestra claramente la localización *exacta*, en el tiempo, de la discontinuidad. Figura 4.5

FIGURA N° 4.5
APLICACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE WAVELETS



Una Wavelet Madre es una función localizada, perteneciente al espacio $L^2(\mathbf{R})$, que contiene todas las funciones con energía finita y funciones de cuadrado integrable definidas

$$f \in L^2 \Rightarrow \int |f(t)|^2 dt = E < \infty$$

De esta manera se cuenta con una única ventana modulada y a partir de esta se genera una completa familia de funciones elementales mediante dilataciones o

contracciones y traslaciones en el tiempo $\psi_{a,b}(t)$, que cumplen con todas las condiciones de la forma:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

a, b son reales y a es diferente de cero y son generadas a partir de las funciones madre $\psi(t)$. A esa función madre se le agregan dos variables “b” viene a ser la traslación y “a” viene a ser la dilatación, lo que permite mover la señal en el tiempo. Para una escala de 0 la función se vuelve indeterminada.

La Wavelet Madre debe cumplir con la condición de admisibilidad

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty$$

Lo que quiere decir que la función $\psi(t)$ esté bien localizada en el tiempo, es decir, que la función oscile alrededor de un eje y su promedio sea cero, matemáticamente.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$$

Bases de Escala y Wavelet

Las funciones $\{\phi_{j,k}\}$ son llamadas funciones de escala y $\{\psi_{j,k}\}$ son llamadas funciones Wavelets.

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \phi(2^j t - k)$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k)$$

$$j, k \in \mathbb{Z}$$

El factor $2^{\frac{j}{2}}$ normaliza la función para que tenga una norma unitaria; j es un factor de dilatación y k es un factor de traslación.

Las funciones de escalas básica $\{\phi_{j,k}\}$ que se utilizan satisfacen la condición de Ortogonalidad, tal que las traslaciones discretas $\{\phi(2^j t - k)\}$ forman un conjunto ortonormal. De la misma forma sucede con las funciones de Wavelet $\{\psi_{j,k}\}$. Las funciones de Escala forman una base V_j y las funciones Wavelet forman otra base W_j entonces V_j y W_j satisfacen la condición de Complemento Ortogonal. La combinación de funciones de Escala y Wavelet forman dos bases Ortonormales para el siguiente nivel espacial ($V_0 + W_0$ forman la base de V_1 , $V_1 + W_1$ forman la base de V_2 , etc)

Transformada Wavelet Continua (C₀WT)

En el caso de la Transformada Wavelet la función y su Transformada se encuentran en un intervalo finito y, por lo tanto, no hay pérdida de información al realizar la antitransformación.

La Transformada Wavelet Continua permite el análisis de una señal en un segmento localizado de esta y consiste en expresar una señal continua como una expansión de términos o coeficientes del producto interno entre la señal y una Función Wavelet Madre $\psi(t)$.

El ancho de la ventana es cambiada conforme la transformada es calculada para cada componente espectral, la cual es probablemente la característica más significativa de la transformada de Wavelet.

La Transformada Continua de Wavelet de una señal $f(t)$ está definida por la siguiente ecuación:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt = \langle \psi_{a,b}(t), f(t) \rangle$$

Donde $f(t)$ es la función a analizar.

Esta transformada permite la representación de la señal $f(t)$ en el plano tiempo-escala.

La variable de escala lleva en sí la información de la dilatación y contracción de la señal, pero podría verse desde otro punto de vista donde lo que cambia es la frecuencia y con ello al dilatarse la frecuencia se reduce y al contraerse la frecuencia aumenta. Esta característica de las Wavelets es aprovechada para obtener la información de la señal y conocer sus componentes de frecuencia.

Transformada Wavelet Discreta (DWT)

Por la complejidad en el tratamiento numérico de la transformada Wavelet Continua, debido a la variabilidad en forma continua de los parámetros de escala como de traslación, es preferible discretizarla; es decir pasamos de un mapeo continuo a un espectro o conjunto finito de valores, a través del cambio de la integral por una aproximación con sumatorias.

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(2t - k)$$

Los coeficientes de desvanecimiento $\{h_k\}_{k=N}^M$ son válidos para $N \leq k \leq M$

La función de escala $\phi(t)$ es una función de soporte compacto contenida en el intervalo $[N, M]$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \phi(2t - k)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k (-1)^k h_{1-k} \phi(2t - k)$$

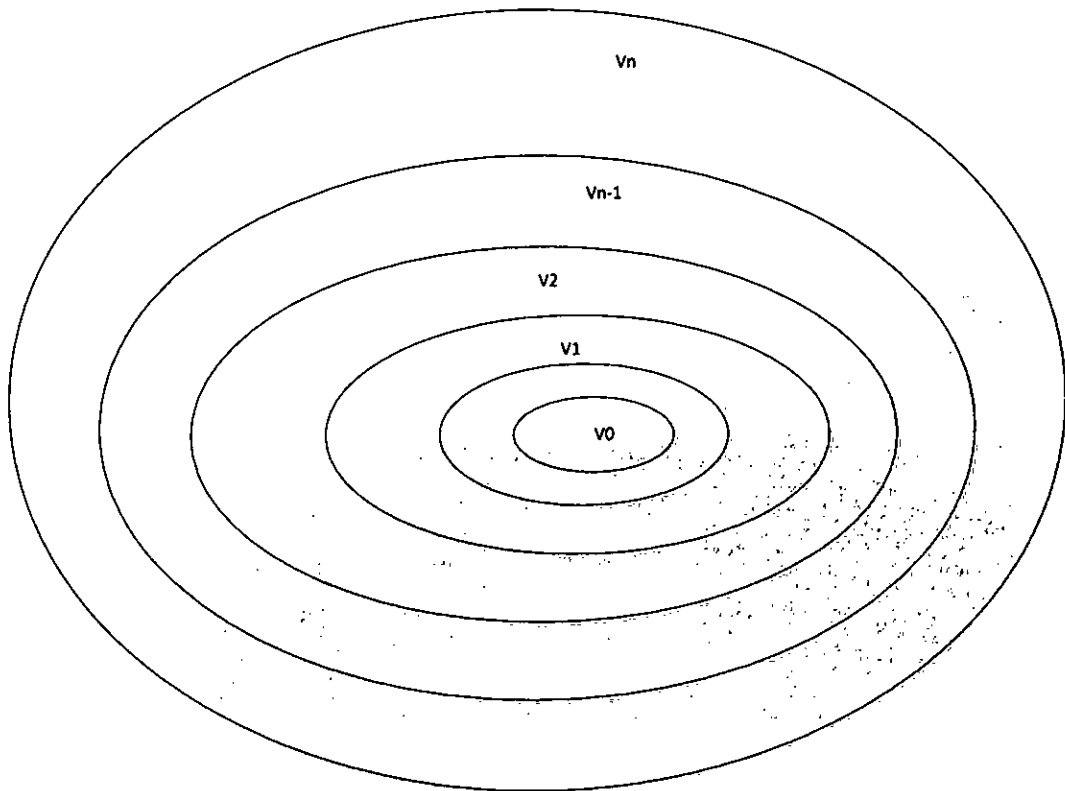
$$g_k = (-1)^k h_{N-k}$$

$$V_1 = V_0 \oplus W_0$$

$$V_0 = V_{-1} \oplus W_{-1}$$

..... $V_3 \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset V_3 \subset V_4$ Figura 4.6

FIGURA N° 4.6
SUBESPACIOS PARA ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN



SUBESPACIOS PARA ACERCARSE O ALEJARSE DE LA
SEÑAL DEL ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN

El término "función Wavelet" se refiere a una función Ortogonal o no Ortogonal. El término "base Wavelet" se refiere a un conjunto de funciones Ortogonales. El uso de una base de funciones Ortogonales implica el empleo de la Transformada Wavelet Discreta, DWT, mientras que el empleo de funciones no Ortogonales permite usar la Transformada de Wavelet Continua, CWT, o la Discreta, DWT.

Momentos de Desvanecimiento.

Este concepto es muy importante ya que nos permite conocer la forma de la wavelet y es un parámetro para saber qué tan hábil es la Wavelet para suprimir un polinomio dado. La suavidad de la Wavelet está limitada por el número de

momentos de desvanecimiento que tenga. El i -ésimo momento de la Wavelet se calcula con la siguiente integral

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x)x^i dx = 0$$

De lo anterior se determina que una función tiene v momentos de desvanecimiento si la integral es cero para $i = 0, \dots, v-1$. De donde se toma que todas las señales que tengan la forma polinomio del tipo:

$$y(x) = \sum_{m=0}^v c_m x^m$$

Tienen cero coeficientes de wavelet. El orden de una transformada de wavelet es normalmente dado por el número de momentos de desvanecimiento que existan.

Otra propiedad interesante de las wavelets es la de soporte compacto, que la considera de duración finita lo que permite una menor complejidad en los cálculos, mejor resolución en tiempo y pobre resolución en frecuencia. La propiedad de simetría permite que los filtros sean de fase lineal.

Modulación OFDM con Wavelet Multiescala.

La modulación OFDM con Wavelet Multiescala utiliza familias Wavelet Ortogonales y de soporte compacto para generar la señal a transmitir. Esta señal ocupa una banda de frecuencias (en banda base) ligeramente superior a la tasa de símbolo de la señal digital, tendiendo a la igualdad cuando el número de momentos de desvanecimiento de la wavelet es suficientemente alto (4 o más).

Interferencia Intersimbólica (ISI) dentro de un Sistema de Comunicación Digital.

La interferencia entre símbolos (ISI) es uno de los principales inconvenientes a la hora de aumentarla tasa de transmisión a través de canales dispersivos, en los

cuales su ganancia y su fase dependen de la frecuencia. Esta dependencia con la frecuencia deforma los símbolos que se envían, haciendo que interfieran unos con otros en el receptor. Estas limitaciones vienen dadas por el tipo de filtro utilizado, que convierten los pulsos rectangulares en pulsos distorsionados ocasionando interferencia con los pulsos subsiguientes, ello como consecuencia del ancho de banda finito del canal de transmisión. Mientras más pequeño sea el ancho de banda, los pulsos se dispersarán interfiriendo con el siguiente pulso transmitido. Esta interferencia puede atribuirse a 4 causas principales:

- Problemas de sincronismo

- Distorsión de amplitud

- Distorsión de fase

- Limitación del ancho de banda de canal.

Una posible opción para combatir la ISI consiste en ecualizar al canal en todas las frecuencias. Por ejemplo, para ecualizar el canal se ubica un filtro a la entrada del receptor. La cascada del ecualizador y el canal tiene una respuesta en la frecuencia deseada. Para eliminar la ISI completamente, el ecualizador diseñado debería invertir al canal. Esta solución tiene el problema de amplificación del ruido en altas frecuencias. Otra opción para combatir la ISI consiste en el uso de Modulaciones con Sistemas Multiportadora. Aplicaciones tecnológicas donde se utiliza esta modulación son los servicios xDLS, su versión inalámbrica llamada OFDM y Wi-Fi (norma 802.11a). Bajo este esquema de modulación, el canal es dividido en varios canales de menor ancho de banda, llamados subcanales. Si se logra que el canal tenga en cada subcanal respuesta en frecuencia constante, luego se evita la ISI entre los símbolos transmitidos en cada subcanal.

Interferencia Intercanal (ICI) dentro de un sistema de Comunicación Digital.

La ICI es una cierta interferencia que se genera entre varias portadoras, la cual, significaría que la señal de OFDM perdiera su principio de Ortogonalidad.

Una de las principales ventajas del sistema OFDM es su capacidad para trabajar en entornos inalámbricos, dada su robustez frente al multitrayecto. A su vez, uno

de los principales inconvenientes es su sensibilidad a desplazamientos de frecuencia producidos por el efecto Doppler.

El primer efecto que produce el canal es un ensanchamiento temporal en la señal recibida como consecuencia de los distintos retardos que experimenta la señal transmitida al atravesar cada uno de los trayectos del canal. El efecto Doppler consiste en un cambio de las frecuencias recibidas respecto de las transmitidas cuando existe un movimiento relativo entre transmisor y receptor. Esto se traduce en un desplazamiento de la frecuencia de la portadora percibida por el receptor.

Un problema conocido en OFDM es la sensibilidad al desplazamiento de frecuencia entre las señales transmitidas y recibidas, las cuales son causadas por el efecto Doppler en el canal, o por la diferencia entre los osciladores locales del transmisor y receptor. Este desplazamiento de frecuencia de la portadora origina pérdida de ortogonalidad entre las subportadoras; y las señales transmitidas sobre cada subportadora no son independientes entre ellas. Se pierde la ortogonalidad, lo cual ocasiona ICI, lo que degrada la performance del sistema.

El ensanchamiento y desplazamiento Doppler son dos de los principales causantes de la aparición de interferencia entre canal o ICI en los Sistemas Multiportadora.

4.1.2 Modelo de un Sistema de Transmisión-Recepción OFDM

Un transmisor cualquiera (Figura 4.7) siempre se divide en 3 etapas: la etapa de banda base, la etapa de banda intermedia, y finalmente la etapa de alta frecuencia o RF. Sin embargo, las dos últimas etapas son prácticamente iguales en todo transmisor, por lo que esta tesis se ocupa solo de la banda base, específicamente del modulador.

El Transmisor genera una forma de onda Continua a partir de una secuencia Discreta (Datos digitales) y el Receptor decodifica dicha secuencia Discreta a partir de la forma de onda recibida, la cual está afectada por el ruido del canal.

El proceso de Síntesis en el Transmisor consiste en lo siguiente:

Asumir que los símbolos descritos del mensaje son los coeficientes Wavelets de la señal a transmitir; es decir la función principal del Transmisor, es realizar una

Transformada Inversa Discreta Wavelet sobre los datos de entrada para obtener la forma de onda que representa la información.

El mecanismo de conformación es el siguiente:

Dividir cada bloque del flujo de información (bits o símbolos) en 2^U-1 partes iguales, donde U es el número de escalas o niveles de Resolución a utilizar. El primer subbloque de los 2^U-1 resultantes modula la escala más baja a usar, el segundo y tercer subbloque modula conjuntamente la siguiente escala; así sucesivamente hasta agotar el último subbloque.

El espectro de la señal modulada se caracteriza por que tiene una magnitud relativa muy baja en la región cercana a la frecuencia cero (d.c.), siendo completamente nula en la frecuencia $f = 0$, comportamiento que es independiente de la secuencia mensaje, pues es un rasgo implícito de la forma de onda usada para codificar la información (las wavelets, en este caso).

Dicha característica espectral es una ventaja al transmitir los datos en banda base, ya que la señal nunca tendría componente d.c. y en consecuencia jamás habría secuencias problemáticas (como las secuencias de solo ceros o solo unos), lo que evitaría el uso de dispositivos aleatorizadores (scramblers) para disminuir la probabilidad de ocurrencia de tales secuencias.

Por otra parte, si la transmisión se hace en paso banda, es decir, empleando traslación espectral, la señal transmitida tendría dos bandas laterales separadas entre sí por un intervalo de frecuencia donde la energía es prácticamente nula, dicho intervalo de energía está centrado en la frecuencia portadora y se denomina gap de energía (o hueco de energía).

La existencia del gap de energía permite eliminar fácilmente una de las bandas laterales en caso de que sean simétricas, y transmitir solo la banda lateral restante sin perder contenido de información, por tanto, la Modulación Wavelet Multiescala admite el uso de un esquema de transmisión en banda lateral única (single side band: SSB), lo que reduce a la mitad el ancho de banda ocupado, en comparación a un esquema en doble banda lateral (double sideband: DSB).

Los esquemas tradicionales como BPSK, MASK, MQAM, etc, utilizan formas de pulso con espectro en coseno alzado para conformar la señal en banda base, lo

cual produce una señal con un importante contenido en bajas frecuencias, aun cuando los símbolos son equiprobables. Esto hace que la eliminación de una de las bandas laterales sea prácticamente imposible a través de un filtro real, obligando a la transmisión en doble banda lateral. En ese sentido, la Modulación Wavelet Multiescala tiene una ventaja respecto a los esquemas tradicionales.

En la mayoría de las señales son las componentes de baja frecuencia las que le otorgan a la señal la mayor parte de su información, es una especie de identidad a la señal; mientras que las componentes de alta frecuencia incorporan señales más particulares. Las componentes de una señal se subdividen en:

Aproximaciones (baja frecuencia)

Detalle (alta frecuencia)

En el receptor, se da la operación inversa del transmisor, para recuperar la señal original.

FIGURA 4.7
DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DIGITAL

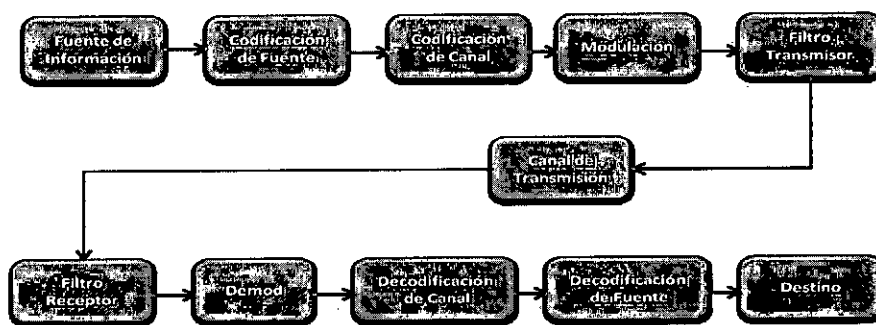
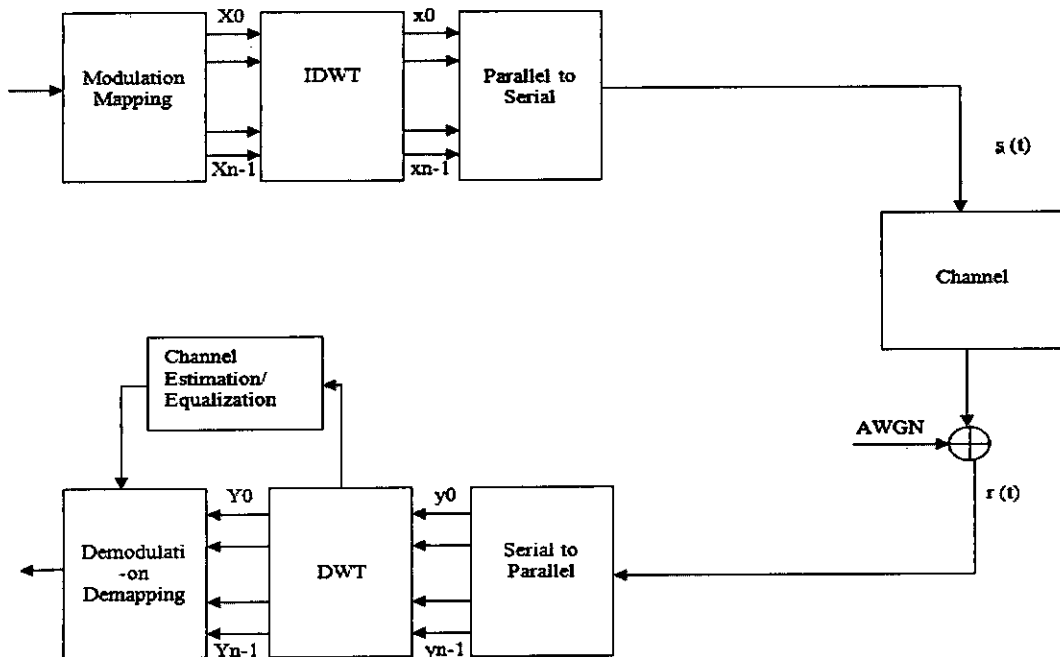


FIGURA 4.8
MODULADOR/DEMODULADOR OFDM



Las figuras 4.7 y 4.8 muestran los diagramas a bloques resumido de un transmisor digital y modulador/demodulador OFDM. El primer paso para generar una señal OFDM es codificar la señal. Enseguida se modula con alguna forma de modulación digital, ya sea BPSK (Binary Phase Shift Keying) o QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Luego el tren de símbolos resultantes de la modulación se convierte de serie a paralelo, lo cual genera N trenes de impulsos de menor velocidad (N veces menor). A cada uno de estos trenes de pulsos de baja velocidad se les realiza una transformada inversa de Fourier (IFFT) o Transformada Inversa de Wavelet (IDWT) pasando del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, generando un conjunto de subportadoras solapadas y espaciadas en saltos de frecuencia iguales a la inversa del periodo de símbolo ($1/T$). Utilizando espaciados entre portadoras de $1/T$ (o múltiplos de éste), se consigue que las portadoras sean ortogonales entre sí, lo que permite remodularlas a pesar de que exista un solapamiento espectral. Generalmente se cumple la condición de Ortogonalidad solo con que sean frecuencias armónicas, unas de otras. Es decir, una frecuencia que sea múltiplo de otra.

Finalmente se suman esas frecuencias Ortogonales y se modulan en una sola portadora, que es la frecuencia a la que se transmitirán.

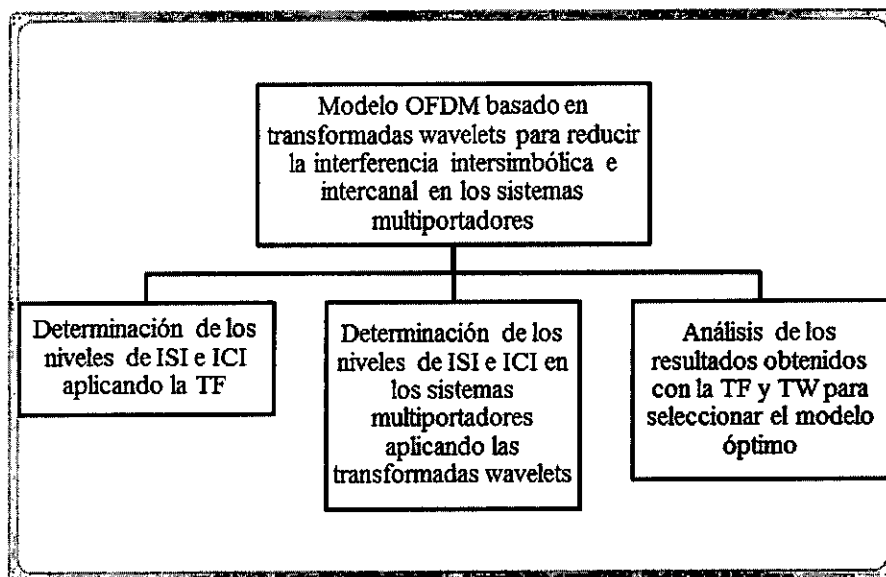
4.2 Diseño de la investigación.

De acuerdo a los objetivos planteados, la investigación está subdividida en lo siguiente:

1. Determinación de los niveles de Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora, aplicando la Transformada de Fourier.
2. Determinación de los niveles de Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora, aplicando diversas Transformadas de Wavelet.
3. Análisis de los resultados obtenidos con la Transformada de Fourier y las Transformadas Wavelets para seleccionar el modelo óptimo.

FIGURA N^o. 4.9

ESQUEMA DEL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN



En principio se hará el análisis aplicando la Transformada de Fourier a una señal para determinar los niveles de interferencia ISI e ICI, enseguida un análisis similar se hará empleando la Transformada Discreta Wavelets (DWT), la Transformada Packet Wavelet(WPT) y la Transformada Dual Tree Complex Wavelet Transform (DTCWT); para finalmente obtener resultados de la Tasa de

Error de Bit (BER) versus la Energía de bit, que tiene correspondencia con la ISI e ICI, es decir a menor BER, menores interferencias. Con ello seleccionamos la mejor Transformada que satisface nuestra hipótesis.

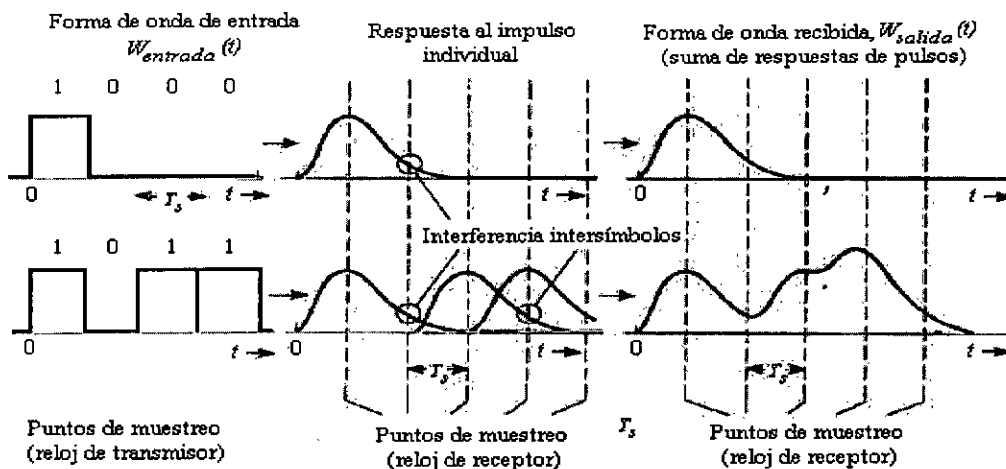
4.2.1 Determinación de los niveles de Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora, aplicando la Transformada de Fourier.

La Transformada de Fourier requiere que las funciones sean periódicas y regulares e incluye un prefijo cíclico para eliminar la ISI, lo que provoca sobrecarga disminuyendo la eficacia del sistema.

En un ambiente de Multitrayecto, la señal transmitida es reflejada por un sinnúmero de objetos. Como resultado de esto, múltiples versiones de la señal transmitida llegan hasta el receptor. Estas versiones llegan con un retardo en la información. Para disminuir la interferencia entre símbolos (ISI), un intervalo de guarda es introducido a cada símbolo de OFDM. La longitud de dicho intervalo es seleccionada de modo que sea mayor a la propagación retardada esperada.

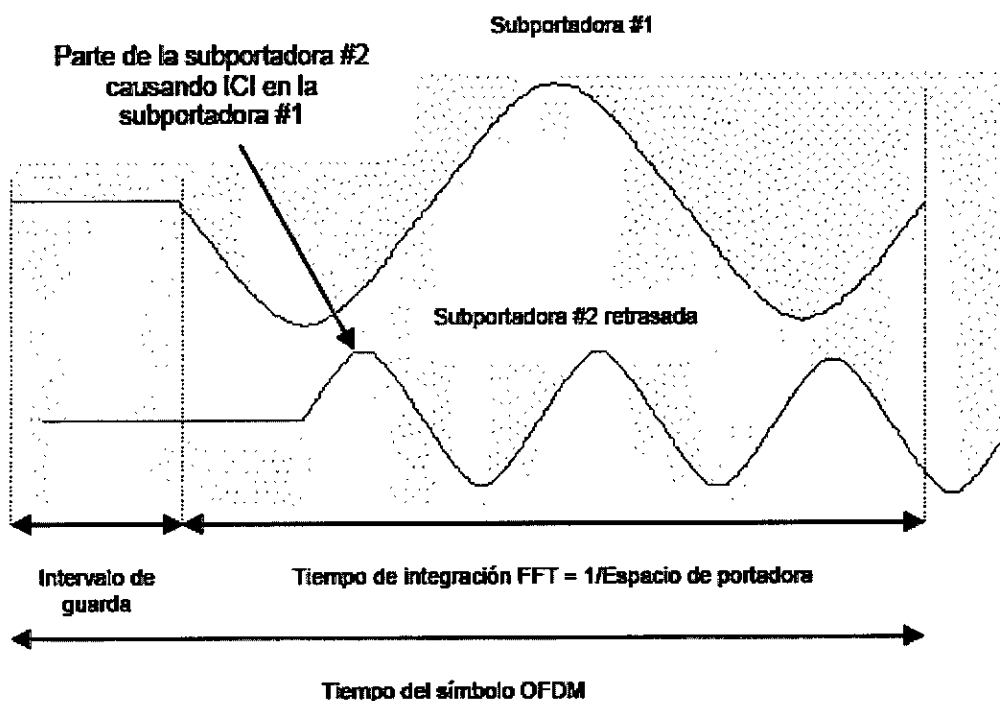
De modo, que, si un símbolo de OFDM llega con cierto retraso, el periodo de guarda generará un espacio suficiente para que este símbolo no vaya a interferir con uno subsiguiente. La figura 4.10 ilustra un típico caso de la interferencia entre símbolos (ISI).

FIGURA N° 4.10
EJEMPLOS DE INTERFERENCIA ENTRE SÍMBOLOS (ISI).



El efecto de la ICI se muestra en la figura 4.11. En este ejemplo, una subportadora 1 y subportadora retrasada 2 son mostradas. Cuando un receptor OFDM trata de demodular la primera subportadora, encontrará algunas interferencias de la segunda subportadora porque dentro del intervalo de la FFT, no existe un número entero de ciclos de diferencia entre la subportadora 1 y la 2. Al mismo tiempo existirá interferencia de la primera a la segunda subportadora por la misma razón.

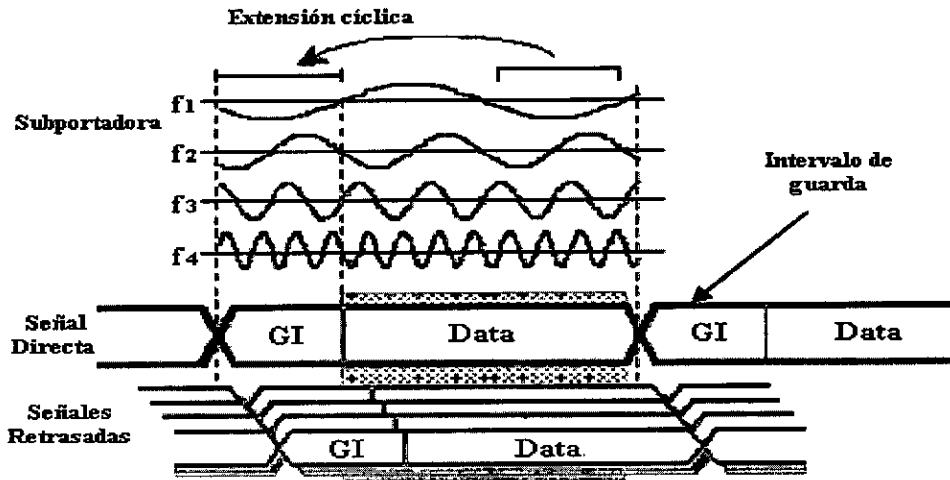
FIGURA N° 4.11
EFECTO DE MULTITRAYECTO CON UNA SEÑAL NULA DE INTERVALO DE GUARDA



Para eliminar la ICI, el símbolo de OFDM es extendido cíclicamente en el periodo de guarda, como se muestra en la figura 4.12. De esta manera se asegura que las réplicas retardadas del símbolo de OFDM siempre tengan un número entero de ciclos dentro del intervalo de la FFT.

Como resultado de esto, mientras el retraso sea menor al intervalo de guarda, no existirá la ICI.

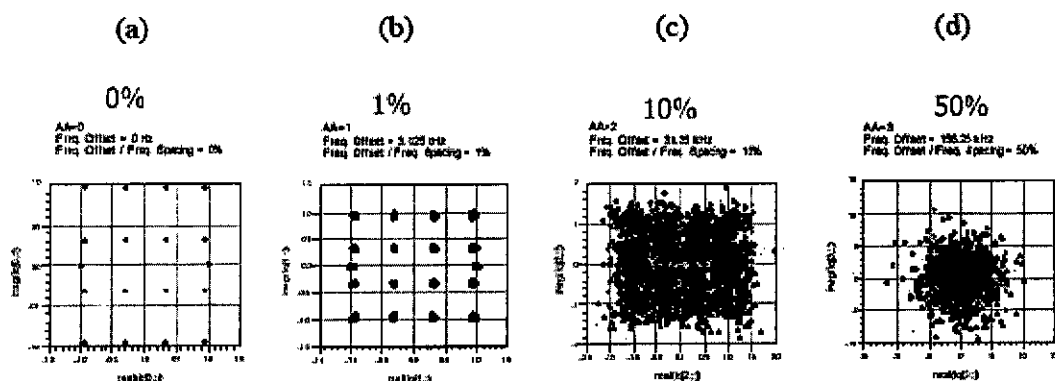
FIGURA 4.12
EXTENSIÓN CÍCLICA DEL SÍMBOLO OFDM



Las consecuencias de que el periodo de guarda sea insuficiente ante el retardo en un símbolo, están dadas en la figura 4.13, en donde se representa una simulación de un enlace de OFDM con 48 subportadoras, cada una de las cuales fue modulada con QAM-16.

La figura 4.13 (a), representa una constelación de QAM-16 sin distorsión alguna, es decir, cuando el periodo de guarda es mayor al símbolo retardado. La figura 4.13 (b), muestra a una constelación en donde el símbolo retardado sobrepasa al periodo de guarda en un 1% de la fracción del intervalo de la FFT. Como resultado de esto, las subportadoras ya no son ortogonales entre sí, sin embargo, la interferencia es tan pequeña que aún se puede ver una constelación recibida de manera razonable. En la figura 4.13 (c), el símbolo retardado supera en un 10% al intervalo de guarda, por lo que dicha constelación representa a la información de una manera inentendible. Por último, la figura 4.13 (d), representa la constelación de una señal OFDM en donde el retardo sobrepasa al intervalo de guarda en un 50%, por lo que la interferencia es tan grande que la tasa de error es inaceptable.

FIGURA 4.13
 CONSTELACIÓN DE QAM-16 QUE REPRESENTA A UNA SEÑAL DE
 OFDM CON 48SUBPORTADORAS



En el caso de un transmisor OFDM, el algoritmo es el siguiente:

$$x^m[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k^m e^{j2\pi n k / N},$$

N es el número de subportadoras;

α_k^m son los símbolos de data transmitida

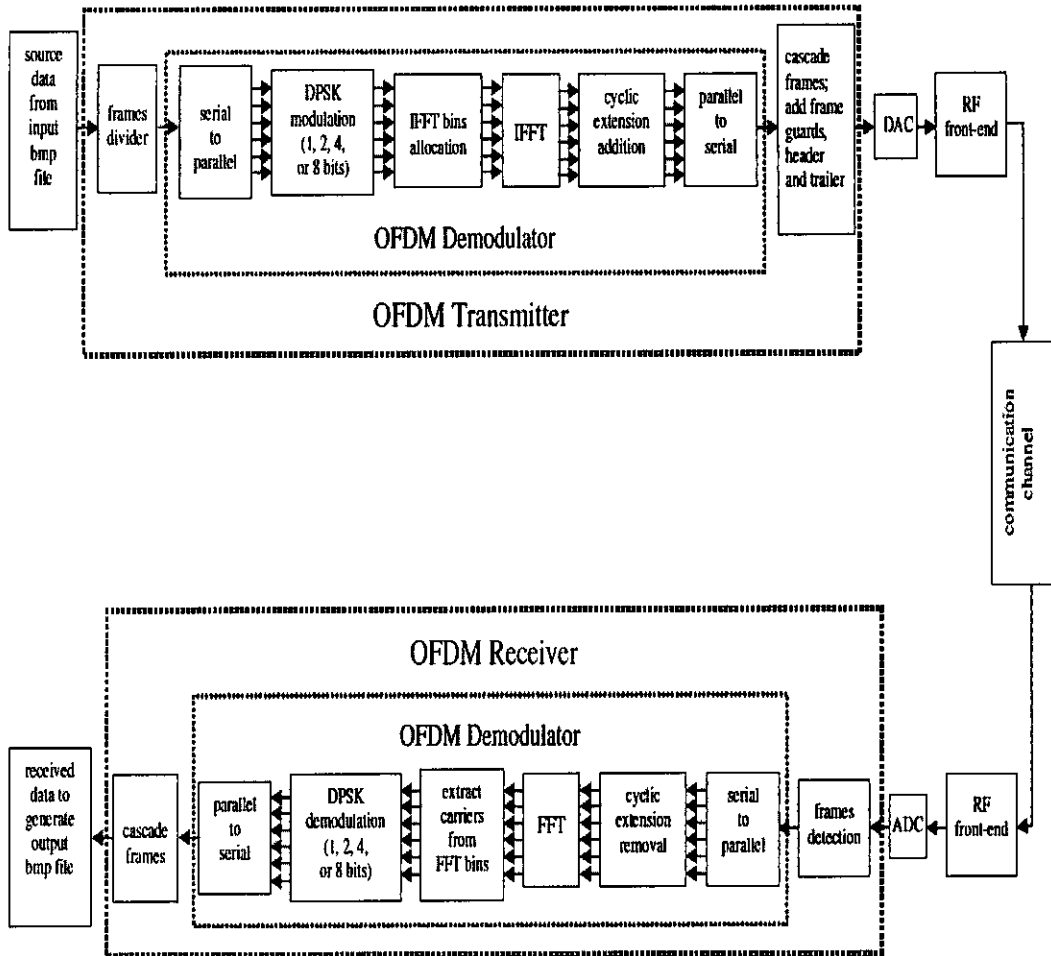
$n/N = \Delta f$; espaciamiento de frecuencia entre las subportadoras

Para Ortogonalidad: $\Delta f = 1/2T$

Para cualquier n, la forma de onda es la suma aleatoria de los α_k^m .

La entrada es la trama m^{th} de N símbolos QAM ($\alpha_0^m, \alpha_1^m, \dots, \dots, \alpha_{N-1}^m$).

FIGURA 4.14.
SISTEMA OFDM BASADO EN IFFT y FFT



4.2.2 Determinación de los niveles de Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora, aplicando diversas Transformadas de Wavelet.

Debido al problema del uso de la Transformada de Fourier para suprimir la ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora, surge otro tipo de modulación para generar la portadora, es así que desde los años 90 la Transformada Discreta Wavelet DWT y la Packet Wavelet WPT, han recibido cada vez mayor atención en las comunicaciones modernas y han sido ampliamente usadas en comunicaciones inalámbricas. La Transformada Packet Wavelet, WPT ofrece mejoras en la supresión de los lóbulos laterales y pérdida de Ortogonalidad permitiendo menor Interferencia Intersimbólica (ISI) e Interferencia Intercanal (ICI) que en los

sistemas convencionales OFDM.

Sin embargo, se han realizado mejoras con una nueva Wavelet denominada DTCWT (Dual Tree Complex Wavelet Transform). DTCWT tiene las mismas ventajas que WPT, pero DTCWT produce mejores resultados de reducción de PAPR que WPT.

4.2.2.1 Transformada Wavelet Discreta DWT

En la DWT cada nivel es calculado pasando solo los coeficientes de aproximación previos, a través de los filtros pasa-bajo y pasa-alto, separados por decimadores 2:1

Una señal análoga de energía finita $x(t)$ puede ser descompuesta en términos de funciones wavelet y escala de acuerdo a:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(n)\Phi(t-n) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d(j,n)2^{\frac{j}{2}}\psi(2^j t - n)$$

Los coeficientes de escala $c(n)$ y los coeficientes wavelet $d(j,n)$ son calculados según los productos internos.

$$c(n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\Phi(t-n)dt$$

$$d(j,n) = 2^{\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi(2^j t - n)dt$$

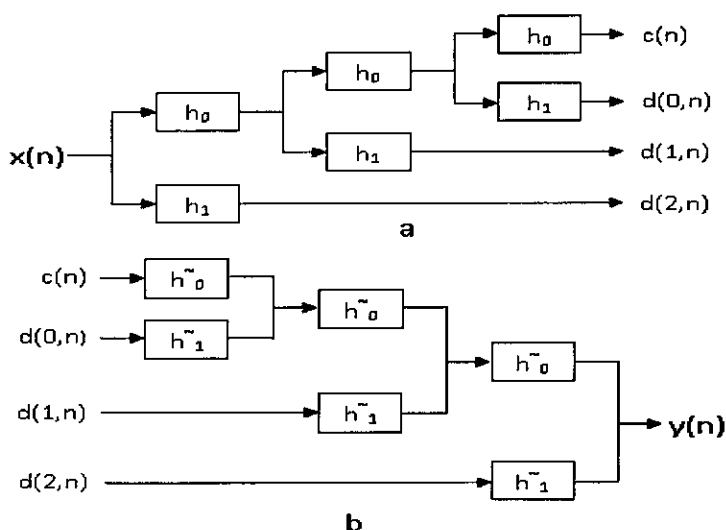
La discretización permite representar una señal en términos de funciones elementales acompañadas de coeficientes. Ellos proporcionan un análisis tiempo-frecuencia de la señal midiendo su contenido de frecuencia (controlado por el factor de escala j) en diferentes tiempos (controlado por el tiempo de desplazamiento n). Existe un algoritmo de complejidad lineal muy eficiente para calcular los coeficientes $c(n)$ y $d(j,n)$, basado en la descomposición en múltiples niveles (árboles de banco de filtros), denominados análisis (forward) y síntesis (inversa).

El proceso de descomposición (figura 4.15) puede ser iterado a fin de que una señal sea descompuesta en muchas componentes de resolución inferior, es decir se establece un árbol de descomposición de Wavelet. La señal de aproximación de primer nivel también se puede descomponer en una señal de aproximación y otra de detalle, pero ahora son de segundo nivel. Si repetimos el proceso sobre las señales de aproximación obtendremos n niveles.

Se aplican dos filtros, uno de baja frecuencia y otro de alta frecuencia. Con el de baja frecuencia se obtienen datos de aproximación y con el de alta frecuencia se obtienen datos de detalle. En adición se realizan las operaciones de downsampling (decimado) y upsampling (undecimado). El downsampling se aplica para no obtener 2 matrices del mismo tamaño a la original y consiste en extraer 1 de cada dos datos. El upsampling es el proceso alargador de una señal insertando un cero por cada dos datos de la señal. Al aplicar el downsampling sobre la señal se obtiene una distorsión denominada aliasing, en las componentes.

FIGURA 4.15

ARBOL DE FILTROS IMPLEMENTANDO LA TRANSFORMADA DISCRETA DE WAVELETS EN ANALISIS (a) Y SINTESIS (b)



Por esto hay que elegir bien los filtros de descomposición y reconstrucción ya que deben estar estrechamente relacionados y así eliminar la distorsión en el proceso

de la reconstrucción. La reconstrucción de la señal original se realiza a partir del vector de coeficientes obtenido en la descomposición.

El proceso de reconstrucción de la señal, también denominado síntesis se encarga de la obtención de la señal a partir de los detalles y aproximaciones. Este proceso se lleva a cabo con la Transformada Wavelet Discreta Inversa.

El proceso de descomposición de la señal también denominado Análisis (figura 4.15), se lleva a cabo con la Transformada Wavelet Discreta Directa.

En resumen, la DWT presenta las siguientes ventajas:

1. Buena compresión de energía de señal.
2. Reconstrucción perfecta con filtros de soporte
3. Sin redundancia; es decir la Transformada tiene la cantidad de datos que la señal original.
4. Bajo cálculo computacional

La DWT sin embargo sufre de tres problemas:

1. Varianza de desplazamiento; esto resulta de la operación de downsampling en cada nivel. Cuando la señal de entrada es desplazada levemente, la amplitud de los coeficientes Wavelets varían mucho.
2. Pérdida de Selectividad Direccional; conforme los filtros DWT son reales y separables la DWT no puede distinguir entre las direccionales diagonales opuestas (incapacidad para distinguir entre las características espectrales a $+45^\circ$ y -45°).
3. Ausencia de información de fase

A continuación, se representa un sistema basado en la transformada directa e inversa de Wavelet según la figura 4.16 y 4.17

FIGURA 4.16.
TRANSMISOR IDWT

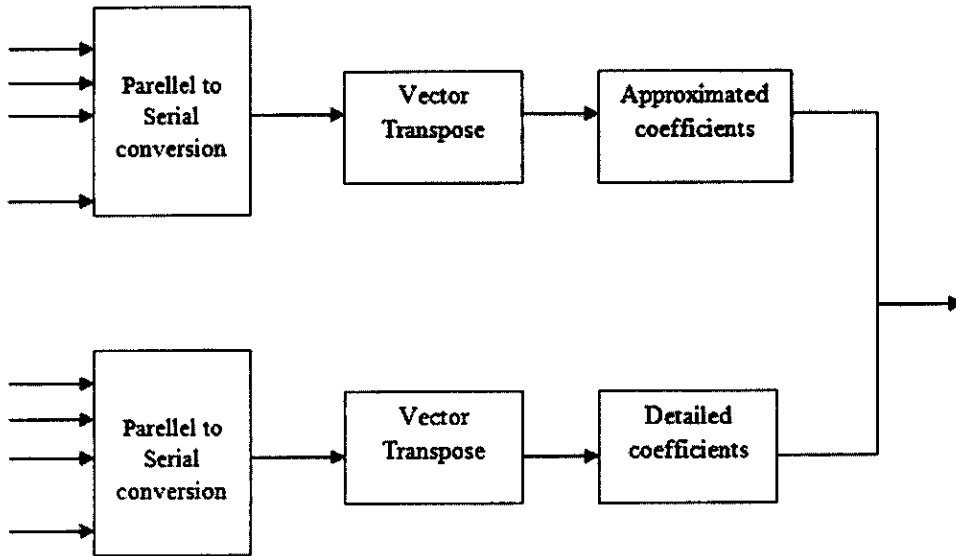
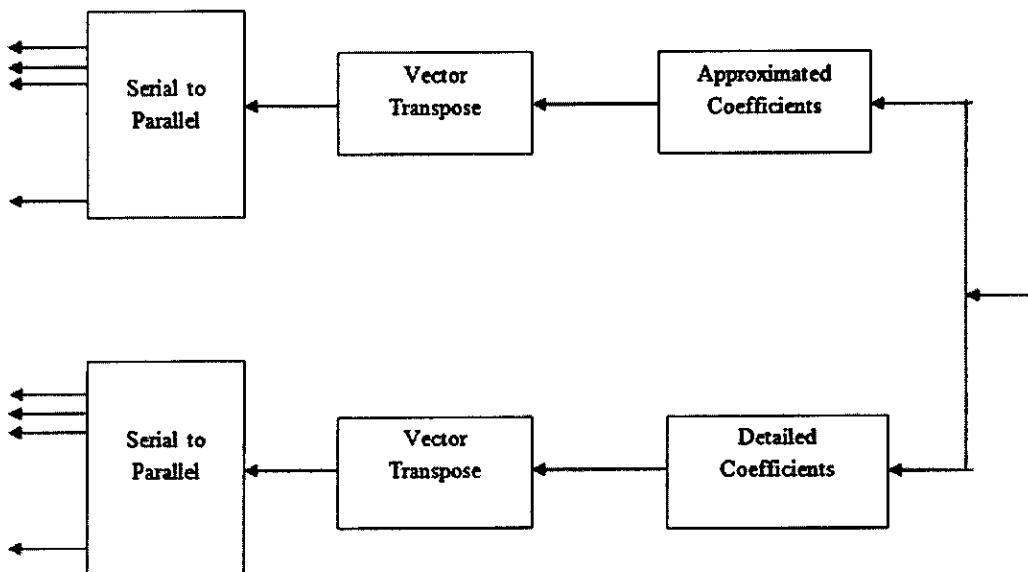


FIGURA 4.17.
RECEPTOR DWT



4.2.2.2 Transformada Wavelet Packet WPT

Es una transformada Wavelet donde la señal discreta en el tiempo (muestreada) es pasada a través de más filtros a diferencia de la DWT (Figura 4.18). En este caso cada nivel es calculado pasando los coeficientes de aproximación y de detalle por los filtros pasa-bajo y pasa-alto para crear el árbol binario.

El número de niveles depende de la resolución de frecuencia requerida. Para n niveles, 2^n conjuntos diferentes de Coeficientes Wavelets son producidos en contraposición a los $(3n+1)$ de la DWT.

El proceso de downsampling asegura que el total de coeficientes sea el mismo y no exista redundancia.

La WPT tiene la ventaja de poseer un alto grado de supresión de lóbulos laterales y pérdida de Ortogonalidad, lo que significa menor interferencia ISI e ICI en relación a la Transformada de Fourier y a la DWT.

Wavelet Packet no requiere el Prefijo Cíclico CP, y de acuerdo al estándar IEEE 802.16.3, tiene una ventaja del 20% en la eficiencia del ancho de banda, sobre las implementaciones típicas basadas en Fourier. En adición, al no requerir los tonos pilotos, le brinda 8% adicional de ventaja.

Sin embargo, el principal problema con la WPT es su pérdida de desplazamiento a la invariancia, lo cual indica que un desplazamiento de la señal de entrada, los coeficientes Wavelets varían sustancialmente. La información de señal puede que no sea estacionaria en las subbandas, de tal manera que la distribución de energía a través de las subbandas puede cambiar. Para superar el problema de la dependencia, una posible aproximación es omitir el submuestreo que causa la dependencia del desplazamiento. Existen técnicas que omiten o parcialmente omiten el submuestreo como, por ejemplo:

Las Transformadas Wavelet sin decimar UWT,

Los Bancos de Filtros Sobremuestreados;

Prolongamiento del Ciclo

Sin embargo, esas Transformadas son redundantes, lo cual no es deseable en Modulación Multiportadora, debido a su alta complejidad.

En WPM la señal transmitida $x[n]$, es construida como la suma de M funciones

Packet Wavelet ($\Phi_j[n]$), moduladas individualmente con símbolos QAM. Para cualquier n , la forma de onda es la suma aleatoria de símbolos $a_{i,j}$

$$x[n] = \sum_i \sum_{j=0}^{M-1} a_{i,j} \Phi_j[n - iM]$$

A continuación, se presenta un sistema de transmisor (figura 4.19) y receptor (figura 4.20) basado en la Transformada Packet Wavelet.

FIGURA 4.18
WAVELET PACKET TRANSFORM

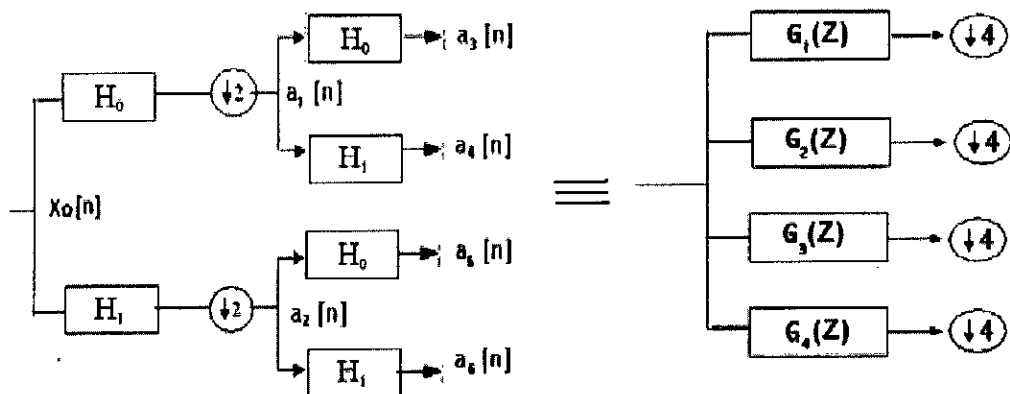


FIGURA 4.19
TRANSMISOR PACKET WAVELET

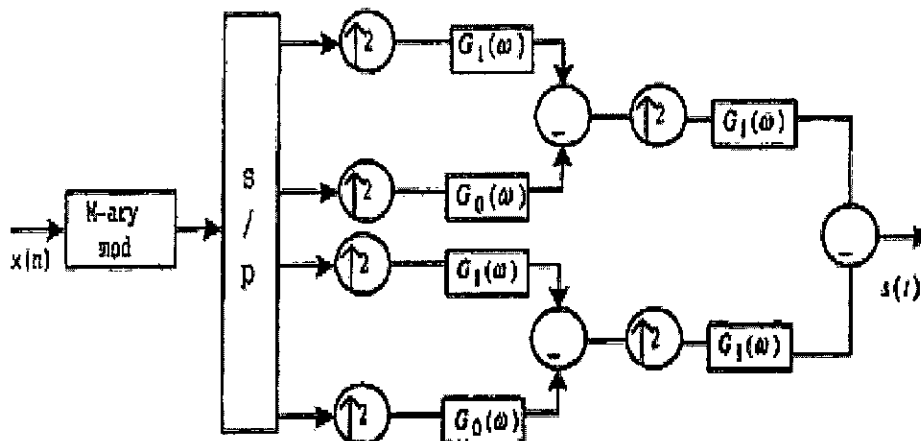
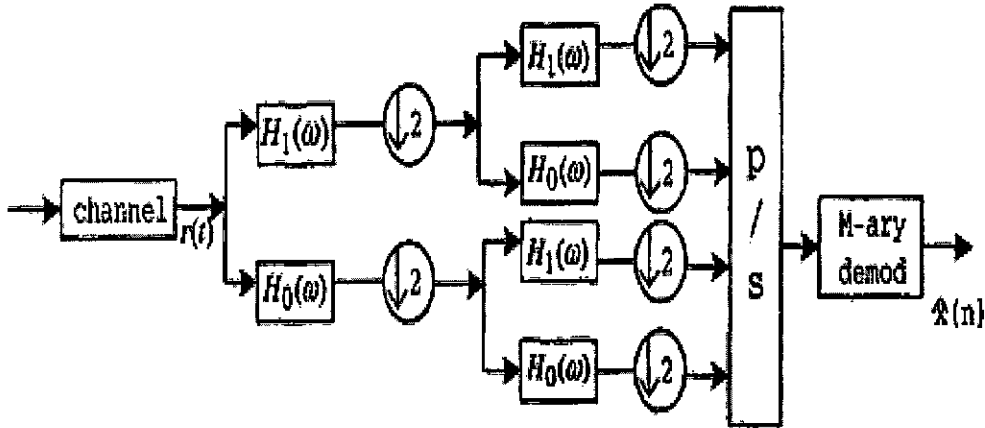


FIGURA 4.20
RECEPTOR PACKET WAVELET



4.2.2.3 Transformada Dual Tree Complex Wavelet Transform DTCWT

Esta transformada es interesante por varias razones:

Buena Selectividad Direccional

Baja redundancia; 2:1 en 1-D

Propiedades de desplazamiento a la invarianza mejorado

Simple de implementar

Reducción en los costos de procesamiento, inclusive menores que la DWT

Si la respuesta Wavelet es analítica, se reduce el ancho de banda a la mitad y por lo tanto se minimiza el aliasing o solapamiento. No se puede utilizar filtros complejos en la DWT para obtener Analiticidad y Reconstrucción Perfecta juntos, debido a los conflictos existentes en los bloques de reconstrucción de dos bandas. Los filtros analíticos necesitan suprimir las frecuencias negativas, en tanto los filtros de Reconstrucción Perfecta, usan respuesta de frecuencia completamente plana. Los Transceivers basados en Wavelets usan filtros de espejo en Cuadratura (QMF) en los bancos de filtros de análisis y síntesis.

El retardo de media muestra es la condición para la invarianza de desplazamiento.

El retardo de media muestra entre los filtros pasabajo G_0 y H_0 , están entrelazados de manera uniforme en todas las escalas y por lo tanto, la frecuencia de muestreo se duplica con eficacia en todas partes. La frecuencia de muestreo doble es

suficiente para eliminar virtualmente el solapamiento si se utilizan filtros de 12 o más taps. Si el solapamiento es eliminado del ramal del pasabajo en el bloque de reconstrucción de dos bandas, entonces también debe ser eliminado del ramal del pasaalto, ya que se consigue una reconstrucción perfecta. La eliminación del solapamiento, indica que cada subbanda puede representarse por una Función de Transferencia Z, única, y por lo tanto el filtrado es lineal, invariante en el tiempo LTI. En el nivel 1 de un Dual Tree finito, la diferencia de retardo debe incrementarse a una muestra para compensar la ausencia de diferencia de retardos en los niveles más finos o de detalle.

Para su implementación también se utiliza bancos de filtros (figura 4.21 y figura 4.22) sin embargo, este algoritmo opta por la utilización de Wavelets Complejos y no reales. Son 4 las razones principales:

1. Debido a las oscilaciones. Debido a que los Wavelets son funciones pasa-banda, tienden a oscilar positivamente y negativamente alrededor de un punto de singularidad, complicando la extracción de estos puntos.
2. Debido al cambio en la varianza. Es decir, un pequeño cambio en la señal, perturba significativamente la oscilación del Wavelet patrón.
3. El Aliasing. Debido a que los coeficientes Wavelets son calculados por iteración discreta en el tiempo y operaciones de submuestreo intercalada utilizando filtros pasa-bajos y pasa-altos no ideales.
4. Falta de Selectividad Direccional. La cuál complica el procesamiento de las características geométricas de la imagen como bordes y crestas.

Selectividad Direccional, es la capacidad para separar frecuencias positivas de las negativas.

La DTCWT tiene las mismas ventajas que la WPT, pero produce mejores resultados en la relación PAPR que la WPT.

La simulación muestra que el uso de la DTCWT supera el uso de la WPT y TF en los sistemas OFDM convencionales en términos de reducción del PAPR. La Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF) del PAPR para el OFDM basado en la DTCWT muestra una mejora de 2 dB sobre la modulación por WP (WPM) y el OFDM convencional.

En los sistemas OFDM basados en DTCWT la FFT y IFFT son reemplazadas por la DTCWT y la inversa DTCWT (IDTCWT) respectivamente.

La DTCWT considera dos filtros ($h_0(n)$, $h_1(n)$) para la parte superior del árbol del banco de filtros, donde $h_0(n)$ es el filtro pasa-bajo y $h_1(n)$ es el filtro pasa-alto. Para la parte inferior considera ($g_0(n)$, $g_1(n)$), siendo $g_0(n)$ el filtro pasa-bajo y $g_1(n)$ el filtro pasa-alto.

FIGURA 4.21.

BANCO DE FILTROS DE ANÁLISIS CON DTCWT (DEMODULACIÓN)

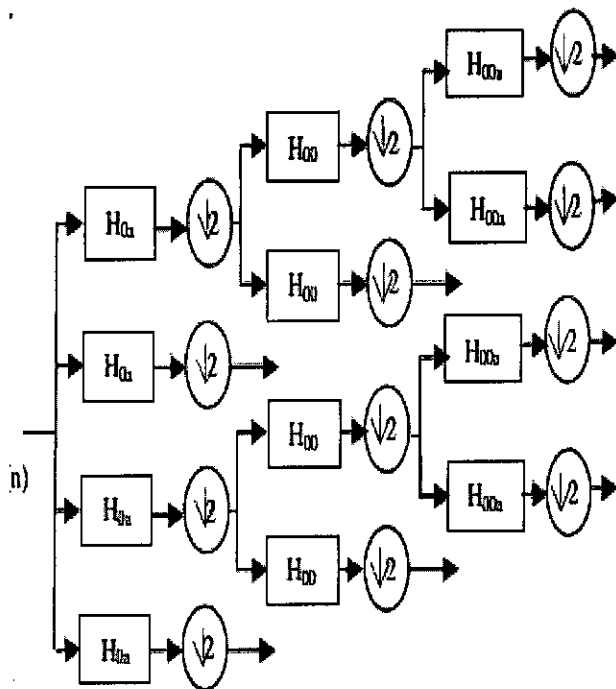
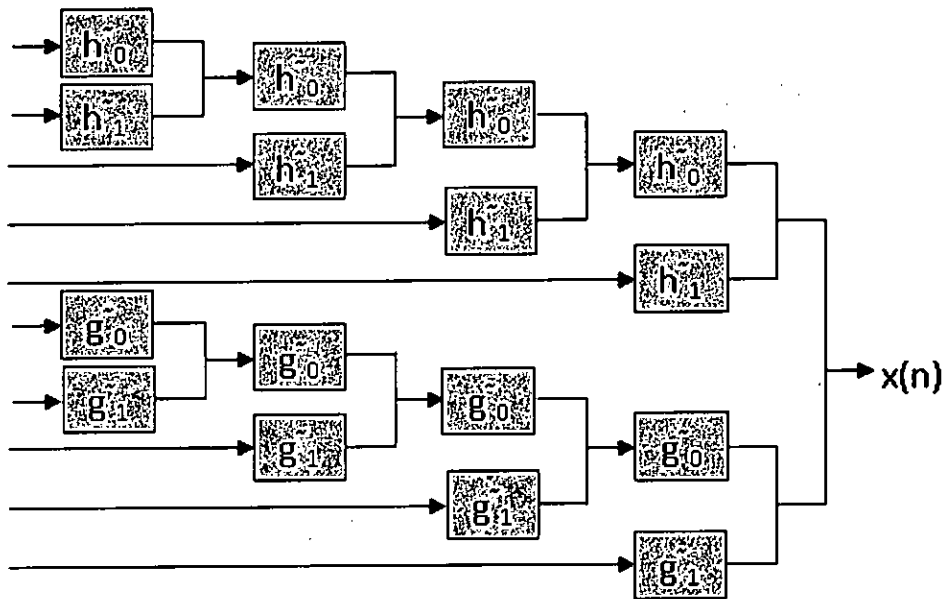


FIGURA 4.22
BANCO DE FILTROS DE SÍNTESIS CON IDTCWT (MODULACIÓN)



Se define la secuencia de ψ y ϕ como sigue:

$$\phi_r(t) = \sqrt{2} \sum_n h_0(n) \psi_r(2t - n)$$

$$\psi_r(t) = \sqrt{2} \sum_n h_1(n) \phi_r(2t - n)$$

$$\phi_i(t) = \sqrt{2} \sum_n g_0(n) \psi_i(2t - n)$$

$$\psi_i(t) = \sqrt{2} \sum_n g_1(n) \phi_i(2t - n)$$

$$h_1(n) = (-1)^n h_0(d - n)$$

$$g_1(n) = (-1)^n g_0(d - n)$$

La DTCWT emplea dos DWTs reales; la superior da la parte real de la transformada en tanto la inferior nos da la parte imaginaria.

Para satisfacer las condiciones de Reconstrucción perfecta, los filtros son diseñados de tal forma que la Wavelet compleja:

$$\psi_c(t) = \psi_r(t) + j\psi_i(t)$$

Es aproximadamente analítica, o lo que es equivalente a que $\psi_i(t)$ sea aproximadamente la Transformada Hilbert de $\psi_r(t)$; es decir

$$\psi_i(t) = H\{\psi_r(t)\}$$

El algoritmo busca que los coeficientes de los filtros utilizados no sean imaginarios, por ello utiliza la condición de “Half Sample Delay” o retardo de media muestra.

Los dos filtros pasabajo deben satisfacer una propiedad muy simple:

$$g_0 \cong h_0(n-0.5)$$

En el dominio Z:

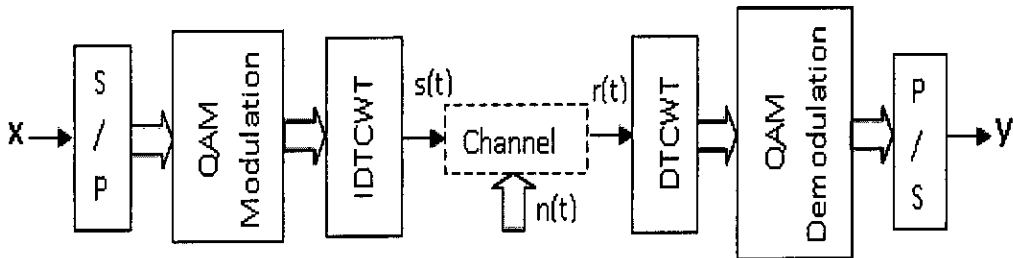
$$G_0(z) = H_0(z)Z^{-0.5}$$

Con los coeficientes obtenidos con el análisis de wavelet se tienen muchos usos conocidos, siendo la eliminación del ruido y la compresión los primeros de ellos.

La figura 4.23 nos muestra un diagrama funcional utilizando la Transformada Dual Tree Compleja.

FIGURA 4.23

DIAGRAMA DEL BLOQUE FUNCIONAL DE LA MODULACION CON WAVELET COMPLEJA UTILIZANDO LA DTCWT (DUAL TREE COMPLEX WAVELET TRANSFORM)



La IDTCWT toma los símbolos de entrada QAM o PSK y a la salida obtiene subportadoras paralelas en el plano tiempo-frecuencia. La señal transmitida $s(n)$ es sintetizada como:

$$s(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{\infty} a_m(n) \psi_{k,m}(t - nT)$$

Dónde:

$a_m(n)$ es el símbolo transmitido

$\psi_{k,m}(t-nT)$ es la función compleja para la subportadora m^{th}

T es el período de tiempo

M es el número de subportadoras activas

La DTCWT recupera los símbolos transmitidos a_m en el receptor, a través de las fórmulas de análisis, explotando las fórmulas de ortogonalidad de la DTCWT.

La DWT sufre de variaciones de desplazamiento, indicando que pequeños desplazamientos en la señal de entrada pueden causar cambios significativos en la distribución de la señal a través de escalas en los coeficientes de la DWT. La DTCWT es aproximadamente invariante al desplazamiento.

4.3. Población y muestra

En las investigaciones científicas desempeñan un papel fundamental los métodos empíricos, estadísticos y teóricos, dado que:

Los métodos empíricos permiten la obtención y elaboración de los datos empíricos y el conocimiento de los hechos fundamentales que caracterizan a los fenómenos. Los métodos empíricos principales son: La observación, el experimento y la medición, la entrevista, la encuesta, las técnicas socio métricas, los tests, Grupos de Discusión: Grupo Focal, Entrevista grupal, Comité de expertos.

Los métodos estadísticos cumplen una función relevante, ya que contribuyen a determinar la muestra de sujetos a estudiar, tabular los datos empíricos obtenidos y establecer las generalizaciones apropiadas a partir de ellos. En las ciencias sociales, naturales y técnicas no basta con la realización de las mediciones, sino que se hace necesaria la aplicación de diferentes procedimientos que permitan revelar las tendencias, regularidades, y las relaciones en el fenómeno objeto de estudio.

Los métodos teóricos construyen y desarrollan la teoría científica, y el enfoque general para abordar los problemas de la ciencia. Profundizan en el conocimiento de las regularidades y cualidades esenciales de los fenómenos, creando las condiciones para ir más allá de las características superficiales de la realidad, explicar los hechos y profundizar en las relaciones esenciales y cualidades fundamentales de los procesos no observables directamente. Los Métodos Teóricos participan en la etapa de asimilación de hechos, fenómenos y procesos y en la construcción de modelo e hipótesis de investigación.

En la presente tesis el diseño muestral, no es aplicable a este tipo de investigación, no es parte del análisis, debido a que se trata de un tema teórico, con aplicación de las Ciencias Matemáticas que tiene que ver con la mejora de un algoritmo OFDM utilizado en el proceso de Multiplexaje, y que por tanto no tiene eventos repetitivos.

4.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Las técnicas estuvieron basadas en el análisis documental y análisis de contenidos, principalmente de trabajos realizados por otros investigadores y que han sido plasmados en tesis y papers de nivel científico. La información es escasa y mucha elaboración propia. Los instrumentos para recolectar la información y poder medir o registrar nuestros resultados está dado por el simulador MATLAB versión R2015, software que cuenta con toolbox de procesamiento de señales para aplicaciones con Transformadas de Fourier y Transformadas de Wavelets.

4.5 Procedimientos de recolección de datos.

No es aplicable en esta investigación.

4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos

No corresponde utilizar procesamiento y análisis de datos.

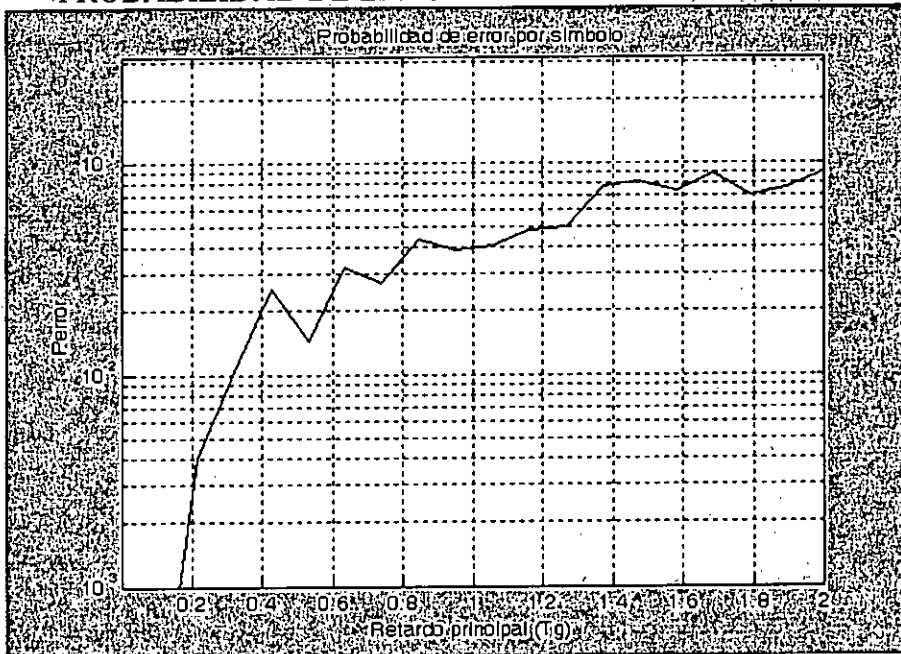
CAPÍTULO V

RESULTADOS

Efectos del multitrayecto

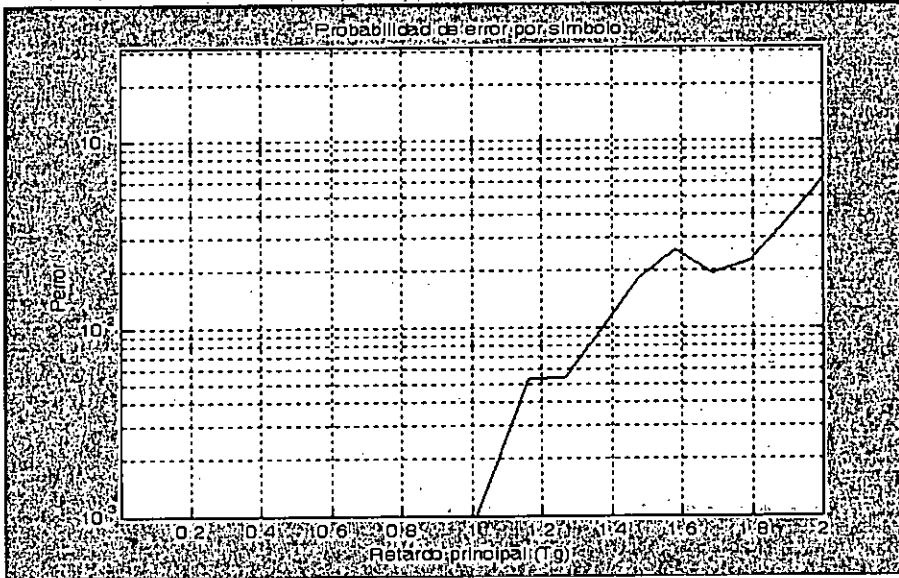
OFDM hace uso del Intervalo de Guarda y del Prefijo Cíclico. Una manera de comprobar la eficacia de este mecanismo es obtener mediante simulación la probabilidad de error producida en un canal Multitrayecto en dos casos: utilizando el prefijo cíclico y careciendo de él. Para simular el efecto multitrayecto del canal se ha considerado una señal principal, y una réplica retrasada a distintos retardos con el objetivo de representar la probabilidad de error en función de este retardo. En ambos casos se ha considerado una relación $E_b/N_0 = 10$ dB, y una señal retardada de amplitud 0.6 veces la amplitud de la señal principal. Empezamos con el caso de no utilizar prefijo cíclico:

FIGURA 5.1
PROBABILIDAD DE ERROR POR SÍMBOLO SIN PREFIJO CÍCLICO



Sin prefijo cíclico, al existir un pequeño retardo entre la señal principal y la señal retardada, aparece una probabilidad de error no nula con valores mayores que 0.01, haciendo inviable el sistema en condiciones generales de multitrayecto. En cambio, para el caso de utilizar prefijo cíclico, tenemos la siguiente figura:

FIGURA 5.2
 PROBABILIDAD DE ERROR POR SÍMBOLO CON PREFIJO CÍCLICO



En este caso, vemos como la probabilidad de error aparece justamente cuando el retardo supera la duración del prefijo cíclico. Esto supone que el sistema se hace inmune ante cualquier dispersión de retardos de menor duración que el prefijo cíclico, lo que concuerda con el estudio teórico de OFDM.

Efectos de la ICI

Para simular la ICI, se toma como criterio representarla en función del nivel de potencia interferente de la portadora adyacente con respecto a la potencia principal, variando este valor desde -20 dB a 0 dB (cuando se igualan en cada portadora su potencia con la potencia de la portadora adyacente). A continuación se presentan los resultados de las simulaciones para distintos valores de $E_b N_0$.

FIGURA 5.3
SIMULACIÓN DE LA ICI PARA $E_b/N_0=5$ dB

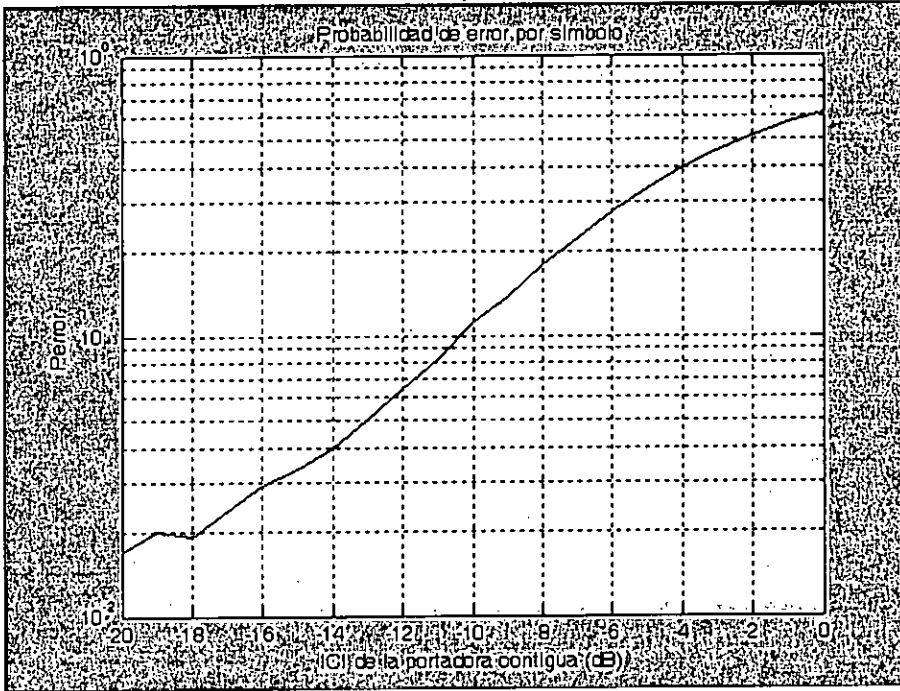


FIGURA 5.4
SIMULACIÓN DE LA ICI PARA $E_b/N_0=10$ dB

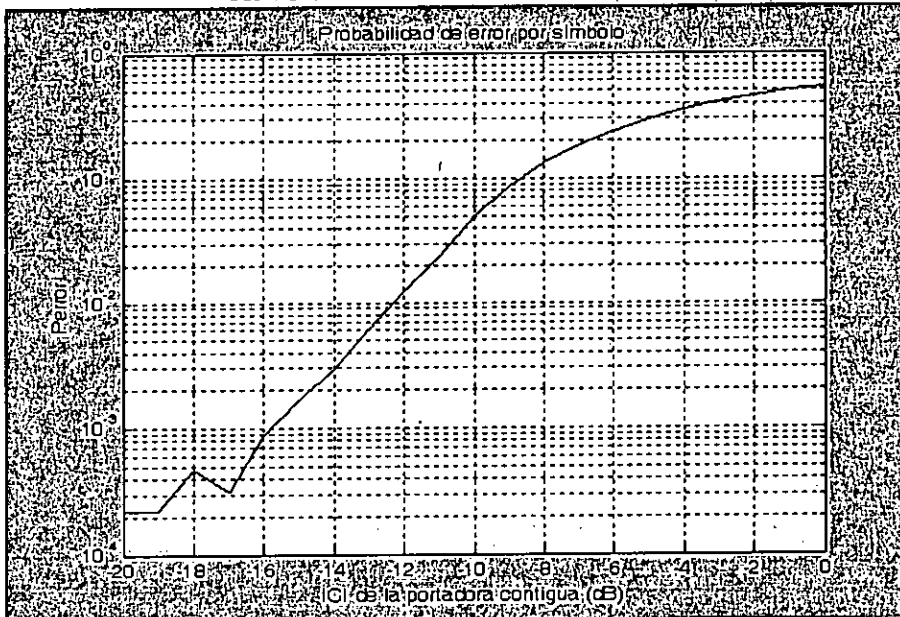


FIGURA 5.5
SIMULACIÓN DE LA ICI PARA $E_bN_0=15$ dB

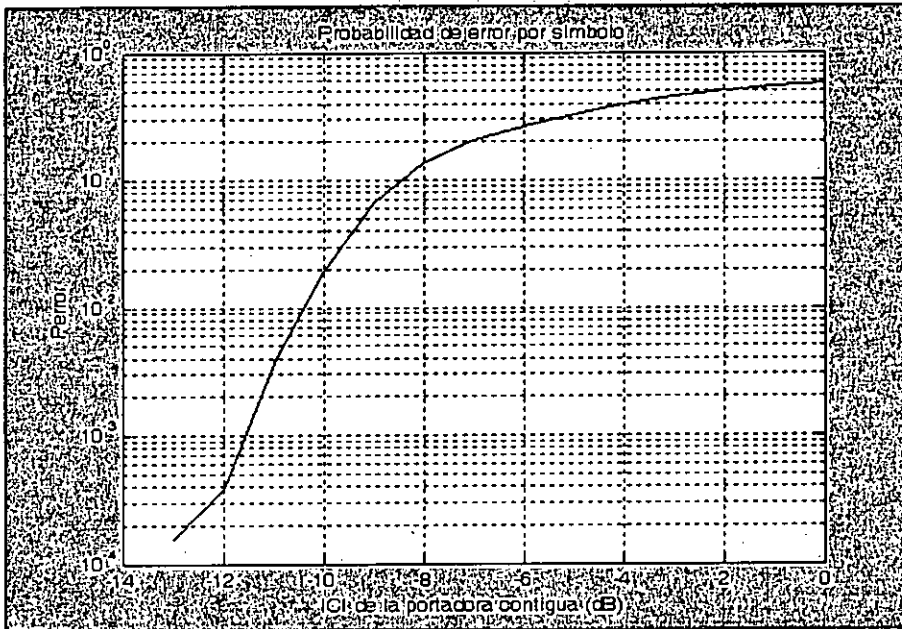
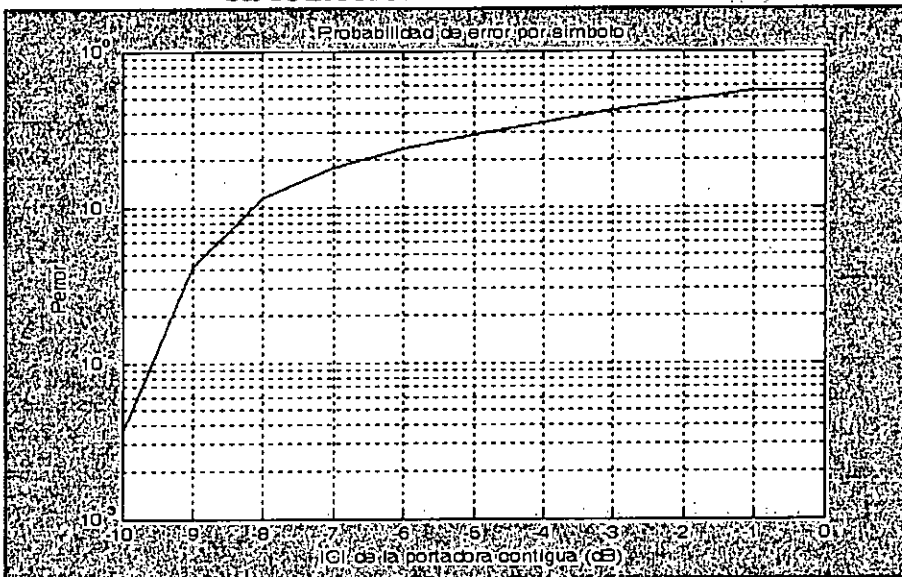


FIGURA 5.6
SIMULACIÓN DE LA ICI PARA $E_bN_0=20$ dB



Como podemos observar, la probabilidad de error aumenta muy significativamente en todos los casos en función del nivel de ICI, si bien cada caso presenta particularidades que podemos comentar. En el primer caso, $E_bN_0 = 5$ dB, la magnitud del ruido es muy desfavorable, lo que añadido al efecto de la ICI se traduce en probabilidades de error intolerables desde los -20 dB a los que

empezamos a simular. En el segundo caso, $EbNo = 10$ dB, si bien también aparece probabilidad de error desde los -20 dB, el orden de esta probabilidad de error es dos órdenes de magnitud menor, haciéndose intolerable en cualquier caso para valores mayores de la ICI. En el tercer caso, $EbNo = 15$ dB, la magnitud del ruido es lo suficientemente débil por si sola como para producir una probabilidad de error no nula, dejando esta de ser nula para una ICI de -13 dB. Y en el último caso, $EbNo = 20$ dB, se puede comprobar que la ICI provoca errores a partir de un nivel de -10 dB.

FIGURA 5.7
COMPARACIÓN ENTRE DWT-OFDM Y FFT-OFDM

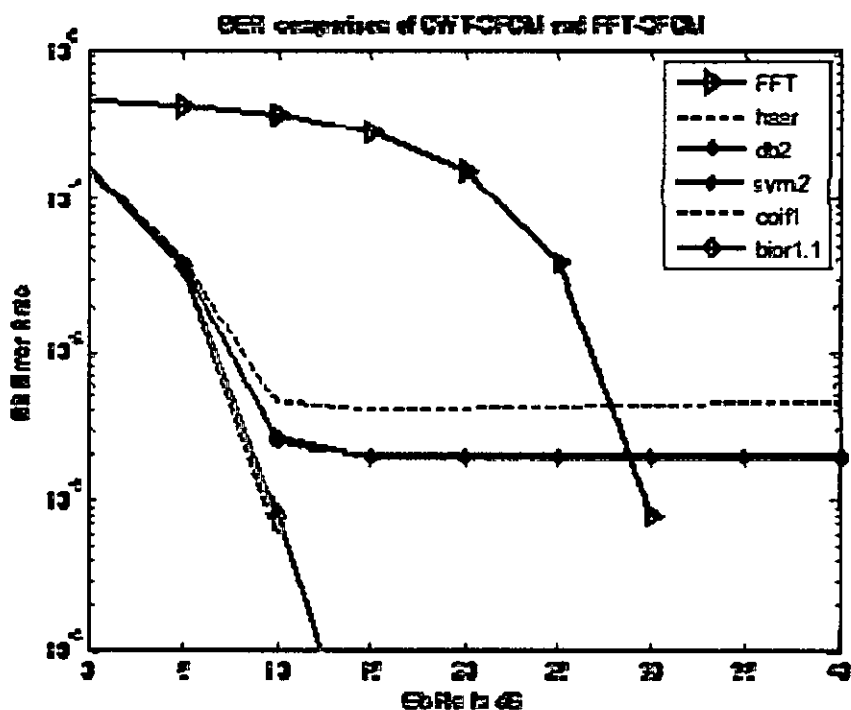


FIGURA 5.8
PERFORMANCE BER DEL OFDM CONVENCIONAL, WPM Y OFDM
BASADO EN DTCWT

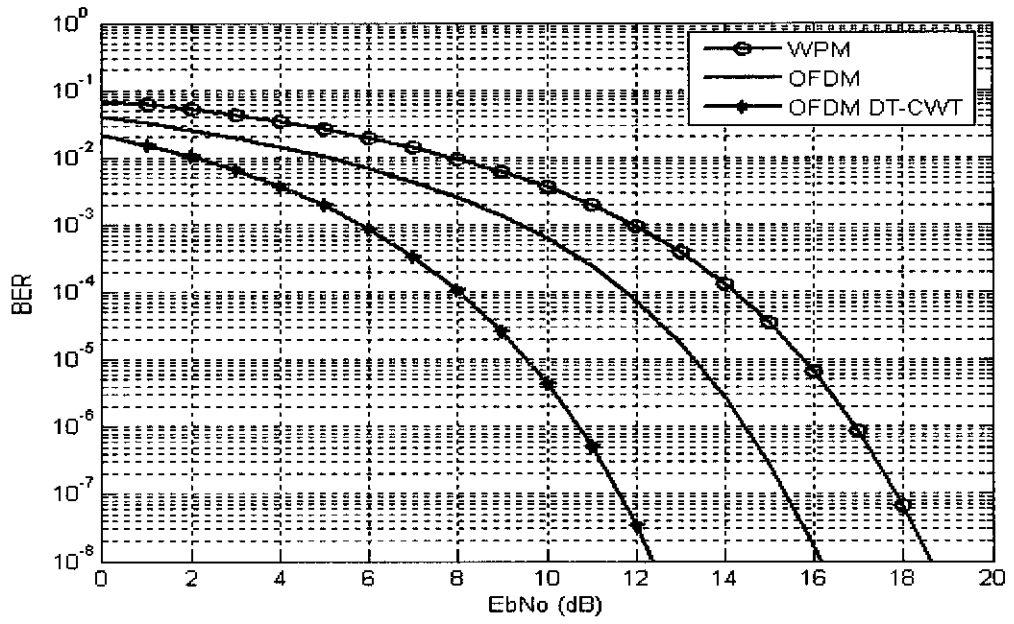


FIGURA 5.9
BER PARA OFDM BASADO EN DTCWT Y CON DIFERENTE TIPO DE
FILTROS.

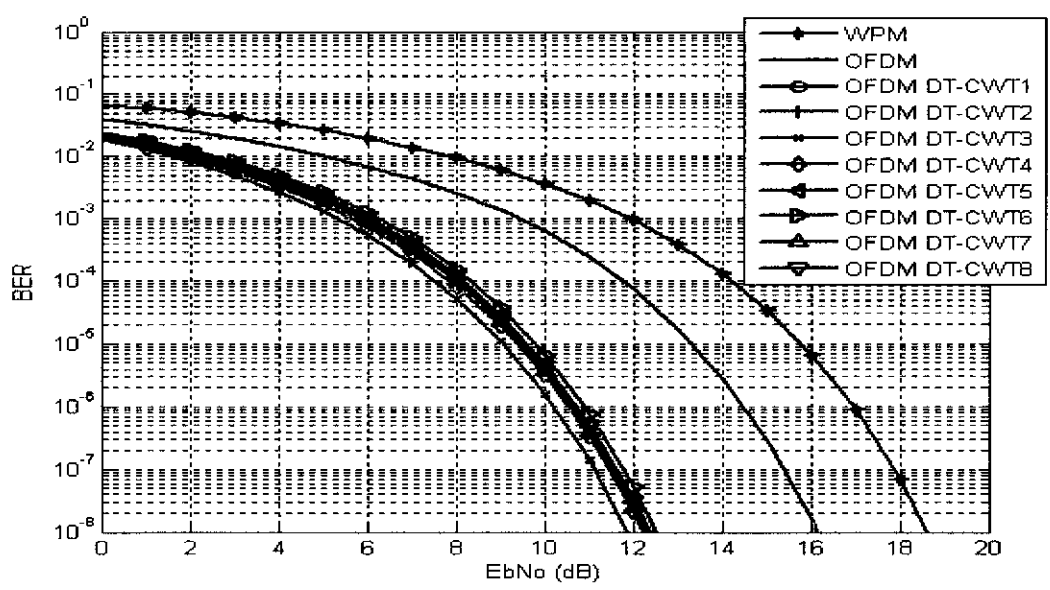


FIGURA 5.10

DIAGRAMA SIMULINK DWT (TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA)

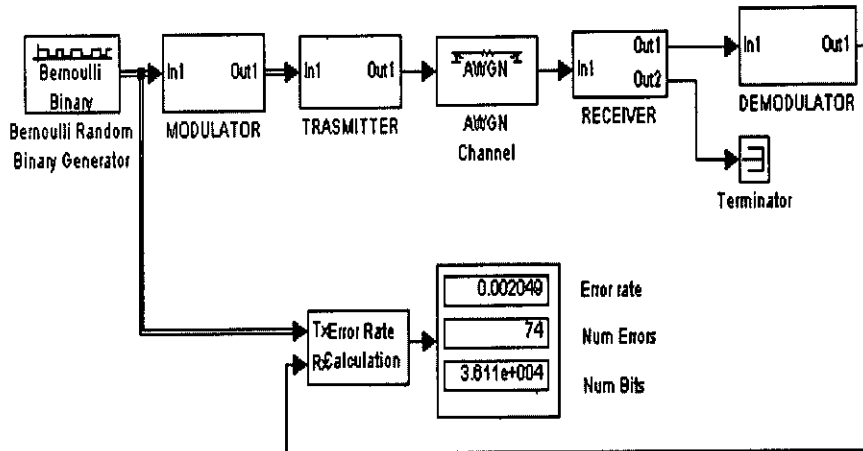
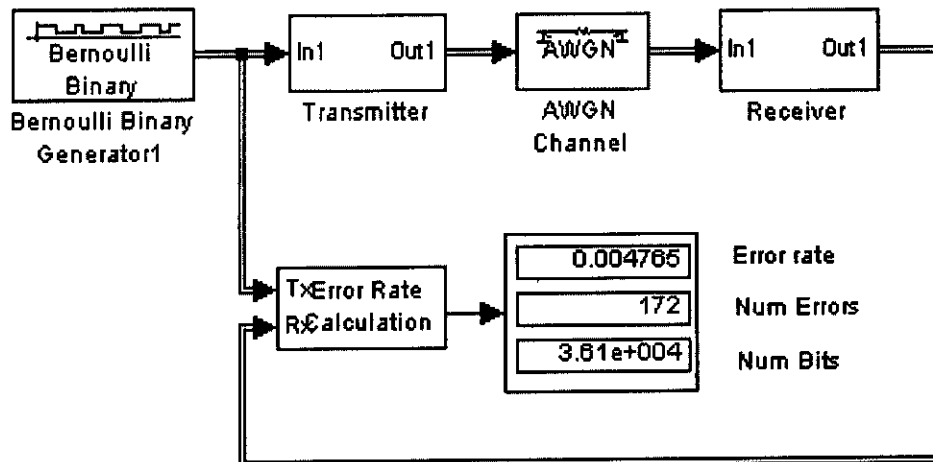


FIGURA 5.11

DIAGRAMA SIMULINK DWT-OFDM



CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

1. Debido al comportamiento no-estacionario que presentan las señales reales, es indispensable que su estudio se realice a través del análisis Wavelet, permitiendo una representación y descomposición con ventanas de longitud variable, adaptadas al cambio de frecuencia de la señal, preservando la información tiempo frecuencia simultáneamente en el dominio transformado.
2. El análisis Wavelet permite hacer una representación de la señal como una expansión de coeficientes del producto interno entre la Wavelet Madre, las funciones obtenidas por escalamiento y traslación de esta y la señal.
3. La función Wavelet Madre cumple la condición de estar localizada en el tiempo, con promedio cero, que permite actuar como un filtro pasa-banda, que posibilita visualizar simultáneamente la señal en tiempo-frecuencia.
4. La clave del análisis de Multiresolución radica en el anidamiento de subespacios, asegurando la creación de una base wavelet, donde la Wavelet Madre se construye por funciones de escala $\varphi(t)$, así la aproximación en una escala 2^{-j} contiene toda la información para calcular una resolución menor 2^{j-1} , concluyendo que todos los espacios son versiones escaladas del espacio central v_0 .
5. El análisis de Multiresolución nos permite conocer en qué momento se presentan los cambios de frecuencias en la señal analizada, de este modo detectar algún punto de cambio de la señal que puede ser un punto de ruptura o una discontinuidad.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

Considerando que:

1. Se ha identificado una disminución en las interferencias intersimbólica e intercanal en los sistemas multiportadora, al utilizar algoritmos basados en las transformadas de Fourier.
2. Se ha identificado una mejora en la disminución de las interferencias intersimbólica e intercanal en los sistemas multiportadora, al utilizar diversas Transformadas Wavelet. Esta mejora es en comparación con el caso anterior del uso de la Transformada de Fourier.
3. Ha sido posible analizar diversas Transformadas Wavelet, y determinar que inclusive entre ellas hay algunas que tienen mejor performance que otras, al comportamiento de hacerle frente a las interferencias intersimbólica e intercanal en los sistemas multiportadora. Las Transformadas Wavelets no requieren el prefijo cíclico y de acuerdo al estándar IEEE 802.16.3 tienen una ventaja del 20% en la eficiencia del ancho de banda, sobre las implementaciones típicas basadas en Fourier. En adición, al no requerir los tonos pilotos, le brindan 8% adicional de ventaja.

Se concluye finalmente que:

4. Ha sido posible determinar un tipo de transformada, la DTCWT, dentro de la diversidad de transformadas existentes, es decir, la que mejor performance tiene a la disminución sustantiva de las interferencias intersimbólica e intercanal, en los sistemas multiportadora, luego de la aplicación de la Transformada de Fourier y las diversas Transformadas Wavelet. La función de distribución acumulativa Complementaria CCDF del PAPR(Potencia Promedio versus potencia pico) para el OFDM basado en la DTCWT muestra una mejora de 2dB sobre la modulación por Wavelet Packet y el OFDM convencional.

CAPÍTULO VIII

RECOMENDACIONES

1. La complejidad en el cálculo matemático de la Transformada Wavelet continua CWT, genera la necesidad de hacer una discretización de los parámetros de escala y frecuencia, obteniendo un conjunto finito de valores (coeficientes), que a través de su clasificación, análisis y reagrupamiento, permiten la implementación de algoritmos que facilitan su cálculo e interpretación. Es la razón por lo que en todo el estudio se utiliza las Transformadas discretas o una variación de ellas, como las Wavelet Packet Transform o las Dual Tree Complex Wavelet Transform.
2. La teoría de Wavelets tiene muchas aplicaciones reales que comprenden la detección de discontinuidades y puntos de ruptura en las señales, la identificación de frecuencias puras, la reducción de ruido en señales, la compresión de señales, aproximación de funciones, entre otros, por ello la conveniencia de su uso. En este trabajo se ha utilizado tres tipos de transformadas que a mi criterio son en la actualidad las más importantes, sin embargo tenemos que indicar que existen otros tipos y posiblemente surgan nuevas wavelets, que mejoren la performance en la tasa de errores de bit.
3. Es importante establecer nuevas líneas de investigación con la finalidad de profundizar el estudio, llevando por el camino de construir software con nuevos algoritmos, con wavelets de mejor performance, para la disminución del ICI e ISI en los sistemas multiportadora. La aplicación para distintas plataformas de comunicaciones como Wi-Max, LTE, ADSL, Televisión Digital Terrestre, nos da un amplio margen para poder investigar y encontrar mejoras en los sistemas de transmisión y recepción.

4. Es recomendable construir prototipos utilizando FPGA donde se pueda grabar el software, y de esta forma realizar diversas pruebas que permitan ganar mayor experiencia en la utilización de esta herramienta. Es necesario además probar con distintas plataformas en comunicaciones, donde las interferencias intercanal e intersimbólica influyen en mayor grado. Conforme las velocidades de transmisión sigan aumentando, se hace más compleja la electrónica que pueda soportarlo y de allí la necesidad de generar nuevas funciones wavelets que ayuden a ir a la par con los avances de la tecnología.

CAPÍTULO IX.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- 1.- Fournier, A. (1995) Wavelets and their Applications in Computer Graphics, University of British Columbia. s.n.
- 2.- Byeong, G.L, Sunghyun, C. (2007) Broadband Wireless Access and Local Networks, ARTECH HOUSE.
- 3.- Hui, L; Guoqing L. (2007) OFDM Based Broadband Wireless Networks, design and optimization, WILEY INTERSCIENCE.
- 4.- Lee, W.C. (1995) Mobile Cellular Telecommunications, Analog and Digital System, MCGRAW-HILL, INC, SECOND EDITION.
- 5.- Hrasnica, H; Haidine, A. Lehnert, R. (2004) Broadband Powerline Communications, Network Design, JHON WILEY & SONS,LTD.
- 6.- Shukla, P.D. (2003) Complex Wavelet Transforms and their Applications, Glasgow, Strathclyde University.
- 7.- García, R. D. (2006) “Análisis Wavelet aplicado a la medida de armónicos, inter-armónicos y sub-armónicos en redes de distribución eléctrica”, Santander, Universidad de Cantabria.
8. Ramírez Behaine, C.A. (2006) Modulación por Multiportadoras tipo OFDM, las bases de la nueva generación de transmisión de información, Medellín, Universidad de Medellín, Colombia.
9. Manoharan, S. (2008) A dual tree complex Wavelet Transform construction and its application to image denoising, Coimbatore, India, Karunya University.

10. Gómez, J.C. (2006) Procesamiento de señales basados en Wavelets, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
11. Navarro Fuentes, J; Elizarrarás Martínez, D. (2010) Introducción a la Transformada Wavelet Continua, Departamento de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco, EDITORIAL REVERTÉ.
12. Robles Palacios, O.I (2009) Diseño e implementación de un modulador OFDM reconfigurable para la tecnología software-defined radio sobre un FPGA, Tesis para optar el título de Ingeniero Electrónico PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Lima- Perú,
13. Kasliwal, R; Kale, N; Piyush N. (2013) Wavelet OFDM. Recuperado el 25 de enero de 2013, de <http://www.ee.iitb.ac.in/> Indian Institute of technology Bombay, Department of Electrical Engineering.
14. Castaño del Castillo, D. (2008) Estudio de la Modulación OFDM y de los efectos no lineales mediante simulación en Matlab, Proyecto de fin de carrera, Universidad de Sevilla, Ingeniería de Telecomunicaciones, Sevilla- España.
15. Nerma, M.H; Kamel, N.S; JEOTI, V. (2009) OFDM based on Complex Wavelet Transform, Electrical & Electronic Engineering Department, University Technology PETRONAS Malaysia.
16. Selesnick, I.W; Baraniuk, R.G; Kingsbury, N.G. (2005) The Dual Tree Complex Wavelet Transform, IEEE Signal Processing Magazine.
17. Oltean, M; Naformita, M. (2015) Wavelet OFDM Performance in Frequency Selective Fading Channels, Communications Department Faculty of Electronics and Telecommunications, Timisoara, Rumania,

18.. Dharmistan, A; Varugheese, K; Muniraj, N.J. (2012) Modified Lifting Based DWT/IDWT Architecture for OFDM on virtex-5 FPGA, Global Journal of Researches in Engineering Electrical and Electronics Engineering, Volume 12 issue 8 Version 1.0, Taminaldu, India,

19. Guanming Lin, P. (2010) OFDM Simulation in MATLAB, A Senior Project presented to the Faculty of California, Polytechnic State University, San Luis Obispo, California,.

ANEXO A.

TABLA N° 02
MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO DEL PROYECTO: "Modelo OFDM basado en Transformadas Wavelets para reducir la Interferencia Intersimbólica e Intercanal en los Sistemas Multiportadora"							
PROBLEMA		OBJETIVO		HIPOTESIS	VARIABLES	MÉTODOS	
GENERAL	ESPECÍFICO	GENERAL	ESPECÍFICO	GENERAL	VARIABLE X		
¿De qué manera el uso del modelo OFDM utilizando Wavelets permite reducir la interferencia ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora?	1- ¿En qué medida se reduce la ISI e ICI de una señal al aplicar la TF? 2- ¿En qué medida se reduce la ISI e ICI de una señal al aplicar diversas TW? 3- ¿Cuál es el modelo óptimo a partir de las diversas TW para el análisis de la Interferencia ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora?	Determinar un sistema OFDM basado en Wavelets para reducir la interferencia ISI e ICI en los sistemas Multiportadora	1- Determinar los niveles de interferencia ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora al aplicar la Transformada de Fourier. 2-Determinar la interferencia ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora producida por aplicación de diversas Transformadas Wavelet. 3-Identificar alternativas para elegir el modelo óptimo para el análisis de las Interferencias ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora.	Aplicando la Transformada de Wavelet en OFDM disminuimos en gran medida la interferencia ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora.	Uso de Wavelets en modelos OFDM.	Método A existente Eliminación de Interferencias ISI e ICI utilizando Transformadas de Fourier con márgenes tolerables de ruido, pero utilizando mayor complejidad circuital. Método B nuevo Eliminación de interferencias ISI e ICI utilizando Transformadas Wavelets (DTCWT) con mejores resultados en la eliminación de interferencias y con menor complejidad circuital.	
				ESPECÍFICA	VARIABLE Y		
				1-Aplicando la transformada de Fourier se consigue reducir la interferencia ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora. 2-Aplicando diversas Transformadas de Wavelets se consigue medir la interferencia ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora. 3- Es posible establecer un modelo óptimo luego de aplicar la Transformada de Fourier y las diversas Transformadas Wavelets, que reducen de mejor manera las Interferencias ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora	Reducir la Interferencia ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora.		VARIABLE X
					-Aplicación de diversos tipos de TW. -Aplicación de coeficientes de Wavelets.		VARIABLE Y
					Reducir la interferencia ISI e ICI en los Sistemas Multiportadora.		

ANEXO B

CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE UN CANAL

Nyquist elaboró una serie de teorías sobre el muestreo de señales, demostrando que si se hace pasar una señal por un canal de ancho de banda W , dicha señal puede reconstruirse si se toman muestras de la misma con una frecuencia igual a dos veces la frecuencia del ancho de banda por segundo ($2W$). Muestrear a una frecuencia superior no tiene sentido, ya que las frecuencias más altas que el ancho de banda no pueden ser recuperadas por haber sido filtradas. Esto constituye el *primer criterio de Nyquist*, según el cual la velocidad máxima a la que se puede transmitir una señal a través de un canal de ancho de banda W , y para una señal de n niveles discretos viene dada por la expresión :

$$C = V_{tmax} = 2W(\log_2 n)$$

La cual define la capacidad de transferencia de un canal. Por ejemplo, para el canal telefónico, si consideramos un caso ideal sin ruido y con un ancho de banda de 3 KHz, según el teorema de Nyquist no se podría reconstruir señales binarias que se hubieran transmitido por él a velocidades superiores a los 6000 bps.

La anterior expresión determina la velocidad máxima a la que se puede transmitir por un canal ideal sin ruido. En la práctica, esta velocidad máxima se verá notablemente reducida. De la expresión también se podría deducir que se puede ampliar la capacidad de un canal indefinidamente aumentando el valor de n ; esto tampoco es posible, ya que el número de estados de señalización está limitado por la potencia máxima de la señal, por la sensibilidad del receptor, etc.

FORMAS DE ONDA DEL TRANSMISOR Y CANAL DE COMUNICACIONES.

Supongamos un sistema OFDM con N subportadoras, un ancho de banda de W Hz y una longitud de símbolo de T segundos, de los cuáles T_{cp} segundos son la longitud del prefijo cíclico, en ese caso, el transmisor usa las siguientes formas de onda:

$$\Phi_k(t) = \begin{cases} \frac{e^{j2\pi \frac{W}{N} k(t-T_{cp})}}{\sqrt{T-T_{cp}}} & \text{si } t \in [0, T], \\ 0 & \text{en otro caso;} \end{cases}$$

Donde $T=N/W + T_{cp}$

Por otra parte $\phi_k(t)$ es un pulso rectangular modulado en una frecuencia de portadora kW/N , y la interpretación más usual de OFDM es que se está utilizando N subportadoras, cada una de las cuales transporta una baja tasa de bits.

Las señales $\phi_k(t)$ se utilizan en la modulación de forma que la señal en banda base transmitida para el l ésimo símbolo OFDM es:

$$s_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_{k,l} \phi_k(t - lT)$$

donde $x_{0,l}, x_{1,l}, \dots, x_{N-1,l}$ son números complejos que provienen de los puntos de una constelación de señales.

Observando la ecuación, se aprecia que la señal en banda base tiene la misma expresión que una IDFT.

Esto hace que se usen los algoritmos rápidos de la IFFT para la transmisión.

Cuando se transmite una secuencia infinita de símbolos OFDM, la salida del transmisor no es más que la yuxtaposición de símbolos OFDM individuales.

$$s(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} s_l(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} x_{k,l} \phi_k(t - lT)$$

Canal.

Pasemos a hacer una revisión del análisis matemático del canal. Asumiremos que la respuesta impulsiva del canal $g(\tau,t)$ está restringida al intervalo $\tau \in [0, T_{cp}]$, es decir a la longitud del prefijo cíclico. La señal recibida será:

$$r(t) = (g * s)(t) = \int_0^{T_{cp}} g(\tau; t) s(t - \tau) d\tau + \tilde{n}(t)$$

ANEXO C

PRINCIPALES COMANDOS DE MATLAB UTILIZADOS

DWTMODE	Discrete wavelet transform extension mode
WPDEC	Wavelet packet decomposition 1-D
WPREC	Wavelet packet reconstruction 1-D
WPCOEF	Wavelet packet coefficients
WPRCOEF	Reconstruct wavelet packet coefficients
BESTLEVT	Best level tree wavelet packet analysis
BESTTREE	Best tree wavelet packet analysis
ENTRUPD	Entropy update (wavelet packet)
WENTROPY	Entropy (wavelet packet)
PLOT	Plot tree GUI
WPVIEWCF	Plot wavelet packets colored coefficients
WAVEMENU	Wavelet Toolbox GUI tools
WPFUN	Wavelet packet functions
WPSPECTRUM	Wavelet packet spectrum
CFS2WPT	Wavelet packet tree construction from coefficients
DEPO2IND	Node depth-position to node index
WP2WTREE	Extract wavelet tree from wavelet packet tree
WPCUTREE	Cut wavelet packet tree
WPSPLT	Split (decompose) wavelet packet
WPJOIN	Recompose wavelet packet
IND2DEPO	Node index to node depth-position
OTNODES	Order terminal nodes of binary wavelet packet tree
WRITE	Write values in WPTREE fields
READ	Read values of WPTREE
READTREE	Read wavelet packet decomposition tree from figure
SET	WPTREE field contents
TNODES	Determine terminal nodes
WPTREE	WPTREE constructor

ANEXO D

POTENCIA PICO Y EFECTOS NO LINEALES

Un problema importante en las señales es que sus amplitudes (o potencias instantáneas) tengan una gran dispersión. Esto requiere que los amplificadores usados sean muy lineales y tengan un rango dinámico muy grande, ya que el amplio rango de amplitudes que puede emplear la señal dificulta considerablemente un punto de trabajo óptimo para todas ellas.

Este es un problema característico de OFDM. La señal que se obtiene a la salida de un transmisor OFDM llega a tener picos de potencia muchos mayores que la potencia media. Esto es debido a la posibilidad de que todas las subportadoras se puedan sumar en fase en un momento dado, consiguiendo una contribución de potencia muy importante.

Este fenómeno se estudia con una figura denominada PAPR (*Peak to Average Power Ratio*), que no es más que la relación entre la potencia máxima de una señal y su valor medio.

$$\text{PAPR} = \frac{\max[x(n) \cdot x^*(n)]}{E[x(n) \cdot x^*(n)]}$$

Donde $x(n)$ es la señal transmitida y $x^*(n)$ es la compleja conjugada de $x(n)$. El PAPR es un buen parámetro para comparar sistemas OFDM con diversos esquemas de modulación; sin embargo, en la práctica es la Función Distributiva Acumulativa Complementaria CCDF de la PAPR, la que se utiliza como criterio.

De esta manera, un valor grande de PAPR nos da una idea de una señal con una gran dispersión en sus amplitudes. Por lo tanto, el máximo teórico de PAPR se dará cuando el total de las subportadoras se encuentren en fase. Pero, esto es sumamente improbable y en la práctica se suelen tener unos valores de PAPR que no superan los 13 o 14 dB.

Todo esto hace que la falta de linealidad en los amplificadores recorte la amplitud de los picos más importantes de una señal OFDM. Estos recortes suponen cambios bruscos en la amplitud de la señal, lo que se traduce en componentes de alta frecuencia, que hacen que se ensanche el espectro de OFDM, produciendo finalmente Interferencia Interportadora (ICI).

Para mitigar todos estos problemas en los amplificadores no lineales, existen varias posibilidades relacionadas con la suavización de los picos de las señales OFDM:

➤ Mantener el nivel de potencia: Podemos mantener la potencia de la señal en un cierto nivel deseado. Esto reduce los picos de la señal, pero introduce otro tipo de distorsiones.

➤ Mapeo selectivo: Se trata de multiplicar la señal de datos por un conjunto de códigos, calcular la IFFT de cada uno, y escoger aquel que presente un menor PAPR.