



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E  
INDUSTRIAL**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
COMUNICACIONES**

TEMA:

---

“Análisis de la sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM  
utilizando radio definido por software.”

---

Trabajo de Graduación. Modalidad: Proyecto de investigación, presentado previo la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

**SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Comunicaciones Inalámbricas

**AUTOR:** Vega Rodríguez Jorge Gabriel

**TUTOR:** Ing. Patricio Córdova

Ambato - Ecuador

Octubre, 2015

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el Tema:

“Análisis de la sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM utilizando radio definido por software.”, del señor Vega Rodríguez Jorge Gabriel, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el numeral 7.2 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, Octubre del 2015

EL TUTOR

---

Ing. Patricio Córdova

## AUTORÍA

El presente trabajo de investigación titulado: Análisis de la sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM utilizando radio definido por software. Es absolutamente original, auténtico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, Octubre del 2015

---

CC: 1803665726

Vega Rodríguez Jorge Gabriel

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación. Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además autorizo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ambato, Octubre del 2015

---

CC: 1803665726

Vega Rodríguez Jorge Gabriel

## APROBACIÓN COMISIÓN CALIFICADORES

La Comisión Calificadora del presente trabajo conformada por los señores docentes Ing. Marco Jurado e Ing. Edwin Morales, revisó y aprobó el Informe Final del trabajo de graduación titulado ANÁLISIS DE LA SINCRONIZACIÓN DE LA TRAMA DE DATOS EN LA MODULACIÓN OFDM UTILIZANDO RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE, presentado por el señor Jorge Gabriel Vega Rodríguez de acuerdo al numeral 9.1 de los Lineamientos Generales para la aplicación de Instructivos de las Modalidades de Titulación de las Facultades de la Universidad Técnica de Ambato.

---

Ing. Vicente Morales, Mg.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

---

DOCENTE CALIFICADOR

Ing. Marco Jurado

---

DOCENTE CALIFICADOR

Ing. Edwin Morales

## **DEDICATORIA**

El esfuerzo y constancia para el desarrollo de este proyecto, se lo dedico a DIOS por brindarme su infinita bondad y sabiduría. A mi familia,especialmente a mis padres, mi hermano y a todas las personas que formaron parte de esta etapa de mi vida, por su apoyo y respaldo incondicional a lo largo de mi formación académica.

(Jorge Gabriel )

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme la dicha de tener a mi familia, quienes han sido mi razón de ser. A mis padres Francisco, Ivon y mi hermano Erick, y demás seres queridos, por su apoyo incondicional que me ha servido de ejemplo e inspiración para culminar con éxito mi carrera y llegar a ser un excelente profesional.. A la Universidad Técnica de Ambato, en especial a la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial que me abrió sus puertas y me impartió ciencia, sabiduría y valores humanos, permitiendo formarme como persona y profesional. Al Ingeniero Patricio Córdova, por compartir su tiempo y conocimiento para el desarrollo de este proyecto. Al Ingeniero Marco Jurado, quien a través de su sabiduría, me ha ayudado a ser mejor persona y mejor profesional.

(Jorge Gabriel)

## ÍNDICE

<b>APROBACIÓN DEL TUTOR</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORÍA</b>	<b>iii</b>
<b>AUTORÍA</b>	<b>iv</b>
<b>APROBACIÓN COMISIÓN CALIFICADORA</b>	<b>v</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>vi</b>
<b>Agradecimiento</b>	<b>vii</b>
<b>lo Introducción</b>	<b>xviii</b>
<b>CAPÍTULO 1 El problema</b>	<b>1</b>
1.1 Tema de Investigación . . . . .	1
1.2 Planteamiento del problema . . . . .	1
1.3 Delimitación . . . . .	2
1.4 Justificación . . . . .	3
1.5 Objetivos . . . . .	3
1.5.1 General . . . . .	3
1.5.2 Específicos . . . . .	4
<b>CAPÍTULO 2 Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1 Antecedentes Investigativos . . . . .	5
2.2 Fundamentación teórica . . . . .	7
2.2.1 Sistemas de comunicaciones. . . . .	7
2.2.2 Sistemas de comunicaciones digitales. . . . .	8
2.2.3 Tipos de modulación digital. . . . .	11
2.2.4 Modulación OFDM. . . . .	19
2.2.5 Sincronización de trama. . . . .	26
2.2.6 Transformada de Fourier. . . . .	28
2.2.7 Transformada discreta de fourier. . . . .	29



2.2.8	Transformada rápida de fourier FFT/IFFT. . . . .	31
2.2.9	Radio definido por software . . . . .	35
2.2.10	Periférico universal de radio software. . . . .	38
2.3	Propuesta de solución. . . . .	40
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Metodología</b>	<b>41</b>
3.1	Modalidad Básica de la investigación . . . . .	41
3.2	Recolección de información . . . . .	41
3.3	Procesamiento y análisis de datos . . . . .	41
3.4	Desarrollo del Proyecto . . . . .	42
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Desarrollo de la propuesta</b>	<b>43</b>
4.1	Antecedentes . . . . .	43
4.2	NI USRP 2920 . . . . .	44
4.3	Configuración de red USRP 2920 . . . . .	48
4.3.1	NI USRP Configuration utility . . . . .	49
4.4	Introducción a LabView. . . . .	51
4.4.1	Procesamiento digital de señales en LabView. . . . .	52
4.4.2	Parámetros de configuración de USRP 2920. . . . .	53
4.5	Simulación del Sistema OFDM. . . . .	57
4.5.1	Transmisor OFDM . . . . .	58
4.5.2	Sicronización de trama en OFDM. . . . .	65
4.5.3	Receptor OFDM. . . . .	69
4.6	Recolección de información y análisis. . . . .	73
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>83</b>
5.1	Conclusiones . . . . .	83
5.2	Recomendaciones . . . . .	84
<b>Bibliografía</b>		<b>85</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>89</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones . . . . .	7
2	Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones digitales . . . . .	9
3	Variación de los parámetros de una onda portadora . . . . .	12
4	Señal modulada mediante ASK . . . . .	14
5	Señal modulada FSK . . . . .	15
6	Señal modulador PSK . . . . .	16
7	a) Señal en fase $\cos(x)$ y señal en cuadratura $\sin(x)$ b) constelación IQ de la señal . . . . .	18
8	Portadoras en esquema FDM . . . . .	20
9	Portadoras en esquema OFDM . . . . .	20
10	a) Multiportadora normal b)Multiportadora OFDM . . . . .	21
11	Portadoras ortogonales en OFDM . . . . .	22
12	Ejemplo de un sistema de comunicación inalámbrica . . . . .	22
13	Inserción de CP en un símbolo OFDM . . . . .	23
14	Esquema de modulación OFDM con 8 sub portadoras. . . . .	24
15	Tranceptor utilizando OFDM en base a 802.11a . . . . .	24
16	Estructura generalizada de una trama de datos . . . . .	27
17	Onda cuadrada periódica continua . . . . .	28
18	Señal muestreada $x(n)$ y su espectro $X(\Omega)$ . . . . .	30
19	Transformada DFT e IDFT de la señal $x(n)$ . . . . .	30
20	Algoritmo de FFT de 8 puntos. . . . .	35
21	Diagrama de bloques de SDR . . . . .	36
22	Diagrama de bloques de la estructura interna de un USRP . . . . .	38
23	NI USRP 2920 . . . . .	44
24	Estructura interna del NI USRP 2920 . . . . .	45
25	Panel frontal NI USRP 2920 . . . . .	46
26	Leds indicadores . . . . .	47
27	Configuración de red del ordenador . . . . .	48
28	Configuración del protocolo TCP-IPv4 . . . . .	49
29	Ventana principal de Configuration Utility . . . . .	50

30	Asignar IP ADDRESS al dispositivo . . . . .	50
31	Configuración de FPGA Y Firmware de URSP 2920 . . . . .	51
32	Diagrama de bloques y panel frontal de un VI en Labview . . . . .	52
33	Inicio de sesión USRP 2920 . . . . .	53
34	Vi de configuracion de señal . . . . .	54
35	Diagrama de flujo para la adquisición y recepción de datos . . . . .	55
36	Diagrama de bloques de un Tx de información a través de USRP 2920 . . . . .	55
37	Panel frontal en Labview de un Tx a través del USRP 2920 . . . . .	56
38	VI de cierre de sesión de USRP . . . . .	56
39	Abort VI del USRP . . . . .	56
40	Diagrama de bloques, receptor de información a través de USRP 2920 . . . . .	57
41	Diagrama de flujo para la adquisición y recepción de datos OFDM . . . . .	58
42	Diagrama de bloques de un Tx OFDM . . . . .	58
43	Vi de tipo de modulación y muestres (map) . . . . .	59
44	Parámetros para modulación OFDM . . . . .	60
45	Parámetros de Tx del USRP . . . . .	61
46	Generador aleatorio de bits . . . . .	61
48	Construcción de los simbolos OFDM . . . . .	61
47	Mapeo de símbolos . . . . .	62
49	Simbolo adicional de 25 bits . . . . .	62
50	Inserción de ceros al esquema . . . . .	62
51	FFT Inversa de conjunto de datos . . . . .	63
52	Inserción del prefijo cíclico . . . . .	63
53	Escalamiento de la señal OFDM . . . . .	64
54	Transmisión de información . . . . .	64
55	Interfaz final del Tx OFDM . . . . .	64
56	Estructura de una trama de datos OFDM . . . . .	65
57	Estructura del símbolo de OFDM . . . . .	66
58	Diagrama de bloques de las librerías de detección de trama. . . . .	68
59	Diagrama de bloques de temporizador de símbolo. . . . .	68
60	Diagrama de bloques de detección de trama . . . . .	69
61	Panel frontal del detector de trama . . . . .	69
62	Diagrama de bloques de Parámetros de recepción de hardware . . . . .	70
63	Generador de bits aleatorio en receptor OFDM . . . . .	71
64	Detección de prefijo cíclico en el receptor. . . . .	71
65	Remoción de prefijo cíclico en receptor OFDM . . . . .	71
66	Remoción de frecuencia de OFFSET en receptor OFDM . . . . .	72

67	FFT de la señal de entrada del receptor OFDM . . . . .	72
68	Separación de bits de datos . . . . .	72
69	Ecualización de la señal DE ENTRADA . . . . .	73
70	Ecualización de los simbolos OFDM . . . . .	73
71	Conversión de datos mapeados a bits . . . . .	73
72	Parámetros de hardware USRP 2920 . . . . .	74
73	Configuración de los parámetros de una señal OFDM . . . . .	74
74	Diagrama de fase de información transmitida. . . . .	75
75	Diagrama de constelación 4QAM . . . . .	76
76	Gráfico modificado del Diagrama de conetelación 4QAM . . . . .	76
77	FFT de señal transmitida . . . . .	77
78	Parámetros de Hardware del receptor OFDM . . . . .	77
79	Espectro FFT del receptor . . . . .	78
80	Gráfico de fase y cuadratura de la señal receptada . . . . .	78
81	Ecualización de la señal recibida . . . . .	79
82	Señal ecualizada a mayor potencia . . . . .	79
83	Señal ecualizada a menor potencia . . . . .	80
84	Estructura de la trama de datos OFDM . . . . .	81
85	Magnitud de la señal adquirida por el receptor OFDM . . . . .	81
86	Métrica de sincronización para algoritmo de Shmil &Cox . . . . .	82
87	Bits de la trama de datos OFDM . . . . .	82
88	Laboratorio UODIDE . . . . .	89
89	Implementación de sistema OFDM con USRP 2920 . . . . .	89

## Resumen

El presente proyecto muestra la implementación de un sistema de comunicaciones inalámbricas, basado en la técnica de Modulación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), la cual permite optimizar el uso del espectro radioeléctrico mediante el empleo de sub-portadoras ortogonales. Para la implementación del sistema se ha utilizado la tecnología Radio Definido por Software (SDR), que permite reemplazar la parte de hardware de un sistema de comunicaciones, por ejemplo filtros digitales, amplificadores, moduladores/demoduladores de señal, codificadores/decodificadores, mezcladores, etc. Mediante software desarrollado en base a las necesidades de cualquier sistema de comunicaciones.

Para el desarrollo de este proyecto se hizo uso de la plataforma de desarrollo Labview, y del equipo Periférico Universal de Radio Software (USRP 2920) a través de las diversas herramientas de software como Instrumentos Virtuales (VIs), librerías y funciones, que se encargaron de desarrollar el sistema, aprovechando las prestaciones que se tiene a nivel de hardware, procurando evitar el retardo, desvanecimiento y pérdida de información para aumentar el rendimiento del sistema. Además se investigó el proceso de sincronización de una trama de datos en un sistema de comunicaciones OFDM que permiten la detección de las diferentes partes de la trama de datos de OFDM para mejorar el rendimiento del sistema.

La utilización de los equipos USRP 2920 en este proyecto de investigación ha permitido el desarrollo de tecnologías alternativas para la implementación de sistemas de comunicación inalámbricas, entre otras bondades, dejando un precedente en la Unidad Operativa de Investigación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para la realización de futuras investigaciones, de manera que se aproveche la adquisición de los equipos.

## **Abstract.**

This project aims to implement a wireless communications system based on the modulation technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), which optimizes the use of radio spectrum by using orthogonal subcarriers. To implement the system was used for Software Defined Radio technology (SDR), which allows you to replace the hardware part of a communications system, such as digital filters, amplifiers, modulators / demodulators signal encoders / decoders, mixers, etc. Using software developed based on the needs of any communications system.

For the development of this project it made use of the LabVIEW development platform and the Universal Software Radio Peripheral equipment (USRP 2920) through various software tools such as virtual instruments (VIs), libraries and functions that were responsible to develop the system, taking advantage of the benefits that have hardware level, trying to avoid the delay, fading and loss of information to increase system performance. Furthermore the synchronization process a data frame in OFDM communications system allowing the detection of the different parts of the OFDM data frame to improve system performance was investigated.

The use of computers in USRP 2920 this research project has enabled the development of alternative technologies for the implementation of wireless communication systems, among other benefits, leaving a precedent in Operational Research Unit, Faculty of Systems Engineering, Electronics Industrial and Technical University of Ambato, for future research, so that the acquisition of equipment to take advantage.

## Glosario de términos y acrónimos

- ADC: Conversor análogo-digital
- AM: Amplitud modulada.
- ASK: Modulación por conmutación de amplitud.
- BPSK: Modulación por conmutación de fase binaria.
- CP: Prefijo cíclico.
- CR: Cognitive Radio.
- DAB: Digital audio broadcasting
- DAC: Conversor Digital-Analogo. •
- DCS. SDigital Coummunication System..
- DFT : Transformada Discreta de Fourier.
- DIF: Diezmado en frecuencia.
- DSA: Dinamic Spectrum Access
- DSP: Procesamiento digital de Señales.
- FDM: Multiplexación por división de frecuencia.
- FFT: Tranformada rapida de Fourier.
- FFT: Transformada rápida de Fourier.
- FM: Frecuencia modulada.
- FPGA: Field Programable Gate Array.
- FSK: Modulación por conmutación de frecuencia.
- Gigabit Ethernet: Estándar para redes de área local.
- GPS: Sistema de posicionamiento global.
- GSM: Global system for mobile.
- ICI Inter carrier interference.

- IDFT: Transformada Discreta de Fourier Inversa.
- IFFT: Transformada rápida de Fourier Inversa.
- IP: Internet Protocol.
- ISI: Inter symbol interference.
- LabVIEW: Entorno de diseño de software.
- LTI: Linear time invariant.
- Matlab: Plataforma de desarrollo de software.
- MIMO: Multiple Input Multiple Output. mm: milimetro.
- NI: National Instruments.
- OFDM: Multiplexación por división de frecuencia ortogonal.
- PLC: Power Line Communication.
- PSK: Modulación por conmutación de fase.
- QAM: Modulación de amplitud en cuadratura.
- QPSK: Modulación por conmutación de fase cuaternaria.
- RF: Radiofrecuencia.
- Rx: Receptor.
- SDR: Software defined radio.
- SMA: Subminiature versión A.
- TCP: Protocolo de Control de Transmisión.
- TDM: Multiplexado por división de tiempo.
- TDT: Televisión digital terrestre.
- Tx: Transmisor.
- UHD: USRP hardware driver.
- USB: Universal Serial Bus.
- USRP: Universal Software Radio Peripheral.
- VI: Virtual Instrument



## INTRODUCCIÓN

El presente documento trata sobre el análisis de la sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM utilizando de Radio Definido por Software, a través de la plataforma de desarrollo Labview como software y el equipo USRP 2920 como hardware.

El desarrollo del proyecto, está enfocado en realizar un análisis de la sincronización de la trama de datos de la modulación OFDM para lo cual es necesario la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica basado en OFDM, además de aprovechar las altas prestaciones y utilidades que ofrece el uso del USRP 2920, convirtiéndose en una herramienta de desarrollo tecnológico de gran alcance.

En el capítulo uno, se plantea el problema que se requiere solucionar. El problema se basa en la utilización de métodos de sincronización que logren detectar las partes de una trama de datos basada en OFDM con el objetivo de mejorar el rendimiento de un sistema de comunicaciones inalámbricas que use este tipo de modulación; además se expone las causas y consecuencias del porque tecnologías como SDR y el uso del hardware USRP no son utilizados para el desarrollo de sistemas de comunicaciones y la aplicación de conocimientos teóricos del procesamiento digital de señales, principalmente. En la justificación se explica las razones por las cuales se decidió realizar el proyecto de investigación, entre las que constan la optimización de recursos económicos y tecnológicos al momento de implementar sistemas de comunicaciones. En la delimitación se indica las líneas y tipos de investigación de tal manera que la idea central del proyecto permanezca presente durante el desarrollo del mismo. Finalmente se exponen los objetivos generales y específicos, los cuales servirán de guía para el correcto desarrollo del proyecto que consiste en realizar un análisis de la trama de datos a través de la implementación de un sistema de comunicaciones inalámbricas basado en OFDM.

En el capítulo dos, se exponen los antecedentes investigativos acerca de proyectos que impliquen el uso de radio definido por software al igual que el uso del hardware USRP, ambos relacionados con aplicaciones basadas en la técnica de modulación OFDM y en sistemas de comunicaciones. También se presenta la fundamentación

teórica que permite tener un concepto mas amplio acerca de la modulación OFDM y su inserción en los sistemas de comunicaciones inalámbricas, logrando aclarar ideas para poder plasmarlas de manera eficiente en el desarrollo del proyecto. Finalmente se presenta la propuesta de solución al problema que consiste en la implementación de un sistema de comunicaciones inalámbricas basado en OFDM a través de SDR, para poder realizar el análisis respectivo de la sincronización de la trama de datos y entender el funcionamiento de la modulación OFDM en los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

En el capítulo tres, se expone la modalidad básica de investigación, la cual es analizada según los requerimientos del proyecto y el plan de recolección de información que da una pauta para poder realizar un análisis de lo desarrollado a lo largo de la investigación. Finalmente se presenta el desarrollo del proyecto, el cual debe estar directamente relacionado con los objetivos de la investigación, indicando.

En el capítulo cuatro se presenta el desarrollo de la propuesta, donde se detallan los procedimientos para la realización del análisis de la sincronización de la trama de datos en un esquema OFDM, relacionando el contenido teórico y científico con los diferentes procesos efectuados a lo largo de la investigación, recopilando información y comprobando el correcto funcionamiento del sistema implementado.

En el capítulo cinco se desarrollan las conclusiones y recomendaciones del proyecto, posterior a su culminación, en base a la información recopilada, dejando un precedente para futuras investigaciones acerca del tema desarrollado.

## CAPÍTULO 1

### El problema

#### 1.1. Tema de Investigación

“Análisis de la sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM utilizando radio definido por software.”

#### 1.2. Planteamiento del problema

La multiplexación por división en frecuencia ortogonal (OFDM) es una tecnología de modulación digital de multi – portadoras, considerada como imprescindible de la próxima generación de productos y servicios de radio frecuencia de alta velocidad para uso tanto personal como corporativo. Tiene como principal característica dar robustez a los sistemas de comunicaciones inalámbricas, que requieren una alta tasa de bits de transmisión y una alta velocidad de transmisión de información . [1]

OFDM, tiene como principio de funcionamiento dividir el espectro disponible en múltiples subportadoras para distribuir los datos espaciados entre si, en frecuencias concretas, optimizando el espectro radioeléctrico. Este método de modulación presenta problemas como dispersiones por multicanal, efectos de reflexión de la señal de información, alto costo de implementación, entre otros, lo que incide en su aplicación a gran escala, especialmente para el desarrollo de sistemas de comunicaciones inalámbricas. Un transmisor y receptor de un sistema de comunicación inalámbrica basado en OFDM, deben estar sincronizados, lo cual implica el apareamiento de problemas adicionales como muestreo incorrecto de la señal de información, detección incorrecta de la trama de datos, y desplazamiento de la frecuencia portadora, Sin embargo, se da mayor importancia a dos factores que presentan problemas al momento de desarrollar un sistema con modulación OFDM: las pérdidas de sincronización y el desplazamiento de la frecuencia portadora; los mismos que son causados por la naturaleza de la técnica de modulación. [2]

A nivel mundial, el progreso y mejora de tecnologías en los sistemas de

comunicaciones se ha vuelto necesaria, para el desarrollo social y económico. La introducción de la modulación OFDM en dichos sistemas permite mejorarlos, sin embargo, los problemas a nivel técnico como el caso de las pérdidas de sincronización, obligan a realizar una investigación, de manera que se este en la capacidad de desarrollar soluciones con el fin de mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicaciones inalámbricas. [3]

En el Ecuador, el uso del espectro radioeléctrico esta controlado por entidades gubernamentales, por lo tanto la optimización del uso de este recurso natural se vuelve una necesidad al momento de implementar un sistema de comunicaciones inalámbricas. Uno de los efectos producidos por la realización de la modulación OFDM, es el desplazamiento de frecuencias de la señal de información, lo cual satura el ancho de banda utilizado en este tipo de sistema, afectando directamente en el uso del espectro radioeléctrico, el cual debería ser optimizado para poder ser desarrollado de manera eficiente. Otro efecto negativo producido por la modulación OFDM, es la dificultad de crear elementos de hardware que permitan el desarrollo de esta modulación, lo cual deriva en el alto costo de implementación de este tipo de tecnología.

En la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, concretamente en la Unidad Operativa de Investigación, se dispone de equipos NI-USRP 2920, de reciente adquisición, que no están siendo óptimamente utilizados por falta de información y guías de usuario técnicas que permitan sacarle el máximo provecho, especialmente en la creación de sistemas de comunicaciones inalámbricas.

### **1.3. Delimitación**

Área: Comunicaciones

Línea: Tecnologías de comunicación

Sublínea: Comunicaciones inalámbricas.

Espacial: La investigación se desarrolló en Tungurahua, Ambato, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, Unidad Operativa de Investigación.

Temporal: La presente investigación se desarrolló en un período de ocho meses a partir de su aprobación realizada por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial el 4 de Noviembre del 2014.

## **1.4. Justificación**

La importancia de este proyecto se basa en el desarrollo e investigación de nuevas tecnologías que permitan mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicaciones inalámbricas; al ser tecnologías relativamente nuevas, no se dispone de información suficiente, por lo que su utilización es limitada. De ahí la importancia de desarrollar aplicaciones y mejorar los sistemas de comunicaciones inalámbricas como la implementación de la modulación OFDM a través de SDR, con el fin de analizar la sincronización de la trama de datos, mejorar la funcionalidad del sistema, y optimizar recursos en los costos de implementación.

El desarrollo de este proyecto surge por la necesidad de desarrollar y mejorar los sistemas de comunicaciones inalámbricas a través del uso de hardware reconfigurable en base a nuevas tecnologías que han impulsado la investigación con el objetivo de proporcionar información, en este caso a la Unidad Operativa de Investigación de la Universidad Técnica de Ambato y la Facultad de Ingeniería en Sistemas , Electrónica e Industrial, para que se realicen futuras investigaciones y se pueda aprovechar las ventajas y prestaciones que ofrecen equipos de desarrollo e investigación como el NI- USRP 2920. El uso de hardware reconfigurable en base a SDR, es el principal beneficio de este proyecto, razón por la cual la creación de aplicaciones basadas en nuevas tecnologías permitirá obtener soluciones alternativas a las existentes en base a una investigación de campo, acoplando los diferentes parámetros técnicos de hardware y software destinados a utilizarse en la elaboración del proyecto.

Para el desarrollo del proyecto de investigación se hizo uso de los módulos NI – USRP 2920, que representaron el canal inalámbrico del sistema de comunicación OFDM para la transmisión y recepción de la información. La tecnología radio definido por software SDR será desarrollada en el software LabVIEW, en el cual se hará los programas aplicativos correspondientes para el correcto desempeño del sistema.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. General**

- Implementar un sistema de análisis de sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM a través de radio definido por software.

### 1.5.2. Específicos

- Determinar las principales características de la técnica de modulación OFDM dentro de los sistemas de comunicación inalámbrica.
- Analizar las propiedades y funcionamiento del módulo NI – USRP 2920 en el desarrollo de la técnica de modulación OFDM.
- Diseñar el esquema de modulación OFDM a través de SDR, usando LabView como software y NI –USRP 2920 como hardware.

## CAPÍTULO 2

### Marco Teórico

#### 2.1. Antecedentes Investigativos

Un Estudio experimental de sistemas OFDM utilizando GNU Radio y USRP - SDR, fue desarrollado por A. Marwanto & M.A. Sarijari en la Universidad Tecnológica de Malasia. En este trabajo, se analizó la viabilidad del uso de GNU Radio que comprende una implementación SDR de código abierto y el software universal Radio Peripheral (USRP); elementos que sirvieron para transmitir y recibir la señales de radio OFDM con modulación QPSK y BPSK. [4]

Una investigación realizada en España, en la Universidad Carlos III de Madrid, por Víctor Pedro Gil Jiménez en el año 2005, desarrolló Algoritmos en Transmisión y Recepción para OFDM en entornos multiusuario. Para la realización de esta investigación se hizo un estudio generalizado de la modulación OFDM, realizando simulaciones en software para examinar las prestaciones de los algoritmos desarrollados que han proporcionado datos como las estimaciones en canal, uso de subportadoras etc. para el diseño e implementación de redes de gran capacidad. [3]

El proyecto de investigación realizado en la Escuela Superior Politécnica del Ejercito por Carlos Romero y Juan Quiroz en el 2013 plantea un Emulador de un sistema de comunicaciones utilizando tecnología SDR. En el proyecto se implementa una plataforma universal de procesamiento y transmisión de información por medio de radiofrecuencia utilizando módulos USRP como hardware y tecnología GNU radio como software, basado en SDR. Los módulos USRP trabajan en bandas de frecuencia de 99MHz y 2400MHz gracias al uso de tarjetas de radio frecuencia RFX900 y RFX2400. El tratamiento de las señales recibidas por la etapa de RF se realiza en forma digital mediante conversores Análogo – Digitales, para ser procesadas en banda base por un FPGA Altera Cyclone. Del trabajo se concluye que la implementación de GNU radio dentro de los sistemas de comunicaciones permite generar, modular, demodular y filtrar digitalmente las señales recibidas por el equipo USRP, sin necesidad de implementar hardware con costos elevados, por lo

que el USRP es un equipo que se perfila como una de las soluciones de hardware más prometedor para la construcción de una plataforma de radio definido por software permitiendo la transmisión y recepción de señales moduladas digitalmente mediante técnicas como OFDM, optimizando recursos.[5]

La implementación de algoritmos para la sincronización de la portadora y de la trama en un sistema de comunicación inalámbricas, utilizando LabVIEW y los módulos NI-USRP realizado por Eduardo Chancay y Carlos Chonillo en la Escuela Superior Politécnica del Litoral en el 2013 plantea el desarrollo de un sistema de comunicaciones inalámbricas basado en la técnica de modulación OFDM con el fin de analizar el comportamiento de la trama de datos de este tipo de modulación, identificando cada una de sus partes y su funcionalidad con el sistema. Para poder llevar a cabo esta investigación se procede a la simulación de un sistema de comunicaciones inalámbricas con transmisión y recepción utilizando la técnica de modulación OFDM. El esquema general de transmisión y recepción con múltiples portadoras esta implementado sobre la plataforma de programación LabVIEW basado en radio definido por software. Del trabajo se concluye que el desplazamiento de las frecuencias presenta problemas de retardo y distorsión de la señal de información, por lo que es importante encontrar una solución a este problema que a más de generar distorsión en la señal, aumenta el ancho de banda del canal de transmisión del sistema, desperdiciando el uso del espectro radioeléctrico. De este proyecto se concluye que la solución mas viable para resolver el problema del desplazamiento de frecuencias se necesita realizar métodos de sincronización de la trama de datos que identifiquen el fin y comienzo de la misma, a más de los intervalos de separación y todo lo relacionado al comportamiento de la trama dentro de la modulación OFDM. [6]

Un prototipo de implementación de la técnica de multiplexación OFDM y una aplicación de ésta para el estándar de televisión digital ISDB-Tb desarrollado por J Julio Mejía, Ronald García en la Escuela Superior Politécnica del Litoral plantea trabajo la implementación de cada una de las etapas conocidas de la modulación OFDM por medio de la plataforma de programación LabVIEW para posteriormente ser usados en los NI USRP. El sistema se somete a las diferentes pruebas para poder observar y verificar el funcionamiento de los algoritmos desarrollados frente a condiciones reales como variación de frecuencia. Del proyecto se concluye que la técnica de modulación OFDM tiene altas prestaciones y sus bondades pueden ser aprovechadas de manera que optimicen el funcionamiento de los sistemas de comunicación inalámbricas. OFDM es una técnica tan robusta que es capaz de resistir inconvenientes como las interferencias en los canales de transmisión



y recepción de la señal, el desvanecimiento selectivo de frecuencias entre otros problemas que se pueden controlar, permitiendo así la transmisión de múltiples subportadoras en un reducido ancho de banda de manera simultánea optimizando el uso del espectro radioeléctrico y mejorando la calidad en la información transmitida del sistema de comunicaciones. [7]

## 2.2. Fundamentación teórica

### 2.2.1. Sistemas de comunicaciones.

Un sistema de comunicaciones tiene como objetivo principal transportar información de un lugar a otro a través de procesos definidos. La transmisión, recepción y procesamiento de información son los procesos más importantes dentro de un sistema de comunicaciones, y se los realiza a través de circuitos eléctricos y electrónicos. La fuente de información de un sistema de comunicaciones puede ser analógica o digital. De cualquier forma se requiere que la señal de información sea convertida o transformada, para que pueda propagarse por el medio o canal de transmisión. La evolución a lo largo del tiempo de los sistemas de comunicaciones ha incidido de forma directa en la creación de nuevas tecnologías que permiten configurar los sistemas de distintas formas, expandiendo sus usos y aplicaciones. Los medios de transmisión han sido los que mas cambios han sufrido y entre ellos tenemos: el par de cobre, comunicaciones por radio frecuencia como microondas y satelitales, fibra óptica, etc.[8]

Para poder entender la estructura y funcionamiento de un sistema de comunicaciones se hace uso de un diagrama de bloques, detallado en la figura 1

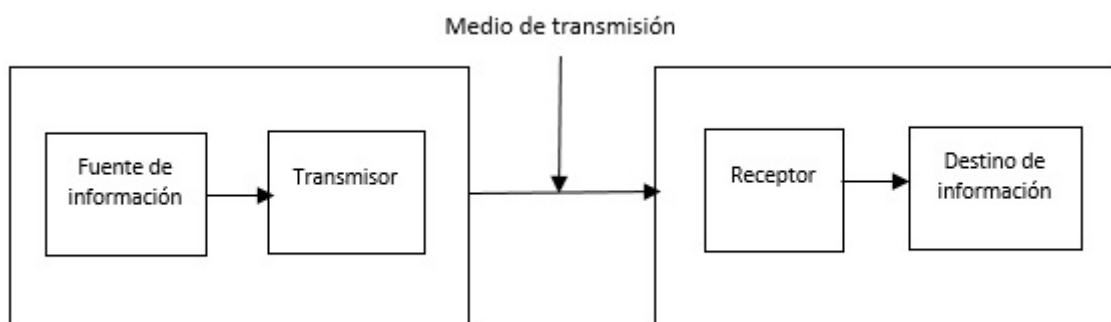


Figura 1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones  
Fuente: Sistemas de comunicaciones digitales [8]

El transmisor contiene un conjunto de dispositivos y circuitos electrónicos que recogen la señal de la fuente de la información y la convierten para poder ser

transmitida por el medio de transmisión el cual transporta las señales del transmisor hasta el receptor de diversas formas. El receptor acepta las señales que llegan desde el medio de transmisión y las convierte en su forma original para ser entregado al destino de la información.[8]

### **2.2.2. Sistemas de comunicaciones digitales.**

Los sistemas de comunicación digital (DCS) se han convertido rápidamente en los más usados para transmitir y recibir información, ya que a diferencia de los sistemas de comunicación analógicos, el tratamiento y procesamiento de las señales es mucho más fácil y el emisor solo tiene a su disposición un conjunto finito y discreto de formas de onda que debe hacer corresponder con los bits por transmitir a diferencia de los sistemas analógicos, en los cuales el número de posibles formas de onda por transmitir es infinito; todo esto de manera independiente al tipo de información que se desea transmitir.[9]

Los sistemas de comunicaciones digitales están conformados básicamente por un transmisor, un canal de transmisión y un receptor, los cuales se detalla más adelante. Generalmente en los sistemas de comunicación digital la señal de información que se desea transmitir está en forma analógica, aunque también existen sistemas en donde la señal de información se encuentra en forma digital. Si la señal de información es analógica, es convertida a digital a través de pulsos digitales, antes de ser transmitida y debe ser reconvertida a analógica en el receptor. Las diferentes ventajas que presentan los sistemas de comunicación digital han permitido evolucionar la comunicación a nivel general con el fin de dar solución a problemas a la hora de transmitir información; una de las virtudes de los DCS es producir una tasa de error binario (BER) relativamente baja. El BER es la relación que existe entre el número de bits recibidos de forma errónea respecto al total de bits enviados durante un intervalo de tiempo dentro de un sistema de transmisión de información. Al tener un valor bajo del BER, la calidad de transmisión de información es alta y da la posibilidad de detección y corrección de errores. Los sistemas de comunicaciones digitales son más seguros y pueden ser producidos a un costo menor que los analógicos. En lo que se refiere a hardware, los DCS, presentan mayores facilidades para su implementación. [10]

Para el tratamiento y procesamiento de señales, los DCS utilizan la técnica de multiplexado por división de tiempo (TDM), la cual consiste en ocupar un único canal de transmisión, el mismo que puede recibir la señal de información de distintas fuentes, por lo que debe tener una gran capacidad de procesamiento, optimizando el uso del medio o canal de transmisión a través del BER. Los mensajes pueden

ser transmitidos en grupos autónomos denominados paquetes. La técnica digital presenta condiciones naturales para el procesamiento de la señal que la protegen de interferencia. [10]

### Elementos de un sistema de comunicaciones digitales.

Un sistema de comunicaciones digitales tiene tres elementos básicos que son: transmisor, receptor y canal de transmisión. Cada uno de ellos contiene las diferentes etapas que se necesitan para transmitir información. En la figura 2 se detalla los elementos de un DCS, mediante un diagrama de bloques.

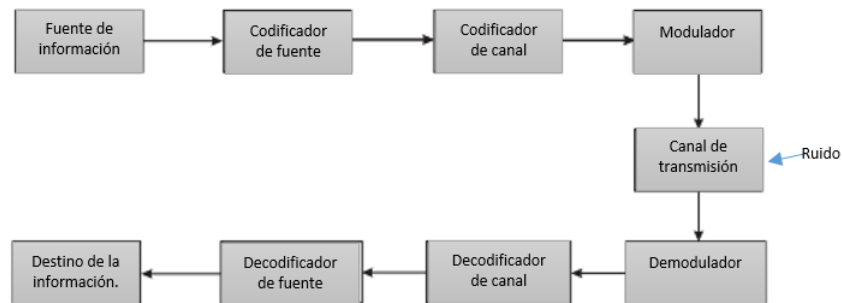


Figura 2: Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones digitales  
Fuente: Sistemas de comunicaciones digitales [8]

El primer bloque pertenece a la fuente de información, la cual puede ser tanto analógica; por ejemplo un amplificador de audio, y digital; por ejemplo una señal de reloj. Si la señal de la fuente de información es de tipo analógico, se necesita muestrear la señal para poder obtener o transformar a señal digital. Si la señal es netamente digital según el sistema que se tenga, la señal necesita ser filtrada o tratada con diversos métodos y dispositivos electrónicos. El segundo bloque llamado codificador de fuente se encarga de representar la señal de información de la fuente con la cantidad de bits más baja posible. La salida del codificador está correlacionada, es decir que el codificador se encarga de eliminar la redundancia que está presente en la señal de entrada. La cantidad de información por símbolo generada por una fuente viene medida por la entropía de la fuente. Se define a la entropía de la fuente como el número de bits por muestra necesarios para transmitir información de la fuente sin pérdidas. En síntesis, a la salida del codificador de fuente se obtiene un conjunto de bits que representan la información de una manera reducida eliminando la redundancia o información repetida que puede causar problemas en la transmisión de información.[8]

El tercer bloque llamado codificador de canal se encarga de introducir redundancia controlada de manera intencional en forma de bits, con el fin de detectar y

corregir errores. El tipo de codificación de canal que se utiliza depende de las características del canal de transmisión; algunos de ellos son: códigos de bloque, códigos convolucionales, códigos de rejilla, etc. El cuarto bloque llamado modulador se encarga de convertir la secuencia de bits de la salida del codificador de canal en un conjunto finito de formas de onda que se ajusten a las características del canal de transmisión, procurando utilizar formas de onda, cuyos valores de frecuencia, amplitud, etc. se encuentren dentro del espectro del ancho de banda del canal de transmisión. El canal de transmisión, es el medio físico por el cual se transmite la señal de información que sale del modulador del transmisor hacia el receptor; prácticamente existen dos tipos de medios o canales de transmisión: medios guiados, como el par de cobre o la fibra óptica y medios no guiados, como la atmósfera terrestre o el aire. Debido a la naturaleza en esta parte del sistema se adhiere ruido a la señal de información, que generalmente se lo conoce como ruido Gaussiano y ruido blanco. El ruido Gaussiano se lo asocia con la radiación de ondas electromagnéticas, y la interacción entre electrones. Cabe destacar que este tipo de ruido produce variaciones electromagnéticas en el orden de los micro voltios, por lo que es prácticamente despreciable en la mayoría de sistemas de comunicación digital. El ruido blanco, es una señal que se encuentra en todo el espectro radioeléctrico, de ahí su nombre de ruido blanco, ya que el color blanco contiene a todas las frecuencias del espectro radioeléctrico. Se caracteriza por ser una señal no correlativa, es decir que en un intervalo de tiempo, la señal toma valores que no tienen relación. En esta práctica nos vamos a centrar en un canal genérico que únicamente añade ruido a la señal transmitida.[9]

Los bloques de la figura 2 denominados demodulador digital, decodificador de canal, decodificador de fuente y destino de la información, pertenecen al receptor y realizan las funciones inversas al modulador digital, codificador de canal y codificador de fuente, respectivamente. El demodulador digital, se encarga de decidir qué forma de onda se envía en cada instante y, por lo tanto, decide el conjunto de  $n$  bits que se envían a través de técnicas de sincronización. El bloque decodificador de canal se encarga de detectar y corregir errores gracias a la redundancia introducida en la señal de entrada. El bloque decodificador de fuente se encarga de transformar la señal de entrada a la señal original, independiente del tipo de información que se haya transmitido.[9]

### **Capacidad de información.**

En un sistema de comunicación digital, la información se transmite a través de símbolos. La capacidad de información determina la cantidad de símbolos que se

pueden transportar en un sistema de comunicación digital por una unidad de tiempo determinada. Generalmente la información viene dada en bits, y lo que se busca es relacionar la información, con el tiempo de transmisión y el canal de comunicación a usarse. Para esto R. Hartley, en 1928, desarrolló una relación matemática entre el tiempo de transmisión y la capacidad de información.[8]

$$C = B * T \quad (1)$$

Donde  $C$  representa la capacidad de información en bits por segundo,  $B$  representa la amplitud de ancho de banda representada en Hertz y  $T$  el tiempo de transmisión en segundos.

C.E. Shannon relacionó la capacidad de información de un sistema de comunicaciones con el ancho de banda y la relación señal a ruido, buscando mejorar el enunciado emitido por Hartley, y tratando de llegar a una expresión matemática que se acerque a la realidad de la capacidad de información. Matemáticamente el enunciado del Teorema de Shannon que representa la capacidad de información viene dado por:

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \text{ (bits/segundo)} \quad (2)$$

Donde  $S/N$  representa la relación entre la potencia emitida por la señal y la potencia de ruido. De esta manera la ecuación 2 representa el teorema de Shannon-Hartley, el cual determina la capacidad de información del canal de transmisión, con un ancho de banda finito y una señal continua que por su naturaleza, sufre de ruido e interferencias. [8]

### 2.2.3. Tipos de modulación digital.

Al momento de transmitir información, en un sistema de comunicación digital, se procura transmitir la mayor cantidad de información posible simultáneamente mediante un canal o medio de transmisión, optimizando su uso y evitando que la señal de información se distorsione a causa de ruido e interferencias. Para poder conseguir que la transmisión de información sea fiable, se requieren varios procesos, entre ellos la modulación. Si se tiene una señal que contenga información, esta necesita ser transportada de transmisor a receptor. Para poder transportar la señal de información, se realiza el proceso de modulación, el cual consiste en insertar una onda portadora, que generalmente suele ser una señal sinusoidal, a mayor frecuencia, la cual se encarga de transportar la señal de información a través del canal o medio de transmisión, en base a cambios en sus valores de amplitud, frecuencia y fase.

En resumen la modulación es el proceso de introducir una señal analógica llamada portadora en un sistema de comunicaciones, cambiando sus propiedades en relación a la señal de información .[11]

Una señal analógica portadora de alta frecuencia variable en el tiempo se la puede representar como una onda senoidal de voltaje, matemáticamente representada por la siguiente ecuación:

$$v(t) = V \text{sen}(2\pi f_t + \theta) \quad (3)$$

Donde:

- $v(t)$  es el voltaje variable senoidalmente en el tiempo
- $V$  es la amplitud máxima en voltios
- $f_t$  es la frecuencia en hertz
- $\theta$  es el desplazamiento de fase en radianes. [8]

Los valores de  $V, f_t, \theta$  varían acorde al tipo de modulación que se desee realizar, sea en un sistema analógico o en un sistema digital, tal como lo indica la figura 3

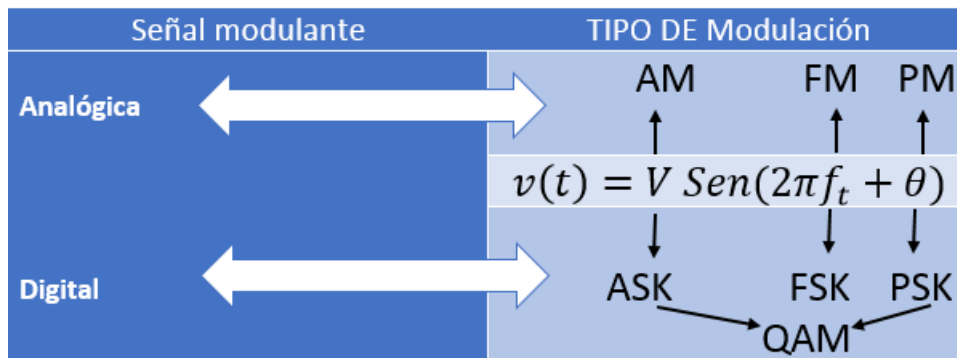


Figura 3: Variación de los parámetros de una onda portadora  
Fuente: Sistemas de comunicaciones digitales [8]

Se puede observar la ecuación típica de una onda portadora. En la cual, para un sistema de comunicaciones analógico, existen tres tipos de modulación. Si el valor de amplitud  $V$  de la onda portadora es proporcional a la señal de información analógica, se produce lo que se conoce como amplitud modulada (AM). Si se varía el valor de  $f_t$  de manera proporcional a la señal de información, se produce la frecuencia modulada (FM). Si se varía el valor de  $\theta$  en proporción a la señal de información se produce la modulación de fase (PM). Para un sistema de comunicaciones digitales, en el cual la señal de información es digital, al variar el valor de la amplitud  $V$  de manera

proporcional a la señal de entrada se produce lo que se conoce como modulación por conmutación de amplitud (ASK). Al variar el valor de  $f_t$  proporcionalmente con la señal de información digital se produce la modulación por conmutación de frecuencia (FSK). Si se varía el valor de  $\theta$  de forma proporcional a la señal de información, se obtiene la modulación por conmutación de fase (PSK). Al variar simultáneamente los valores de amplitud y de desplazamiento de fase en proporción a la señal de información, se obtiene la modulación por amplitud en cuadratura (QAM).[8]

### Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK)

ASK es la modulación digital mas sencilla, en la cual la onda portadora toma dos valores de amplitud, determinados directamente por la señal de información binaria. Normalmente el modulador transmite la portadora cuando el bit de datos es “1” y la suprime completamente cuando el bit es “0”. Cuando la amplitud de la señal modulada toma más de dos valores, a la modulación ASK se la denomina Multinivel. Matemáticamente, la ecuación que describe la modulación digital de amplitud mediante una señal binaria es:

$$v_{am}(t) = \left[ 1 + v_m(t) \left[ \frac{A}{2} \cos(w_c t) \right] \right] \quad (4)$$

Donde:

- $v_{am}(t)$  es el voltaje de onda de amplitud modulada
- $A/2$  es la amplitud de portadora no modulada
- $v_m(t)$  es la señal binaria modulada
- $W_c$  es la frecuencia de la portadora en radianes por segundo. [8]

En la figura 4 se representa la señal modulada ASK, en base a una onda portadora y una señal de información digital.

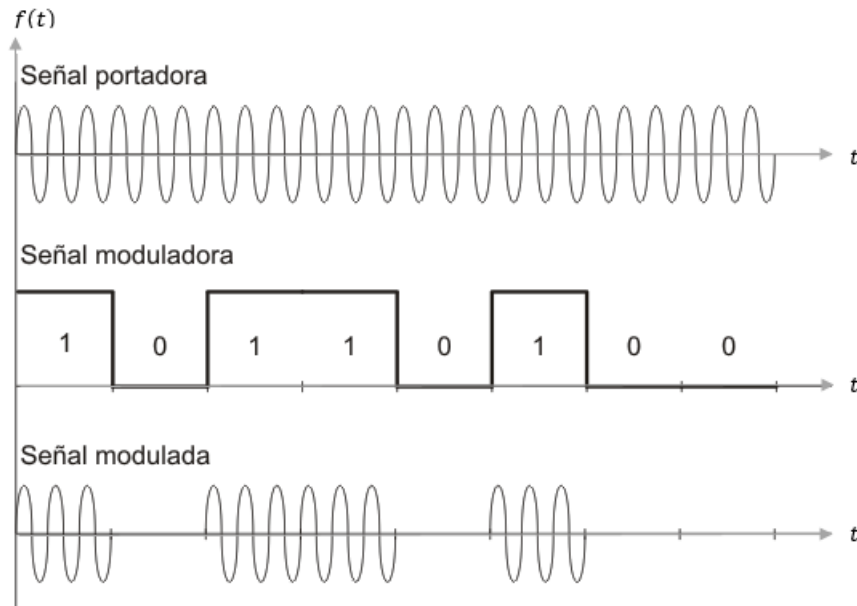


Figura 4: Señal modulada mediante ASK  
Fuente: Redes y Modulación Análoga-Digital [12]

Se observa que en la señal modulada los dos valores binarios se representan con dos amplitudes diferentes y es usual que una de las dos amplitudes sea cero; es decir uno de los dígitos binarios se representa mediante la presencia de la portadora a amplitud constante, y el otro dígito se representa mediante la ausencia de la señal portadora. El uso de portadoras analógicas de amplitud modulada para transportar información digital es de baja calidad y bajo costo por lo que no es común usarlo, especialmente en sistemas de comunicaciones digitales.

### Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)

FSK es un tipo de modulación de amplitud constante parecido a FM, donde la señal moduladora es una señal binaria que varía entre dos valores discretos de voltaje. La ecuación que describe de manera general a FSK es:

$$v_{fsk}(t) = V_c \text{Cos} \{2\pi [f_c + v_m(t)\Delta f] t\} \quad (5)$$

Donde:

- $v_{fsk}(t)$  representa la forma de onda binaria FSK
- $V_c$  es la amplitud de portadora.
- $f_c$  es la frecuencia central de la portadora.



- $\Delta f$  es la desviación máxima de frecuencia
- $v_m(t)$  es la señal moduladora de entrada binaria

A continuación se representa la señal modulada de FSK en la figura 5

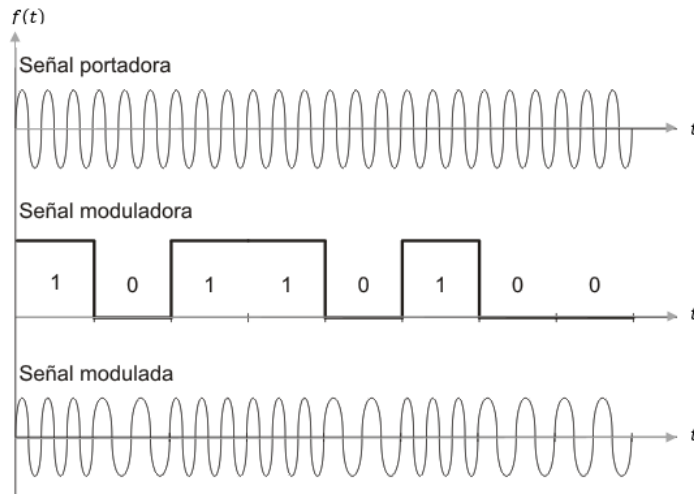


Figura 5: Señal modulada FSK  
Fuente: Redes y Modulación Análoga-Digital [12]

FSK es una modulación de frecuencia donde la señal moduladora es digital. En la figura 5 se observa que la señal modulada tiene dos valores binarios que se representan con dos frecuencias diferentes ( $f_1$  y  $f_2$ ) y se aproximan a la frecuencia de la señal portadora. Generalmente  $f_1$  y  $f_2$  corresponden a desplazamientos de igual magnitud pero en sentidos opuestos de la frecuencia de la señal portadora. El índice de modulación tiene gran incidencia en la señal modulada y determina los dos tipos fundamentales de FSK.

### Modulación por desplazamiento de fase (PSK).

Transmitir por desplazamiento en fase (PSK) es otra forma de modulación angular. El PSK es similar a la modulación en fase convencional, excepto que la señal de entrada es una señal digital binaria y son posibles un número limitado de fases de salida. En PSK, el valor de la señal moduladora  $V_m(t)$  es 1 para un "1" binario, y es -1 para un "0" binario, mientras que la señal portadora viene dada por la expresión matemática:[8]

$$v_p(t) = V_p \cos(2\pi f_p t) \quad (6)$$

Donde:

- $V_p$  es el valor máximo de amplitud de la señal portadora
- $f_p$  es la frecuencia de la señal portadora.

En la figura 6 se representa gráficamente a la señal moduladora PSK.

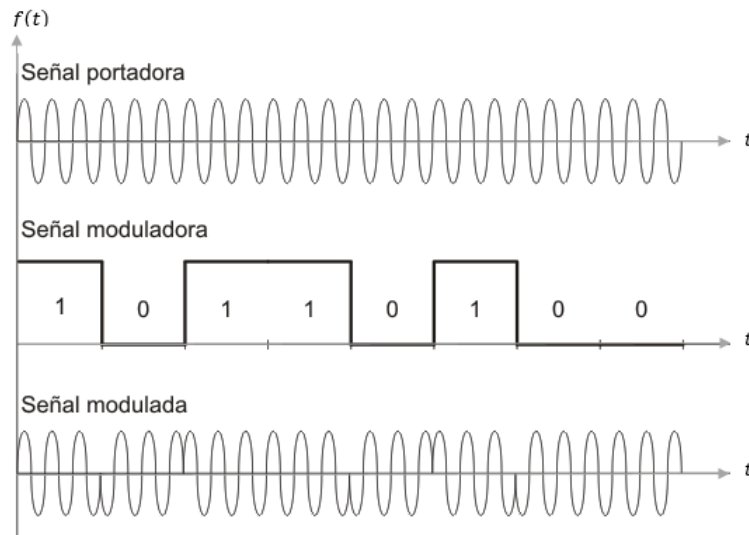


Figura 6: Señal modulador PSK  
Fuente: Redes y Modulación Análoga-Digital [12]

PSK es una modulación de fase donde la señal moduladora es digital y los valores de amplitud y frecuencia de la señal portadora permanecen constantes. En la figura 6 se observa que la señal portadora toma dos valores de fase, determinados directamente por la señal de datos binaria o la combinación de un determinado número de bits de la señal de información.

### Transmisión por desplazamiento de fase binaria (BPSK)

En la PSK de 2 fases, denominada 2-PSK, o Binary PSK (BPSK), la portadora toma dos valores de fase, determinados por la señal de datos binaria como se muestra en la figura 6. La señal de salida del modulador es la señal portadora de entrada desfasada  $180^\circ$ , en función de la señal de datos. Con la transmisión por desplazamiento de fase binaria (BPSK), son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Una fase de salida representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico. Conforme la señal digital de entrada cambia de estado, la fase de la portadora de salida se desplaza entre dos ángulos que están  $180^\circ$  desfasados. El BPSK es una forma de modulación de onda cuadrada de portadora suprimida de una señal de onda continua.[13]

## **Transmisión por desplazamiento de fase cuaternario (QPSK)**

La transmisión por desplazamiento de fase cuaternario (QPSK) es una técnica de modulación que usa como base la codificación M-ario. Este tipo de codificación se basa en tomar bits, de manera que M, representa la cantidad de condiciones o combinaciones posibles para determinada cantidad de variables binarias. Para el caso de QPSK, el valor de  $M=4$ , es decir que son posibles cuatro fases de salida, para una sola frecuencia de la portadora. Debido a que hay cuatro fases de salida diferentes, tiene que haber cuatro condiciones de entrada diferentes. Ya que la entrada digital a un modulador de QPSK es una señal binaria, para producir cuatro condiciones diferentes de entrada, se necesita más de un solo bit de entrada. Con 2 bits, hay cuatro posibles condiciones: 00, 01, 10 y 11. En consecuencia, con QPSK, los datos de entrada binarios se combinan en grupos de 2 bits. Cada código de 2 bits genera una de las cuatro fases de entrada posibles. Por tanto, para cada grupo de 2 bits introducidos al modulador, ocurre un solo cambio de salida. Así que, la razón de cambio en la salida es la mitad de la razón de bit de entrada. [8]

## **Modulación en amplitud y cuadratura.**

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM), es una forma de modulación digital en donde la información digital está contenida, tanto en la amplitud como en la fase de la portadora transmitida, es decir la unión de ASK y PSK. Se basa en la transmisión de dos mensajes independientes por un único camino. Esto se consigue modulando una misma portadora, desfasada  $90^\circ$  entre uno y otro mensaje, formando dos canales ortogonales en el mismo ancho de banda. [12]

## **Ventajas.**

Las principales ventajas de la modulación QAM son:

- Mayor inmunidad al Ruido.
- Menor consumo de energía eléctrica y menos costo de implementación
- Mayor capacidad para acarrear grandes cantidades de información.
- Proveen transmisiones de mejor calidad.
- Compatibilidad con servicios digitales de datos.
- Mayor seguridad en la transmisión de información. Inmunidad al ruido.

La inmunidad que tiene la señal modulada en cuanto a las perturbaciones y al ruido, es mayor cuanto más separados estén los puntos del diagrama de estados. Se trata, pues, de buscar una constelación de puntos con unas coordenadas de amplitud y fase que hagan máxima la separación entre ellos. Una constelación es una representación geométrica de señales en un espacio de  $n$  dimensiones, en donde se visualizan todos los símbolos de salida posibles que puede generar un modulador.

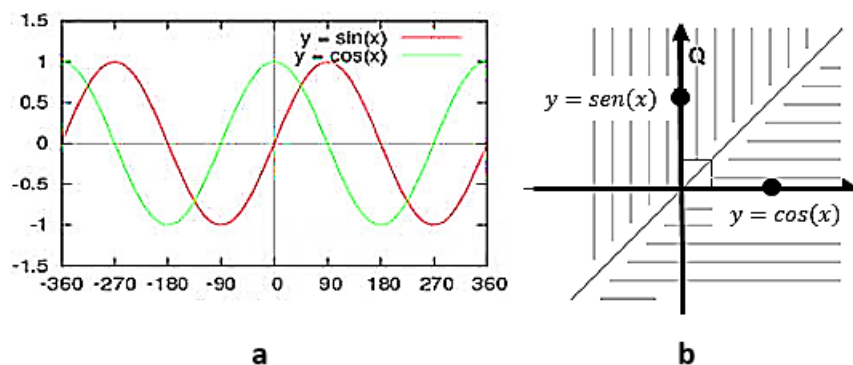


Figura 7: a) Señal en fase  $\cos(x)$  y señal en cuadratura  $\sin(x)$  b) constelación IQ de la señal

Fuente: Redes y Modulación Análoga-Digital [12]

En la parte a de la 7 se representa la amplitud y la fase de una señal que pueden modularse simultáneamente, sin embargo suele ser muy práctico separar la señal en dos componentes independientes conocidas como I que representa la componente en fase y Q que representa la componente en cuadratura, que son ortogonales entre sí. Por lo general se expresa la modulación en términos de estas dos componentes, razón por la cual, la representación de una constelación bidimensional I-Q es de gran utilidad en los sistemas de comunicaciones digitales y puede asociarse a la mayor parte de los métodos de modulación digital. En una constelación I-Q, la componente en fase se proyecta en el eje X y la componente en cuadratura se proyecta en el eje Y de un plano cartesiano, como se muestra en la parte b de la 7. Se dice que una señal está en fase cuando su ángulo de fase sea de cero grados y que una señal está en cuadratura cuando se encuentre desfasada  $90^\circ$  respecto a la señal en fase.

En la modulación QAM se envía una señal, de un grupo de  $n$  señales, con distintas combinaciones de amplitud y fase. Utilizando múltiples niveles, tanto en la modulación en amplitud como en la modulación en fase, es posible la transmisión de grupos de bits, de manera que cada uno de estos grupos será representativo de un conjunto nivel-fase característico de la portadora de la señal, mismo que dará cabida a un símbolo. Una de las características principales de la modulación QAM es que modula la mitad de los símbolos con una frecuencia y la otra mitad con la misma

frecuencia, pero desfasada  $90^\circ$ . El resultado de las componentes después se suma, dando lugar a la señal QAM. De esta forma, QAM permite llevar dos canales en una misma frecuencia mediante la transmisión ortogonal de uno de ellos con relación al otro.

### **Tipos de modulación en amplitud en cuadratura.**

**8-QAM Modulación de amplitud en cuadratura de 8 estados.** El QAM de ocho (8-QAM), es una técnica de codificación M-ario, en donde  $M = 8$ . A diferencia del 8-PSK, la señal de salida de un modulador de 8-QAM no es una señal de amplitud constante.

**16-QAM Modulación de amplitud en cuadratura de 16 estados.** Cada flujo de datos se divide en grupos de cuatro bits, y a su vez en subgrupos de 2 bits, codificando cada bit en 4 estados o niveles de amplitud de las portadoras.

**N-QAM Modulación de amplitud en cuadratura de n estados.** Cada bit se codifica en  $2n$  estados o niveles de amplitud de las portadoras.

### **2.2.4. Modulación OFDM.**

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, es la combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión el cual envía un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información, la cual es modulada en modulación de amplitud en cuadratura (QAM) o modulación por desplazamiento de fase (PSK). OFDM se basa en el funcionamiento de la técnica FDM (Multiplexación por división de frecuencia), en donde se requiere en lo posible transmitir información sobre un único canal de radio con la diferencia de que se lo hace de manera controlada, mejorando la calidad de transmisión y la eficiencia espectral. Para mejorar la eficiencia espectral, las sub-portadoras de la señal OFDM se encuentran solapadas intencionalmente, además de estar sincronizadas en tiempo y frecuencia para controlar los niveles de interferencia. La interpolación de sub portadoras causa el efecto de interferencia inter simbólica (ICI), el cual gracias a la naturaleza de la ortogonalidad en la modulación se reduce al mínimo. En resumen, OFDM se diferencia en muchos aspectos de FDM, especialmente en lo que se refiere a interpolación de portadoras y la eficiencia espectral, donde OFDM sincroniza sus portadoras para mantenerlas en un solo bloque y así reducir el uso del ancho de banda en un sistema de comunicaciones que es una gran ventaja al momento de optimizar el uso del espectro radioeléctrico.

En las figuras 8 y 9 se puede notar el comportamiento diferente de FDM con OFDM: [2]



Figura 8: Portadoras en esquema FDM  
Fuente: Introducción a OFDM [14]

Se detalla un diagrama de portadoras basadas en FDM, en donde cada portadora ocupa un canal exclusivo centrado en una frecuencia y separado de los otros canales por un espacio llamado banda de guarda. Este espacio implica usar un mayor ancho de banda para transmitir información.



Figura 9: Portadoras en esquema OFDM  
Fuente: Introducción a OFDM [14]

En la figura 9 se detalla un esquema de portadoras basadas en la modulación OFDM, en la cual se divide un canal en un número determinado de bandas de frecuencia equiespaciadas; en cada banda se transmite una subportadora que transporta una porción de la información de manera sincronizada. Debido al problema técnico que se producen al generar y detectar en tiempo continuo el número de portadoras equiespaciadas que forma OFDM, los procesos de multiplexación y demultiplexación se realizan en tiempo discreto mediante la transformada discreta de Fourier inversa (IDFT) y la transformada discreta de Fourier (DFT) respectivamente. [15]

La técnica de espectro disperso de OFDM distribuye los datos en un gran número de portadoras espaciadas entre sí y ubicadas en ciertas frecuencias concretas. Esta separación frecuencial evita que los demoduladores consideren frecuencias distintas a las suyas propias. En la figura10 se observa las diferencias entre los espectros de

una transmisión usando una técnica multiportadora normal y una transmisión con portadoras ortogonales usando OFDM.

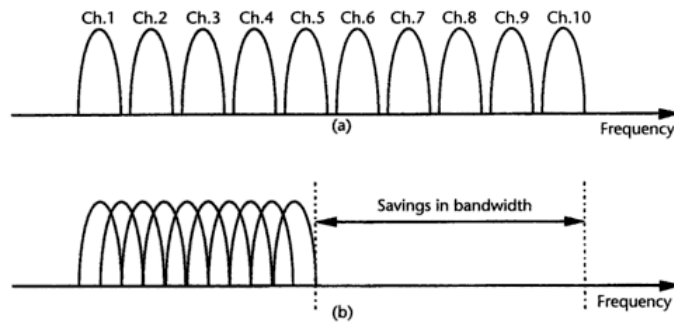


Figura 10: a) Multiportadora normal b) Multiportadora OFDM  
Fuente: OFDM for wireless multimedia communications [2]

Como indica la parte a de la figura 10, en técnicas de modulación normales, las portadoras están espaciadas, por lo que se aumentan los canales de transmisión de la señal, y el ancho de banda, reduciendo la capacidad del sistema. En la parte b de la figura 10 se representa el espectro de una señal OFDM respecto a otras técnicas de modulación, en la cual se logra apreciar que se reduce su ancho de banda, es decir se puede transmitir mayor cantidad de información, con un ancho de banda reducido, aumentando la capacidad de transmisión de información del sistema, es por eso que este tipo de modulación se usa para transmisiones de grandes cantidades de información, como redes de fibra óptica, señales de televisión digital terrestre, entre otros. Una de las principales características de OFDM, es la utilización de la transformada rápida de Fourier, para lograr la transmisión por medio de subportadoras paralelas de manera que se elimina en lo posible la interferencia entre ellas. [2]

### Principio de ortogonalidad.

El principio de ortogonalidad es quizá la principal característica de un esquema de modulación OFDM, ya que permite la transmisión simultánea en un estrecho rango de frecuencias y sin que se produzcan interferencias entre ellas, logrando una eficiencia espectral equivalente a doble de las señales QPSK y QAM, señales en cuya modulación, es basada OFDM. permitiendo que múltiples señales de información sean transmitidas sobre un canal común y detectadas sin interferencia. La pérdida de ortogonalidad en un sistema, da como resultado degradación en la comunicación debido al deterioro de las señales. Algunos esquemas de multiplexación son naturalmente ortogonales como es el caso de la Multiplexación por división de

tiempo (TDM). En el dominio de la frecuencia las portadoras en una señal OFDM están espaciadas tan cerca como es teóricamente posible mientras se mantenga la ortogonalidad entre ellas, tal como se muestra en la figura 11.

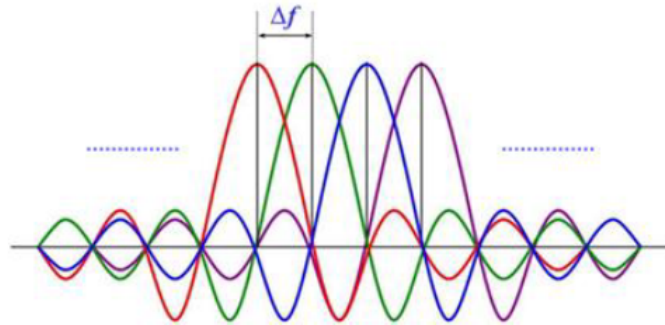


Figura 11: Portadoras ortogonales en OFDM  
Fuente: Multiplexacion por Division Ortogonal de Frecuencia[14]

En la figura 11 se logra apreciar que OFDM usa la ortogonalidad colocando cada una de las señales de información dentro de las diferentes subportadoras. La frecuencia de banda base de cada sub-portadora es escogida para ser un entero múltiple del inverso de la tasa de símbolo “symbol rate” resultando en que todas las portadoras tengan un número entero de ciclos por símbolo. Como consecuencia de esto las portadoras son ortogonales entre sí.

### Prefijo cíclico (CP).

El prefijo cíclico (CP), nace como una solución a un problema que tiene el proceso de modulación OFDM, se trata del efecto ISI (interferencia inter simbólica), el cual se produce principalmente en los sistemas de comunicación inalámbrica.

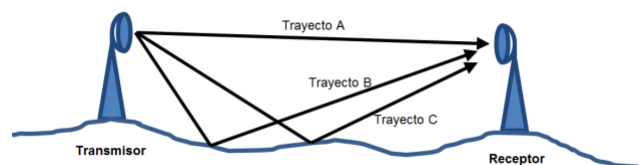


Figura 12: Ejemplo de un sistema de comunicación inalámbrica  
Fuente: Modulación OFDM[16]

La figura 12 muestra lo que ocurre habitualmente con un sistema de comunicaciones inalámbricas. El transmisor envía información a través de un medio no guiado, la cual tiene tres caminos para llegar al receptor. El camino mas corto es el trayecto A, por lo que la información llegará al destino primero. Segundo lo hará el trayecto



B, y tercero el trayecto C, Cabe señalar que las señales que van por los 3 trayectos son las mismas, pero llegan en tiempos diferentes, generando un retardo o eco, el cual provoca que los símbolos que forman la señal recibida se entremezclen unos con otros. Este fenómeno característico de los medios de transmisión multitrayecto se denomina “interferencia entre símbolos”, o ISI por sus siglas en inglés (Inter-Symbol Interference). El ISI, se produce por el eco generado en los medios de transmisión, y su nivel depende principalmente del medio de propagación en que se encuentre, independientemente de la técnica de modulación que se utilice. OFDM se caracteriza por tener símbolos muy largos que se separan entre sí un determinado intervalo de tiempo para evitar que se entremezclen unos con otros debido a la interferencia inter simbólica.[16]

Es decir que durante el intervalo de tiempo de transmisión de los símbolos de OFDM, el CP se encarga de transmitir una réplica de la parte final del símbolo al que precede, con el objetivo de conservar la periodicidad cíclica del símbolo. El CP debe durar como máximo la cuarta parte de la duración de cada símbolo en la transmisión de información. Si el valor del CP es muy grande, se produce un retardo de señal, y se disminuye la tasa de error de bit (BER). Al insertar el CP, la ortogonalidad entre portadoras se mantendrá intacta y conservará el número entero de ciclos.[14]

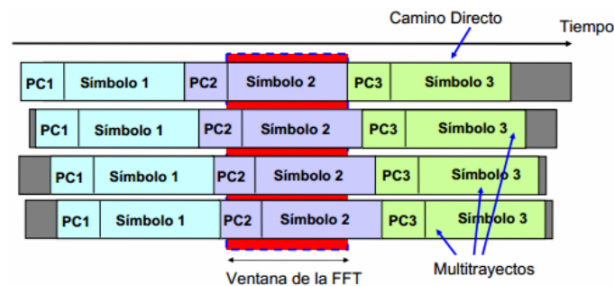


Figura 13: Inserción de CP en un símbolo OFDM  
Fuente: Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia [14]

En la figura 13 se puede observar tres símbolos OFDM, cada uno de ellos formado por una parte útil y un prefijo cíclico. Cada símbolo es precedido por un prefijo cíclico para formar el símbolo OFDM completo. Gracias a ese prefijo cíclico se pueden concatenar varios símbolos OFDM uno detrás de otro sin importar que el eco del medio de propagación los mezcle entre sí, evitando de esta forma las interferencias en la señal de información. Un esquema de OFDM se lo realiza entonces mediante procesos, como el muestreo de la señal, la modulación por fase y cuadratura, la inserción del prefijo cíclico, etc. Procesos que se pueden abreviar en un solo bloque como lo indica la figura 14, al momento de realizar la modulación por medio de radio

frecuencia.

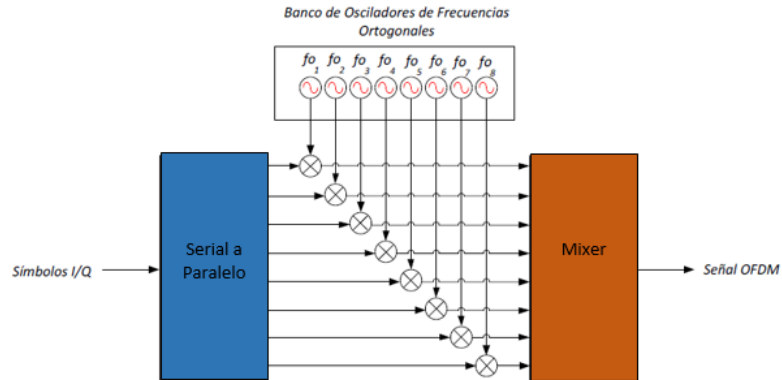


Figura 14: Esquema de modulación OFDM con 8 sub portadoras.  
Fuente: Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia [14]

En la figura 14 se observa un esquema de modulación OFDM que tiene 8 frecuencias ortogonales o sub portadoras, transmitidas a través de radiofrecuencia, donde los osciladores de portadora introducen problemas de linealidad y sincronización.

### Estándares de la modulación OFDM

Algunos de los estándares utilizados por OFDM son los siguientes:

#### IEEE 802.11a

Es un estándar donde se especifica una modulación ortogonal por división en frecuencia, OFDM, para la entidad física, y las modificaciones que hay que hacer a los datos recibidos de la capa superior para conformar la trama que pasará a modularse. Las bandas de trabajo a las que se refiere el estándar son de 5.15-5.825 GHz. En la figura se puede apreciar un transceptor estandarizado del estándar IEE 802.11a, usando la técnica de modulación OFDM. [15]

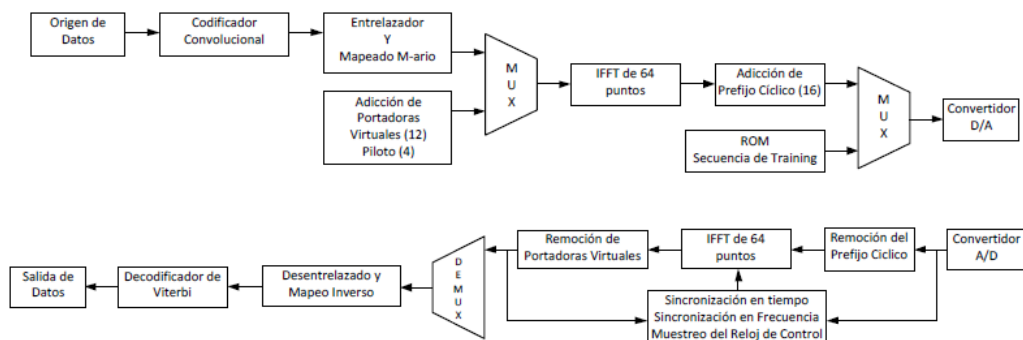


Figura 15: Transceptor utilizando OFDM en base a 802.11a  
Fuente: Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia [14]

En la figura 15 se observa que el número de portadoras que se adiciona al sistema es de 4, el número de puntos o muestras de la IFFT es 64, la longitud del prefijo cíclico es 16. Estos valores son estandarizados y se recomienda usarlos a lo largo de la implementación de sistemas OFDM.

#### **IEEE 802.11g**

El estándar 802.11g usa la misma tecnología de transmisión que el 802.11a, OFDM, lo que aumenta la tasa de transmisión. Sin embargo, la banda de trabajo la sitúa en los 2.4 GHz, en lugar de en los 5GHz del 802.11a, y a semejanza del 802.11b. A modo de esquema, presentamos las mejoras que el estándar IEEE 802.11g ofrece con respecto a los demás estándares 802.11: - Provisión de cuatro capas físicas diferentes. - El uso obligatorio del preámbulo corto. - Nuevos mecanismos de protección para satisfacer los aspectos de la interoperabilidad.[15]

#### **IEEE 802.16**

En el estándar 802.16 se recoge, de nuevo, el uso de OFDM como una opción más de modulación. Se especifican 64, 2048 o 4096 subportadoras. No todo el ancho de banda estará “lleno” de portadoras. Las bandas de guarda son necesarias para permitir la caída del espectro en los laterales, por lo que algunas subportadoras marginales se pondrán a cero. Otras portadoras se usarán como pilotos – como viene siendo habitual- para tareas de estimación del canal y de tracking. Análogamente, los símbolos OFDM irán precedidos por un intervalo de guardia por razones bien conocidas.[15]

#### **DVB-T**

El estándar europeo de televisión digital terrestre DVB-T se basa en su totalidad en la modulación OFDM. El principio de operación de este estándar, llamado OFDM codificado (COFDM) guarda ciertas semejanzas con el estándar 802.16. Especifica la señal modulada digitalmente en el lado del modulador y deja abierta las especificaciones en el lado del receptor para diferentes soluciones. El nuevo sistema tenía que operar con el espectro UHF existente para transmisiones analógicas lo que significa que tenía que ofrecer suficiente protección contra altos niveles de interferencia de canal y suficiente protección contra interferencia de canal adyacente ACI. [15]

### **Aplicaciones de OFDM**

Entre las aplicaciones que usan la modulación OFDM, destacan:

- Desarrollo del protocolo de enlace de red DSL (Digital subscriber line) llamado también línea de abonado digital

- Desarrollo del protocolo de red de área local Wireless LAN IEEE 802.11 a,g,n.
- Desarrollo de redes WiMAX
- Redes de PLC (Power Line Communications)
- Base principal para la tecnología TDT (televisión digital terrestre) y sus estándares DVB-T e ISDB-T.
- Modulación base en el desarrollo de DAB (digital audio broadcasting) conocido también como radio digital.
- Aplicación en el funcionamiento de DRM (Digital radio mondiale)
- Redes de Telefonía móvil 4G LTE (Long Term Evolution) [2]

#### 2.2.5. Sincronización de trama.

##### **Sincronización.**

El término sincronizar en comunicaciones digitales hace referencia a la coincidencia que se debe tener en el tiempo entre las señales de información. Las señales de sincronización, de un sistema de comunicación digital son parte importante dentro del proceso de transmisión de información, ya que permiten recuperar correctamente la información transmitida a través de un proceso de reconocimiento de señales de diferentes tipos, detalladas a continuación:[17]

- **Sincronización de bit:** También denominada sincronización de reloj, permite distinguir el intervalo correspondiente a cada uno de los bits transmitidos. La sincronización de reloj asegura que el transmisor y el receptor coincidan en un intervalo preciso de tiempo para que se presente un bit. Cuando se recibe una cadena continua de datos, es necesario identificar cuáles bits pertenecen a cuáles caracteres y cuál bit es el menos significativo de los datos, el bit de paridad y el bit de paro.
- **Sincronización de trama:** Permite separar los distintos grupos de bits de una transmisión múltiplex de forma que los bits recibidos se puedan clasificar y dirigir al canal de salida apropiado, evitando pérdidas en la información por el desfase de la señal.
- **Sincronización de portadora:** Recupera la frecuencia y la fase de la portadora utilizada en la señal de transmisión, para la detección de la señal de información.

Los sistemas de comunicación digital están diseñados de tal forma que las señales de sincronismo se pueden recuperar a través de la señal recibida o de la información recibida de un canal dedicado exclusivamente a transmitir la información de sincronismo. Para el desarrollo de este proyecto se necesita conocer la manera de trabajar de la sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM, por lo que se detalla información acerca de este tipo de sincronización.[8]

### Estructura de una trama de datos.

Una trama de datos, representa un conjunto o una secuencia de bits asociados o empaquetados acorde al sistema y tipo de transmisión que se desee realizar. Una trama está compuesta por varias partes o etapas, que permiten realizar detección y corrección de errores en la transmisión, controles con diversos métodos como redundancia cíclica, sincronización, encabezado y cola de trama, etc.

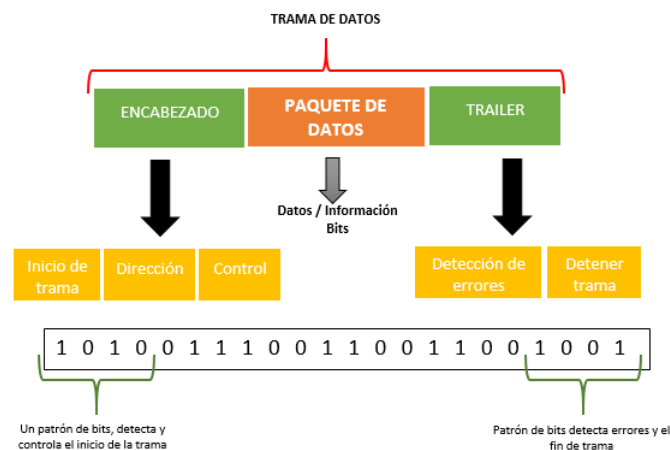


Figura 16: Estructura generalizada de una trama de datos  
Fuente: Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia [17]

En la figura 16 se observa la estructura generalizada de una trama de datos, donde el encabezado contiene información del inicio de la trama, datos y direcciones de origen y destino de la trama, el tipo de paquete que transporta la información y el control de flujo de información, representado en un conjunto de bits que permiten realizar cada uno de los procesos del encabezado. El paquete de datos o información, que tiene la información a ser transmitida, de igual forma en un conjunto de bits. La cola o trailer, que contiene información de control para la detección de errores en la transmisión e identifica el final de la trama de datos.[17]

### Sincronización de la trama.

El propósito de la sincronización de trama es resolver el retraso del periodo de símbolo transmitido, determinando el comienzo de la trama y encontrando una referencia conocida en la señal transmitida de manera que los procesos como estimación de canal y ecualización de la señal se desarrollen con normalidad. Generalmente para la realización de la sincronización de trama, se realiza y se estudia algoritmos de sincronización basados en la frecuencia de portadora. [1]

#### 2.2.6. Transformada de Fourier.

El análisis de Fourier, comprende un conjunto de herramientas matemáticas que sirven para transformar señales de información, que se encuentran en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia; también es posible transformar de forma inversa, señales, del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, obviamente tomando el nombre de transformada inversa de Fourier; Su denominación se debe a su autor, Joseph Fourier, matemático y físico. Al realizar el proceso de transmisión existe pérdida temporal de información, lo cual representa uno de los inconvenientes que presenta la transformada de Fourier al momento de ser aplicada a cualquier sistema de comunicación.[18]

El resultado de realizar la transformada de Fourier, es obtener el espectro de frecuencias de una función. Por ejemplo, si se tiene una onda cuadrada como la de la figura 17 con un período T:

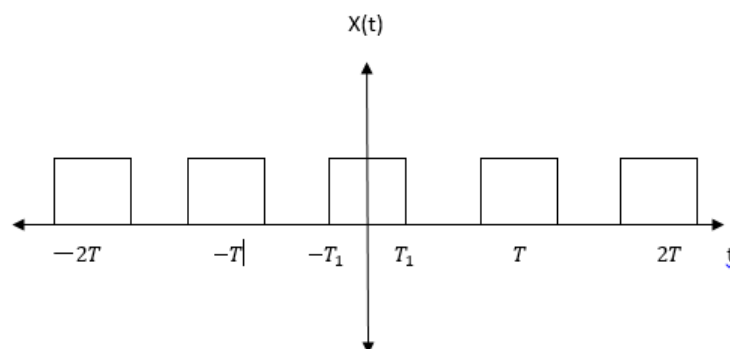


Figura 17: Onda cuadrada periódica continua  
Fuente: Señales y sistemas [18]

Se la puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$x(t) = 1, \rightarrow t \leq T_1 - 1 \quad (7)$$

$$x(t) = 0, \rightarrow T_1 \leq t - 1 \leq T/2$$

Al ser una expresión que está en el dominio del tiempo, se aplica la transformada de Fourier, para pasarlo al dominio de la frecuencia, a través de una frecuencia fundamental  $\omega_0$ , la cual es igual a la razón entre  $\frac{2\pi}{T}$  y representa los puntos de corte de la señal e función de la frecuencia. El pasar una señal en función del tiempo a la frecuencia representa muchas ventajas en el análisis de señales. Es más fácil saber sobre qué ancho de banda se concentra la energía de una señal analizándola en el dominio de la frecuencia. También sirve para resolver ecuaciones diferenciales con mayor facilidad y, por consiguiente, se usa para el diseño de controladores clásicos de sistemas realimentados, y para el diseño de filtros de radio transistores. La transformada de Fourier también se utiliza en el ámbito del tratamiento digital de imágenes, como por ejemplo para mejorar o definir más ciertas zonas de una imagen fotográfica o tomada con una computadora. [19]

### 2.2.7. Transformada discreta de Fourier.

El análisis de Fourier de sistemas continuos, es una de las herramientas matemáticas más usadas dentro de los sistemas de comunicaciones digitales. La Transformada Discreta de Fourier (DFT) es el equivalente discreto de la Transformada de Fourier donde se ha transformado la variable continua 't' por la variable discreta 'nTs' siendo 'Ts' el periodo de muestreo, es decir que la DFT permite mapear secuencias un total de "n" veces. La DFT es una secuencia, no una función de una variable continua, y corresponde a muestras equiespaciadas en frecuencia de la transformada de Fourier en tiempo discreto de la señal. Además de su importancia teórica como representación de Fourier de secuencias, la DFT tiene un importante rol en la realización de una gran variedad de algoritmos de tratamiento digital de señales. Una representación matemática de la DFT, es la siguiente:[19]

$$x(n) \longleftrightarrow X(k) \quad (8)$$

Es decir que si se tiene una señal  $x(n)$  que es una secuencia de longitud N, su DFT será una señal  $X(k)$ , expresada por la siguiente ecuación:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{(N-1)} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (9)$$

La Transformada discreta de Fourier Inversa (IDFT) se expresa matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi k n / N} \quad (10)$$

La DFT nos permite representar una señal  $x[n]$  o un sistema LTI en uno u otro dominio sin pérdida de información. La DFT proporciona  $N$  coeficientes espectrales  $X[k]$  de una señal  $x[n]$  de la que se han tomado  $N$  muestras, e inversamente la IDFT genera los  $N$  valores muestreados de la señal  $x[n]$  a partir de las  $N$  muestras espectrales. Los valores de  $X[k]$  se pueden considerar como muestras separadas por la resolución espectral, tomadas en el dominio de la frecuencia y cuya envolvente es la Transformada de Fourier. [19]

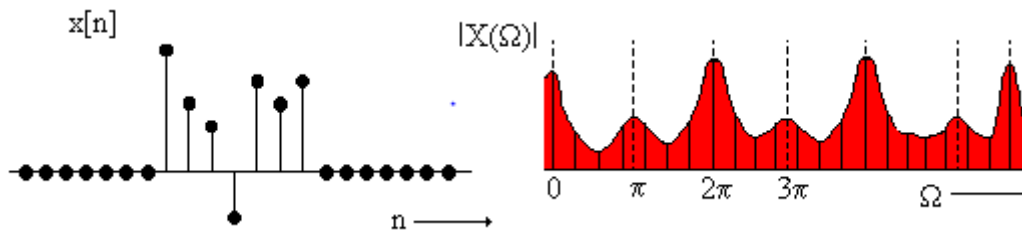


Figura 18: Señal muestreada  $x(n)$  y su espectro  $X(\Omega)$

Fuente: Señales y Sistemas, Análisis mediante métodos de transformada y matlab[19]

La figura 18 muestra una señal real muestreada  $x[n]$  la cual se considera no periódica, y de la que se han tomado  $n$  muestras consecutivas. Como toda señal,  $x[n]$  tiene asociada un espectro  $X(\Omega)$  continuo y periódico, del cual se representa sólo la magnitud.

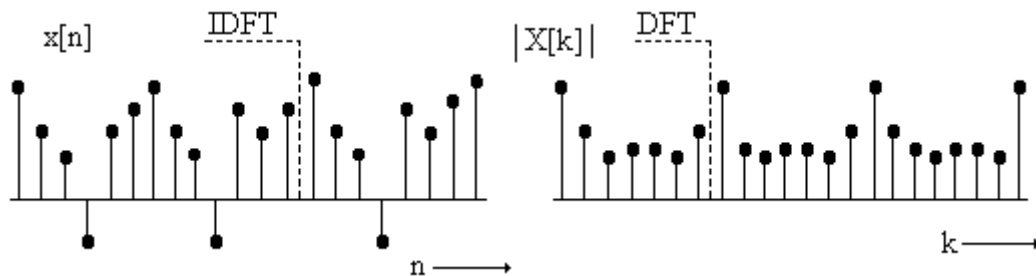


Figura 19: Transformada DFT e IDFT de la señal  $x(n)$

Fuente: Señales y Sistemas, Análisis mediante métodos de transformada y matlab[19]

La figura 19 representa una versión periódica de la misma señal  $x(n)$ , así como



los coeficientes de la transformada discreta de Fourier. Los coeficientes espectrales  $X[k]$  se puede interpretar como muestras de  $X(\Omega)$  tomadas con una determinada resolución espectral  $d_f = \frac{1}{N.T}$ . [18]

A continuación se detallan las propiedades de la transformada discreta de Fourier.

- LA DFT es lineal.

Si  $x_1[n] \longleftrightarrow X_1[k]$  y  $x_2[n] \longleftrightarrow X_2[k]$

entonces  $A_1 x_1[n] + A_2 x_2[n] \longleftrightarrow A_1 X_1[k] + A_2 X_2[k]$

- La DFT e IDFT son periódicas.

Si la DFT de  $x[n]$  se evalúa fuera del rango  $0 \leq n \leq (N - 1)$

entonces  $X[k] = X[k + N]$  para cualquier valor de  $k$ .

- Traducción en el tiempo.

Si  $x(n) \longleftrightarrow X(k)$ , entonces

$$x(n - n_0) \longleftrightarrow X(k) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N} \cdot k \cdot n_0}$$

- Convolución

Si  $x_1[n] \longleftrightarrow X_1[k]$  y  $x_2[n] \longleftrightarrow X_2[k]$

$$\text{entonces } \sum_{m=0}^{N-1} X_1(n) \cdot X_2(m - n) \longleftrightarrow X_1[k] \cdot X_2[k]$$

- Modulación.

Si  $x_1[n] \longleftrightarrow X_1[k]$  y  $x_2[n] \longleftrightarrow X_2[k]$

$$\text{entonces } x_1[n] \cdot x_2[n] \longleftrightarrow \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X_1(m) \cdot X_2(k - m)$$

### 2.2.8. Transformada rápida de Fourier FFT/IFFT.

Las Transformadas Rápidas de Fourier son algoritmos especializados que permiten a un procesador digital hacer el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier de una forma eficiente. Se busca realizar la representación de una señal originalmente adquirida en el dominio del tiempo, como función del dominio de la frecuencia. Dado que el proceso inverso también se puede implementar mediante este algoritmo, se concluye que la FFT permite pasar de un dominio cualquiera al otro. Por tratarse de un algoritmo desarrollado para un procesador digital, se necesita manejar las secuencias discretas de las funciones a tratar, ya que un sistema de cálculo artificial tiene recursos limitados de memoria y capacidad de procesamiento por lo que no se puede pensar en procesar las secuencias infinitas en el dominio del tiempo o la frecuencia de manera continua. [11]

La DFT tiene un papel muy importante en el diseño, análisis y realización de sistemas y algoritmos de tratamiento de señales en tiempo discreto. Las propiedades básicas de la transformada de Fourier y de la transformada discreta de Fourier permiten analizar y diseñar algoritmos que se adaptan a las necesidades del tratamiento digital de señales. Es igualmente importante el hecho de que existen algoritmos eficientes para el cálculo explícito de la DFT. Como resultado, la DFT se convierte en un componente importante en muchas aplicaciones prácticas de los sistemas en tiempo discreto. Uno de los algoritmos aritméticos más utilizados es la transformada rápida de Fourier, un método capaz de ejecutar un cálculo matemático básico y de frecuente empleo. La transformada rápida de Fourier es de importancia fundamental en el análisis matemático y ha sido objeto de numerosos estudios. Una clase de algoritmos particularmente eficientes para el cómputo digital de una DFT de  $N$  puntos, se denominan colectivamente transformada rápida de Fourier (FFT). Para conseguir la máxima eficiencia, los algoritmos FFT deben calcular los  $N$  valores de la DFT.[3]

### **Algoritmo para la FFT.**

Para implementar la FFT existen algunos procedimientos tales como el diezmado en frecuencia (DIF del inglés Decimation In Frequency) , diezmado en el tiempo (DIT del inglés Decimation In Time) , doblamiento sucesivo, Radix-2, entre otros. Normalmente los algoritmos de transformadas rápidas de Fourier se introducen como un proceso eficiente de cálculo en el que la suma de la DFT se descompone en dos sumas, cada una con la mitad del número total de muestras. Para el desarrollo de este proyecto se investigó el funcionamiento del algoritmo denominado doblamiento sucesivo.

### **Doblamiento sucesivo.**

La ecuación 9 involucra un número de sumas y multiplicaciones complejas que es proporcional a  $N^2$ . Para cada uno de los  $N$  valores de  $k$ , la expansión de la sumatoria requiere  $N$  multiplicaciones complejas de  $f(x)$  por  $e^{-j2\pi kx/N}$  y  $(N-1)$  sumas de resultados. El término  $e^{-j2\pi kx/N}$  puede ser calculado de una vez, y la multiplicación de  $k$  por  $x$  en este término no se contabiliza normalmente como parte de la implementación del algoritmo. La descomposición de estos miembros de la ecuación 9 permite reducir el número de sumas y multiplicaciones a un valor proporcional a  $N \log_2 N$ . [3]

Para simplificar las expresiones, la ecuación 9 se escribe como:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{(N-1)} x(n) W_N^{kx} \quad (11)$$

Donde:

$$W_N = e^{-j2\pi/N}, N = 2^n \quad (12)$$

Si el valor de N, es entero positivo se puede expresar que:

$$N = 2M \quad (13)$$

Si el valor de M, es entero positivo, se sustituye la ecuación 13 en la ecuación 11:

$$X(k) = \frac{1}{2M} \sum_{k=0}^{(2M-1)} x(n) W_{2M}^{kx} \quad (14)$$

$$X(k) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{(M-1)} x(2n) W_N^{kx} + \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{(M-1)} x(2n+1) W_M^{kx} W_{2M}^k \right\} \quad (15)$$

Por definición de funciones se tiene que :

$$X_{par}(k) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{(M-1)} x(2n) W_N^{kx} \quad (16)$$

$$X_{impar}(k) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{(M-1)} x(2n+1) W_M^{kx} \quad (17)$$

Para  $k=0,1,\dots, M-1$ , La ecuación 15 queda de la siguiente forma:

$$X(k) = \frac{1}{2} \left\{ X_{par}(k) + X_{impar}(k) W_{2M}^k \right\} \quad (18)$$

Se puede notar que una transformada de N-puntos puede ser calculada dividiendo la expresión original en dos partes, como se indica en la ecuación 18 . El cálculo de la primera mitad de X(k) requiere de la evaluación de las dos transformadas de N/2 puntos según las ecuaciones 16 y 17. Los valores resultante se sustituyen en la ecuación 18 para obtener X(k) para  $k = 0, 1, 2, \dots, (N/2-1)$ .

Considerando un número de muestras igual a  $2^n$ , con n entero positivo, se puede demostrar que el número de operaciones complejas (multiplicaciones y sumas) está dado por:

$$m(n) = 2m(n-1) + 2^{n-1}, para \dots n \geq 1 \quad (19)$$

$$a(n) = 2a(n - 1) + 2^n \text{ para } \dots n \geq 1 \quad (20)$$

Las ecuaciones 19 y 20 representan el número de multiplicaciones y de sumas respectivamente. El número de operaciones, sumas y multiplicaciones complejas, que se requiere para implementar un algoritmo para FFT, en este caso el algoritmo de doblamiento sucesivo está dado por:

$$m(n) = \frac{1}{2} 2^n \log_2 2^n = \frac{1}{2} N \log_2 N = \frac{1}{2} N n \dots \text{ para } n \geq 1 \quad (21)$$

$$a(n) = 2^n \log_2 2^n = N \log_2 N = N n \dots \text{ para } n \geq 1 \quad (22)$$

La FFT descompone la DFT de N puntos en transformadas más pequeñas. Una DFT de N puntos es descompuesta en dos DFT's de (N/2) puntos. Cada DFT de (N/2) puntos se descompone a su vez en dos DFT's de (N/4) puntos y así sucesivamente. Al final de la descomposición se obtienen (N/2) DFT's de 2 puntos cada una. La transformada más pequeña viene determinada por la base de la FFT. Para una FFT de base 2, N debe ser una potencia de 2 y la transformada más pequeña es la DFT de 2 puntos. Por ejemplo, la ecuación 16 usa los argumentos de tipo par: {f (0), f (2), f (4), f (6)}. La ecuación 17 los de tipo impar: {f (1), f (3), f (5), f (7)}. Cada transformada de 4 puntos se calcula como 2 transformadas de 2 puntos. Así, para el primer conjunto la subdivisión genera {f (0), f (4)} como parte par y {f (2), f (6)} como parte impar. Igualmente {f (1), f (5)} para la parte par y {f (3), f (7)} para parte impar. De acuerdo a lo anterior, el ordenamiento requerido para aplicar directamente el algoritmo es: {f (0), f (4), f (2), f (6), f (1), f (5), f (3), f (7)}. La figura muestra el proceso que usa el algoritmo para implementar la FFT a través de la DFT. [20]

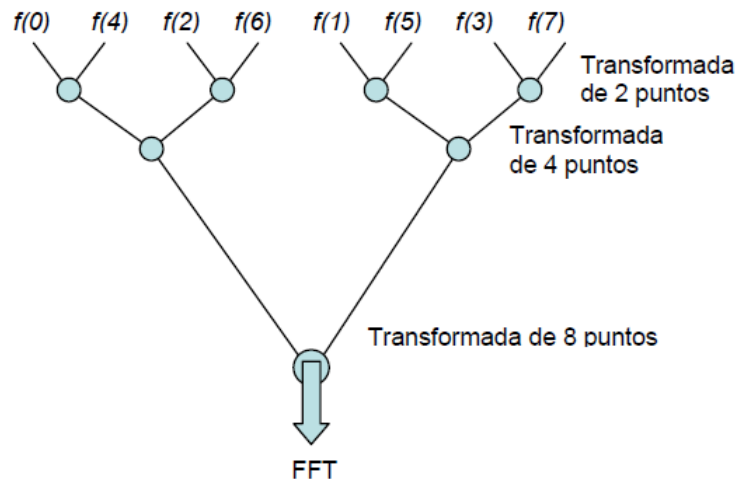


Figura 20: Algoritmo de FFT de 8 puntos.  
Fuente: Señales y Sistemas, Análisis mediante métodos de transformada y matlab[19]

En la primera parte hay 4 transformadas de 2 puntos, las cuales se utilizan para la segunda parte formando dos transformadas de 4 puntos cuyos resultados llegan al último nivel del algoritmo donde se produce la DFT deseada.

### 2.2.9. Radio definido por software

#### Introducción.

SDR (Radio definido por software) consiste en un sistema de comunicaciones por radiofrecuencia, en el cual la parte de hardware como multiplexores, filtros digitales, amplificadores, moduladores de señal, codificadores etc. es implementada mediante programación en software, a través de dispositivos electrónicos, generalmente basados en sistemas embebidos. Según la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) radio definido por software es “Radio en el que algunas o todas de sus funciones a nivel físico, son definidos por software.” SDR es un conjunto de tecnologías como tecnología software, tecnología de hardware de procesamiento de señal, tecnología RF (Radiofrecuencia), etc. Al utilizar este tipo de tecnologías, se implementa un receptor Zero-IF o low-IF1 configurable de tal manera que puede utilizarse para diseñar distintos componentes que hacen aplicable el concepto de SDR a los sistemas completos tales como transmisores, receptores, transceptores, osciloscopios, analizadores de espectros o analizadores vectoriales de redes, siendo sus parámetros configurables dinámicamente.[21]

## Estructura.

Con el crecimiento de SDR, se logro facilitar el diseño de la etapa frontal de radiofrecuencia del radio para obtener una señal que pueda ser fácilmente tratada por un computador, para lograr esto se implementaron conversores de analógico a digital y viceversa en procesadores programables de alto desempeño como los FPGA con el objetivo de reducir el tamaño y costo de los circuitos, sin embargo el esquema básico de funcionamiento sigue siendo el mismo. En la figura 21 se presenta el diagrama de bloques de la funcionalidad de SDR, compuesta por tres partes:

- Sección de RF, implementada en Hardware
- Sección de IF, implementada en Hardware
- Sección banda base. Implementada en Software[22]

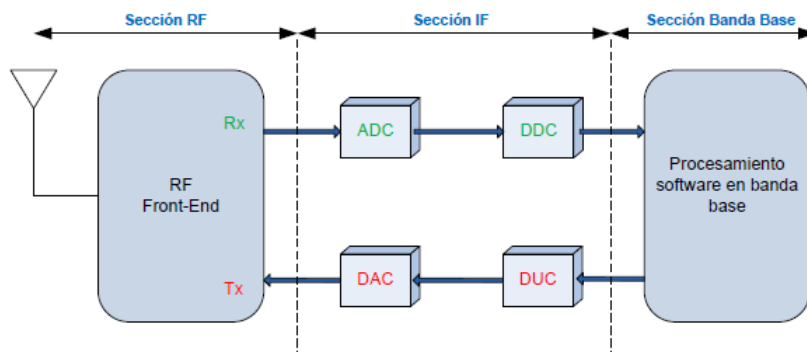


Figura 21: Diagrama de bloques de SDR

La sección de RF, también denominada RF Front-End es la encargada de transmitir/recibir las señales de radiofrecuencia para adecuarlas y convertirlas en frecuencia intermedia en recepción o amplificar y modular las señales de IF en el caso de transmisión. La frecuencia intermedia puede ser 0, dando lugar al concepto de Zero-IF; el cual es posible gracias a los avances en los componentes hardware. De igual manera, la sección de IF se encarga de pasar la señal de IF a banda base y digitalizarla en recepción o pasar la señal de banda base a IF y hacer la conversión digital-analógica de la señal en el caso de la transmisión. Las encargadas de la conversión analógica-digital o digital-analógica de la señal son los módulos ADC/DAC. A su vez, se insertan los módulos DDC/DUC para poder bajar/subir, respectivamente, la tasa de muestreo en el sentido de recepción/transmisión, consiguiendo que la tasa de muestras por la interfaz entre IF y banda base sea inferior. La sección de banda base es la encargada de todo el procesamiento en

banda base de la señal como modulación/demodulación, análisis espectral de la señal,.. llevándose a cabo en software. La ventaja de un SDR es que se puede recibir y transmitir nuevos protocolos de comunicaciones simplemente mediante la actualización de software sobre el hardware existente. [21]

### **Aplicación y utilidades.**

Actualmente no hay ningún estándar sobre SDR, pero sí existe un grupo de trabajo denominado Wireless Innovation Forum, que es un foro dedicado a conducir la innovación tecnológica en el campo de la SDR desarrollando estándares y especificaciones del mismo, logrando así la divulgación de dicha tecnología para soportar necesidades tanto militares y civiles como comerciales. Los miembros de este grupo constituyen una amplia base en el diseño de plataformas Software Defined Radio (SDR), Cognitive Radio (CR) y Dynamic Spectrum Acces (DSA). Cuenta con el apoyo de más de 100 empresas, instituciones y organizaciones como Altera, Xilinx, NASA, VirginiaTech, Toshiba, Samsung, Lockheed, Motorota, QUALCOMM, Hitachi u Ohio Aerospace Institute, entre otras. El Wireless Innovation Forum prepara una serie de eventos periódicos en los que se presentan productos, avances y estándares que proponen las empresas inscritas en él con respecto al tema mencionado.[21]

Los SDR son de gran utilidad y el conjunto de aplicaciones de esta tecnología es muy amplio, las cuales incluyen nuevos terminales para soportar cualquier tipo de tecnología, infraestructura de comunicaciones, como por ejemplo estaciones base de telefonía móvil, y soporte a tecnologías de acceso radio de banda ancha tanto en entornos privados como públicos, por ejemplo, servicios en el ámbito militar y servicios de telefonía celular pues en ambos se manejan varios protocolos en tiempo real, que cambian la necesidad casi constantemente. La tecnología SDR habilita la creación de dispositivos inalámbricos interoperables con muy diversas ventajas, entre las que se puede destacar:[21]

- Múltiples modos de operación
- Reconfiguración
- Actualizaciones Over-The-Air
- Menor coste de desarrollo.

Actualmente, existen numerosos proyectos de SDR, entre ellos cabe destacar el ambicioso proyecto OpenBTS con el que se implementa una estación base de telefonía GSM en software a partir de la arquitectura GNU Radio y el USRP apoyándose en Asterisk4 para servicio VoIP.[21]

### 2.2.10. Periférico universal de radio software.

Un periférico universal de radio software USRP es un sistema de radio flexible y rentable que transforma una PC estándar en una plataforma de generación de prototipos para comunicación inalámbrica combinado con la tecnología radio definido por software, mediante plataformas de desarrollo como Labview, GNU Radio, Matlab, etc La principal ventaja de un USRP, es que mediante una conexión al ordenador por cualquier vía, lo convierte a este en un SDR. [?]

#### Características.

El USRP internamente cuenta con dos niveles de tarjetas sin importar el fabricante. El primero es la tarjeta principal, también denominada madre o motherboard, en donde se encuentra la FPGA, los convertidores ADC's y DAC's, la alimentación y la conexión vía USB. El segundo nivel se compone de tarjetas secundarias, hijas o daughterboards. Éstas existen para transmisión y/o recepción. Así, el USRP puede trabajar con varias tarjetas secundarias, que pueden funcionar como transmisores, receptores ó transceptores (transceiver, TRX), en este último caso pueden transmitir y recibir a la vez, y llevan la señal de banda base o IF hasta la banda de RF deseada o viceversa.[21]

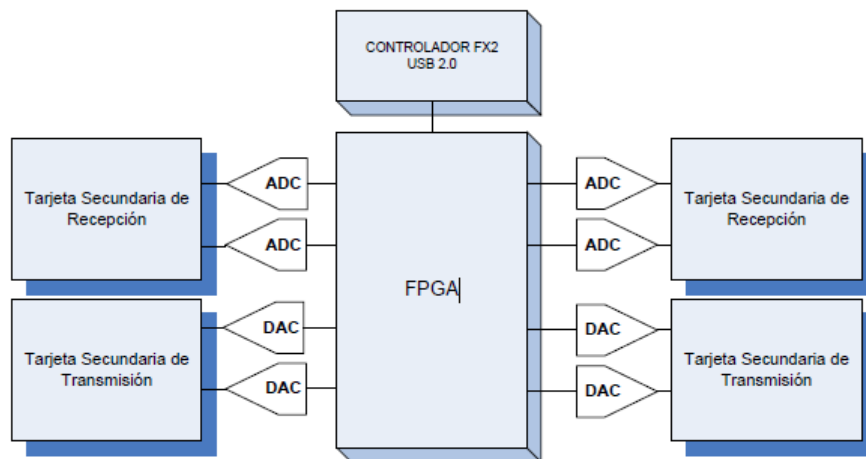


Figura 22: Diagrama de bloques de la estructura interna de un USRP  
Fuente: Laboratorio de SDR [21]

La Figura 22 muestra un diagrama de bloques del USRP, donde se puede ver la disposición de la FPGA, convertidores, tarjetas secundarias y la interface USB o Gigabit Ethernet. El hardware USRP posee un controlador de dispositivo UHD, proporcionado por Ettus Investigation para su uso con los diferentes tipos de hardware USRP desarrollados hasta hoy; compatible con Linux, MacOS y



plataformas Windows. UHD ofrece portabilidad y es amigable con las diferentes plataformas de desarrollo de software:

- GNU Radio. Es un conjunto de herramientas de código abierto, que se puede utilizar para desarrollar SDR. Este marco utiliza una combinación de C ++ y Python para optimizar el rendimiento DSP mientras que proporciona un entorno de programación de aplicaciones de fácil uso. GNU Radio es un entorno de programación gráfica.
- National Instruments. En base a su producto, el NI USRP 292X, es funcionalmente equivalente a la Ettus Investigación USRP N210. NI LabVIEW también ofrece soporte para este dispositivo con el controlador NI-USRP.
- USRP N210 y USRP2. Dispositivos compatibles con MATLAB y Simulink, herramientas de software que incluyen plug-ins y varios ejemplos de uso con los dispositivos. Muchos usuarios desarrollan con sus propios marcos personalizados.[21]

### **Aplicaciones.**

La lista de aplicaciones reales de USRP, es extensa, siempre partiendo del principio de radiofrecuencia, es decir, desarrollar sistemas de comunicaciones inalámbricas en los cuales se pueda insertar los principios de funcionamiento de este software. Algunas de las aplicaciones del hardware USRP se detallan a continuación:

- Sistema de radares.
- Red de telefonía móvil GSM.
- Transmisor y Receptor de radio FM.
- Radiodifusión de audio digital.
- Redes de alta velocidad.
- Estándar de televisión digital.
- Analizador de espectros.
- Aplicaciones con GPS.[21]

### **2.3. Propuesta de solución.**

Con el desarrollo del presente proyecto se pretende implementar un sistema de comunicación inalámbrica que permita el análisis de sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM utilizando radio definido por software, con el fin de analizar y mejorar el uso del ancho de banda, y de igual forma, crear aplicaciones prácticas que permitan desarrollar los conocimientos teóricos acerca del procesamiento digital de señales y de los sistemas de comunicaciones inalámbricas, a través del USRP 2920.

## **CAPÍTULO 3**

### **Metodología**

#### **3.1. Modalidad Básica de la investigación**

El presente proyecto es de investigación aplicada por que se desarrolló una aplicación real para el uso del USRP 2920, la cual se ha desarrollado en su mayoría por:

Modalidad de investigación bibliográfica: ya que la investigación teórica del proyecto se fomentó consultando: libros, artículos técnicos, publicaciones, revistas, antecedentes de proyectos similares y publicaciones en internet referentes a los sistemas de comunicación inalámbricas, a través de radio definido por software.

Modalidad de investigación de campo: ya que se acudió a las oficinas de la Unidad Operativa de Investigación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, para poder analizar el funcionamiento de los equipos NI- USRP, acorde a la implementación del proyecto de investigación.

#### **3.2. Recolección de información**

Para el desarrollo del proyecto se realizó recopilación de información dentro de la Unidad Operativa de Investigación, con el fin de investigar la configuración de los equipos NI – USRP y lograr realizar las aplicaciones que se requiere en el proyecto de investigación. Se hará uso de manuales, guías prácticas, proporcionadas por National Instruments a la Unidad Operativa de Investigación.

La recolección de la información de SDR y de la modulación OFDM se realizó revisando fuentes bibliográficas y fuentes de internet con el fin de conseguir documentación necesaria para el desarrollo de la investigación y del proyecto.

#### **3.3. Procesamiento y análisis de datos**

La información recolectada se someterá a un análisis a través de software especializado, proporcionado por National Instruments, que contiene base de datos,

gráficos comparativos y análisis estadístico, con el fin de elegir la mejor alternativa en cuanto al diseño de software de cada una de las etapas y la configuración de los equipos para implementar el proyecto.

### **3.4. Desarrollo del Proyecto**

- Investigar acerca de las principales características teóricas y técnicas del funcionamiento de la modulación OFDM.
- Recolección de información sobre sistemas de comunicación inalámbrica usando modulación OFDM.
- Análisis de requerimientos técnicos para la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica con modulación OFDM.
- Recolección de información acerca de la tecnología radio definido por software SDR.
- Compilación de las características técnicas del hardware NI – USRP 2920.
- Búsqueda de parámetros y condiciones de configuración del hardware NI – USRP y de SDR con la modulación OFDM.
- Recolección de información del uso del software LabView para la implementación de sistemas de comunicación inalámbrica a través de SDR.
- Diseño del sistema de análisis de sincronización de trama de OFDM por medio de radio definido por software a través de LabView.
- Configuración de hardware NI- USRP 2920 y software para acoplar el sistema
- Comprobación del funcionamiento del sistema mediante pruebas
- Análisis de resultados y corrección de errores.

## CAPÍTULO 4

### Desarrollo de la propuesta

#### 4.1. Antecedentes

El desarrollo del proyecto acerca del análisis de la sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM utilizando radio definido por software tiene como objetivo principal realizar el análisis de la sincronización de la trama de datos en sistemas de comunicación inalámbrica implementados en base a la técnica de modulación OFDM para lo cual se ha acudido al uso del equipo USRP 2920 de National Instruments, base principal para la realización del proyecto de investigación gracias a que ofrece grandes ventajas al momento de realizar prototipos de sistemas de comunicaciones inalámbricas, ya que ayuda a la adquisición de ondas de radio frecuencia y se adapta con facilidad a cualquier tipo de sistema a través de la plataforma de software Labview. La factibilidad del proyecto se basa entonces, en las bondades que brinda el equipo USRP 2920 para realizar investigación referente al desarrollo de tecnologías alternativas para la implementación de sistemas de comunicación inalámbricas, entre otras bondades, dejando un precedente en la Unidad Operativa de Investigación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para la realización de futuras investigaciones, de manera que se aproveche la adquisición de los equipos. En lo que se refiere a los sistemas de comunicación inalámbrica a través de la modulación OFDM, el desarrollo de la modulación mediante la tecnología SDR, ha permitido comprender el proceso de modulación, reemplazando la parte típica de hardware por software, logrando modificar parámetros que permitan detectar problemas en la transmisión de información y corregirlos para mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbrica basados en OFDM.

## 4.2. NI USRP 2920

Para el desarrollo del proyecto se requiere el uso del hardware NI USRP 2920. Desarrollado por National Instruments, el hardware NI USRP-292x trabaja en base a radiofrecuencia y comunicaciones. National Instruments aprovecha el poder del software NI LabVIEW para ofrecer una plataforma capaz de generar prototipos de sistemas de comunicaciones inalámbricas. Un sistema completo de comunicación inalámbrica es posible generar usando el lenguaje de programación gráfica de NI LabVIEW combinando algoritmos de procesamiento de señales que operan en radiofrecuencia.[23]



Figura 23: NI USRP 2920  
Fuente: National Instruments [24]

En la figura 23 se representa el equipo de national instruments NI USRP 2920. Las medidas físicas del equipo son 4,826cm de alto, 15,875cm de ancho, 21,209cm de profundidad y un peso de 1,193kg.El NI USRP-2920 trabaja bajo condiciones ambientales como altitud máxima de 2000m (a 25°C temperatura ambiente), rango de temperatura ambiente de 0 a 45°C (probado de acuerdo con IEC 60068- 2-1 y IEC 60068-2-2), temperatura de Operación, 23°C  $\pm$  5°C, rango de humedad relativa: 10 % a 90 % sin condensación (probada de acuerdo con IEC 60068-2-56). Algunas de las características principales de los NI-USRP son:[24]

- Transceptor de RF que se pueden afinar con opciones de frecuencia desde 50 MHz a 6 GHz
- Hasta 20 MHz de ancho de banda en tiempo real con soporte MIMO pulg-and-play.
- Opción para un receptor GPS integrado para mayor sincronización y precisión de frecuencia Manuales prácticos de laboratorio listos para usar para cursos de RF y comunicaciones.
- Conexión en serie o paralelo entre dos o más equipos, a través del cable MIMO, para diferentes aplicaciones

- 1 Conexión Gigabit Ethernet a servidor[24]

La estructura interna del NI USRP-2920 se muestra en la figura 24:

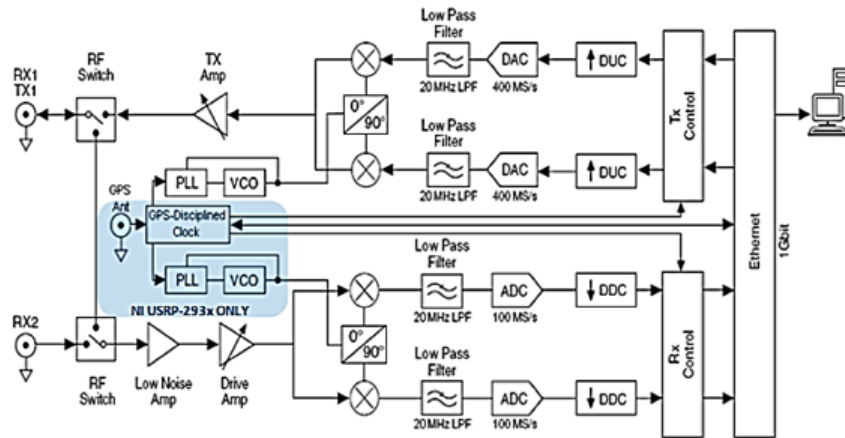


Figura 24: Estructura interna del NI USRP 2920

Fuente: NI USRP Guide [25]

Para entender el funcionamiento de la estructura interna del NI USRP 2920, se lo ha dividido en 5 etapas, sin antes recordar que el equipo puede trabajar en el modo de Tx de información, o de Rx, o también en el modo de Tx/Rx al mismo tiempo. En la parte superior del diagrama de bloques se encuentra la etapa de transmisión de información, la cual contiene DACs, filtros pasa bajos que funcionan a una frecuencia de corte de 20MHz. La señal analógica resultante se filtra y se modula a la frecuencia RF. Una ganancia ajustable (0-30dB) amplifica la señal para la transmisión a través del puerto externo TX/RX. En la parte inferior esta la etapa de recepción, que contiene de igual forma los mismos elementos electrónicos, configurados de diferente forma, de manera que se origina la recepción de información en el equipo. En la derecha del diagrama se encuentra la interfaz de conexión Gigabit Ethernet, que permite tener una amplia tasa de transmisión de información, con la cual se conecta con la computadora para poder realizar las configuraciones de software necesarias y desarrollar aplicaciones a través de SDR muestreada a 25 MS/s en el modo de 16 bits, y de 50 MS/s en el modo de 8 bits.[25]

El NI USRP consta de un panel frontal el cual se indica en la figura 25.

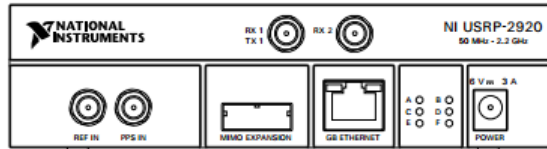


Figura 25: Panel frontal NI USRP 2920  
Fuente: USRP National Instruments [24]

En el panel frontal se tiene los siguientes componentes que sirven para realizar diversas configuraciones acorde a la aplicación o proyecto que se desee realizar.

- RX1, TX1, RX2. En este terminal se conecta las antenas diseñadas para el dispositivo, las cuales pueden trabajar en diferentes frecuencias y ser adaptadas a cualquier aplicación que se desee realizar. Para el correcto funcionamiento es necesario configurar la antena en la interfaz del usuario a través del software LabView. Esta interfaz se utiliza en la transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia, posee un conector SMA hembra tipo rosca para cable coaxial con una impedancia de 50 ohm, puede operar como un canal individual de entrada o salida.[23]
- REF IN. Este es un puerto exclusivo para la recepción de señales de RF, posee un conector SMA hembra tipo rosca para cable coaxial con una impedancia de 50 ohm.
- MIMO EXPANSION. Es un puerto asignado para la conexión de 2 o mas dispositivos USRP, este puerto actúa como un switch utilizando un cable MIMO compatible para este tipo de conectividad.
- GB ETHERNET. Este puerto se lo utiliza para la conexión entre el computador y el USRP, acepta conectores RJ-45 y cables UTP compatibles con Gigabit Ethernet hasta categoría 6.
- POWER. La entrada de alimentación de poder para el NI USRP-2920 es tipo DC de 6V y 3A, con un potencia de operación típica de maximo 18W.
- LEDS INDICADORES. Al observar el panel frontal de el NI USRP-2920 25 encontraremos 6 leds indicadores, los cuales detallan el estado de funcionamiento en el que se encuentra el USRP.[25]

La figura 26 representa los leds indicadores del USRP 2920, los cuales se activan acorde a la función que el equipo realice al momento de utilizarlo.



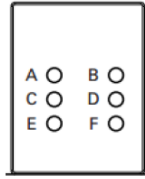


Figura 26: Leds indicadores  
Fuente: USRP 2920 [24]

Algunas de estas funciones son:

- LED A: Indica el estado de transmisión del modulo
  - . Apagado: El modulo no esta transmitiendo datos.
  - Encendido: El modulo esta transmitiendo datos.
- LED B: Indica el estado de conexión del cable físico MIMO.
  - Apagado: Los módulos no están conectados usando un cable MIMO.
  - Encendido: Los módulos están conectados usando un cable MIMO.
- LED C: Indica el estado de recepción del modulo.
  - Apagado: El modulo no esta recibiendo datos.
  - Encendido: El modulo esta recibiendo datos.
- LED D: Indica el estado de firmware del modulo.
  - Apagado: El firmware no esta cargado.
  - Encendido: El firmware esta cargado.
- LED E: Indica el estado del oscilador local del modulo.
  - Apagado: No existe una señal de referencia, o el oscilador local no esta acoplado a una señal de referencia.
  - Encendido: El oscilador local esta acoplado a una señal de referencia.
  - Parpadeando: El oscilador local no esta acoplado a una señal de referencia.
- LED F: Indica el estado de operación del modulo.
  - Apagado: El modulo se encuentra apagado.
  - Encendido: El modulo se encuentra encendido.[25]

### 4.3. Configuración de red USRP 2920

Para poder trabajar de manera adecuada con el hardware NI USRP se necesita realizar algunas configuraciones de red en el computador, haciendo énfasis en la posibilidad que nos da el dispositivo de crear una red local a través de una interfaz Gigabit Ethernet, ya que el dispositivo trabaja con una alta tasa de transmisión de información. La conexión del USRP al PC se realiza mediante el protocolo TCP-IP versión 4. Al momento de configurar la tarjeta de red Gigabit Ethernet en el computador, se le debe asignar una dirección IP que pertenezca a la misma red para no tener problemas de conexión entre el equipo y el computador. Cabe destacar que por defecto, la dirección IP con la que trabaja el USRP es 192.168.10.2, la cual puede ser modificada a conveniencia del usuario. [24]

Para poder configurar la red formada entre el ordenador y el equipo es necesario ingresar a la configuración de red del ordenador. En la figura 27 se puede apreciar la ventana de configuración de red del ordenador.

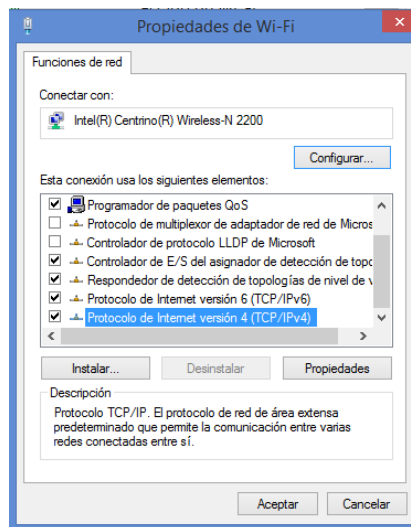


Figura 27: Configuración de red del ordenador  
Fuente: Investigador a través de Windows 8

Luego, se configura los diferentes parámetros del protocolo TCP-IP del computador, como dirección ip, máscara de red, etc. En la figura 28 se indica la ventana de configuración de los parámetros:

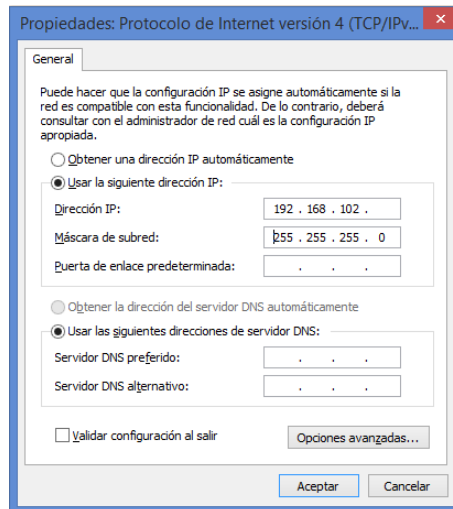


Figura 28: Configuración del protocolo TCP-IPv4  
Fuente: Investigador a través de Windows 8

Como se observa en la figura 28 los parámetros que se deben configurar dentro de las propiedades de IPv4 son la dirección IP y la máscara de sub red, que por defecto vienen dadas por 192.168.10.2 y 255.255.255.0 respectivamente.

#### 4.3.1. NI USRP Configuration utility

El NI Configuration Utility, es una herramienta de software desarrollada por National Instruments, que sirve como una herramienta para configurar los parámetros iniciales del NI USRP 2920, al momento de conectarlo al ordenador, entre ellos, la comprobación de una correcta conexión entre el equipo y el computador, la dirección IP que viene con la dirección 192.168.10.2 por defecto, a más de configurar y actualizar el firmware y la fpga, que trabajan con el equipo. En la figura 29 se puede apreciar la interfaz de la herramienta NI Configuration Utility.

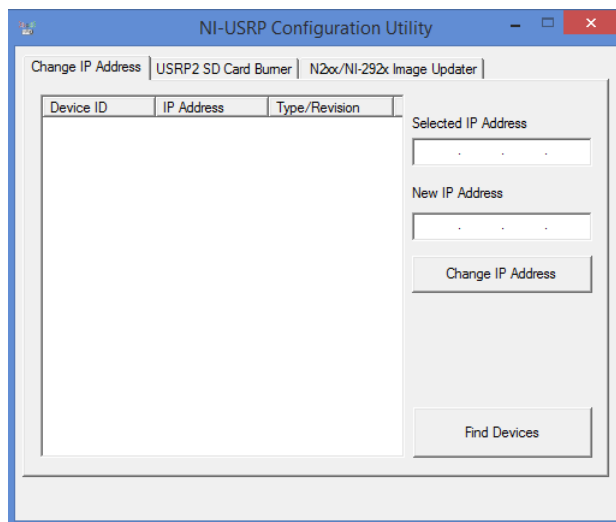


Figura 29: Ventana principal de Configuration Utility  
Fuente: Investigador a través de NI Configuration Utility

El dispositivo aparecerá en la lista de equipos existentes si la conexión es correcta, como lo muestra la figura 30. Para cambiar la dirección IP, se selecciona el equipo encontrado y se asigna la IP deseada en el campo *Select IP Address*

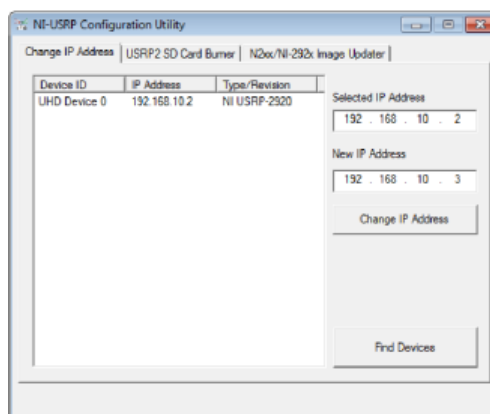


Figura 30: Asignar IP ADDRESS al dispositivo  
Fuente: NI USRP Configuration Utility

La actualización de los parámetros *Firmware Image* y *FPGA Image*, sirve para tener actualizado el hardware USRP 2920, con las últimas versiones de firmware y FPGA, proporcionadas por National Instruments, manteniendo en un nivel alto el rendimiento del equipo y permitiendo trabajar con otro tipo de desarrolladores de radio definido por software como GNU radio.

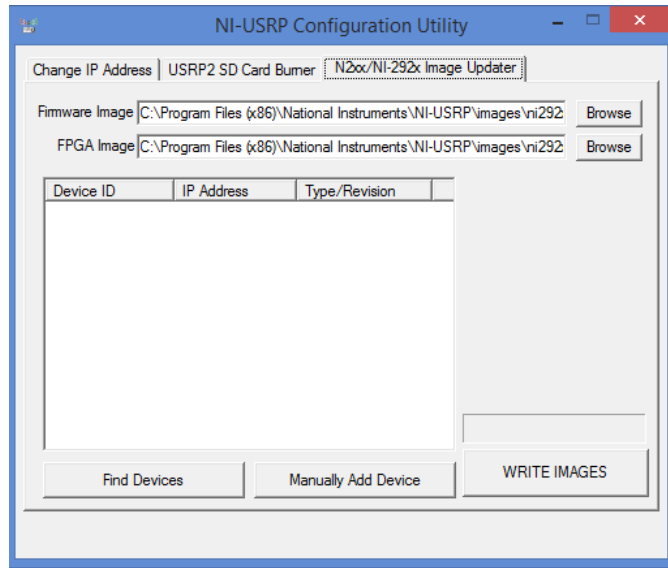


Figura 31: Configuración de FPGA Y Firmware de URSP 2920  
 Fuente: Investigador a través de NI Configuration Utility

En la figura 31 se puede apreciar la configuración del firmware y FPGA. Se da clic en la pestaña *N2xx/NI-292x Image Updater* y se da clic en la pestaña *Browse*, de los campos requeridos, se selecciona la imagen deseada para actualizar los campos y de esta forma se actualiza el firmware y el FPGA.

#### 4.4. Introducción a LabView.

LabView es un software de lenguaje de programación desarrollado por National Instruments. El bloque básico de LabVIEW es el instrumento virtual (VI). Conceptualmente, un VI comprende el entorno y características del programa o aplicación que se desee realizar, para ello, cada VI consiste en un diagrama de bloques y un panel frontal, como se indica en la figura 32.

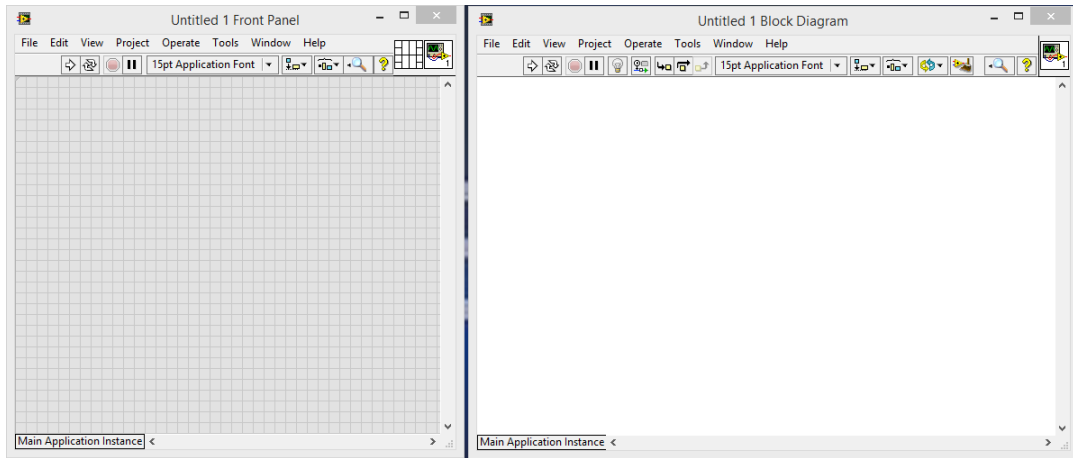


Figura 32: Diagrama de bloques y panel frontal de un VI en Labview  
Fuente: Investigador a través de Labview

El diagrama de bloques describe la funcionalidad del VI, mientras el panel frontal es una interfaz gráfica de nivel superior para el VI que permite tener una interacción con el usuario agradable para un mejor desarrollo. Otra característica importante del entorno de utilizar LabView es la reutilización de código y modularidad. La naturaleza gráfica de LabVIEW permite a los desarrolladores visualizar fácilmente el flujo de datos en sus diseños. LabVIEW es una programación de flujo de datos, tiene una gran cantidad de documentación, kits de herramientas y ejemplos existentes que se pueden aprovechar en el desarrollo.

#### 4.4.1. Procesamiento digital de señales en LabView.

LabVIEW proporciona una interfaz sencilla para configurar y operar diversas salidas y entradas. Para el desarrollo de sistemas de comunicaciones digitales en LabView, principalmente en el procesamiento digital de señales se requiere utilizar algoritmos de programación basados en álgebra lineal. LabVIEW proporciona una variedad de funciones que permiten manipular vectores y matrices, los cuales son la base del álgebra lineal. Por ejemplo para representar una matriz inversa se hará uso de la función (Inverse Matrix.vi), la multiplicación de matrices ( $A \times B$ .vi) y arrays de caracteres (Reshape Array.vi). LabVIEW también tiene muchas funciones de procesamiento de señal incorporadas tal es el caso de la transformada rápida de Fourier (FFT.vi), FFT inversa (Inverse FFT.vi), y convolución (Convolution.vi). [26]

Estas y otras funciones están incluidas en el Modulation Toolkit que es un conjunto de herramientas de algoritmos de comunicación digitales comunes. Estas herramientas incluyen VIs que serán útiles para el desarrollo de diseños de

sistemas de comunicaciones digitales. El Modulation Toolkit contiene también menús llamados paletas de herramientas de las cuales se despliegan opciones que permiten desarrollar aplicaciones, algunas de ellas son: Paleta de Procesamiento de Señales, Paleta Digital, Paleta de Estructuras, Paleta Complex y la paleta de matriz.

#### 4.4.2. Parámetros de configuración de USRP 2920.

Para la adquisición de señales de radiofrecuencia se comenzará a utilizar el software LabVIEW, a través del NI USRP- 2920, para lo cual se utilizara diferentes VI's los que se analizaran a continuación.

#### Transmisión de datos a través de USRP 2920

Para la configuración inicial se hace uso de los VIs (Instrumentos virtuales) que se encuentran instalados en Labview. El NI-USRP empieza a funcionar al insertar un VI, conocido como Open Session Tx/Rx según sea el caso. El VI para el inicio de sesión en el caso de un Tx, es el que se indica en la figura 33:

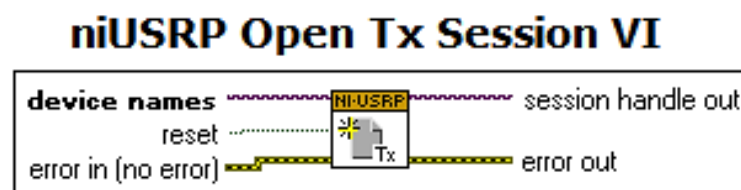


Figura 33: Inicio de sesión USRP 2920  
Fuente: Investigador a través de Labview

Se representa el Vi para el reconocimiento inicial del NI USRP 2920, y la posterior adquisición de información. Los terminales que se usan con mayor frecuencia son:

- Device Names: En este terminal se especifica la dirección IP del USRP mediante un control para nombre lógico.
- Session Handle Out: Se lo utiliza para enlazar los demás VI's de Recepción que pertenecen a un bloque de programa.
- Error Out: Se lo enlaza a los demás VI's para especificar si algún punto existe un error.

#### Configuración de señal.

El VI de configuración de señal permite establecer los parámetros de la señal que se va a recibir, tales como frecuencia, ganancia, modo de Tx/Rx, etc.

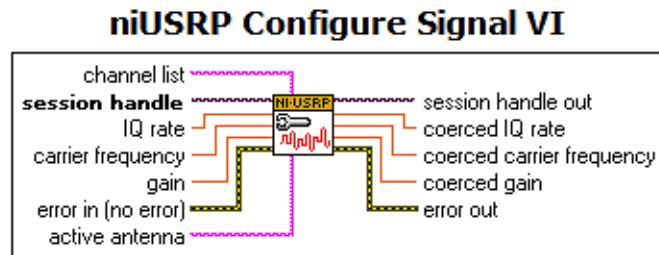


Figura 34: Vi de configuración de señal  
Fuente: Investigador a través de Labview

En la figura 34 podemos observar la estructura del VI de configuración de señal de recepción, todos los terminales que se encuentran en la izquierda del diagrama, incluido el de Antena activa, son de lectura, es decir se debe especificar el valor al cual el VI debe trabajar, a diferencia de los terminales que se encuentran a la derecha que son de escritura, es decir el programa calculará internamente los valores de dichos terminales en base al USRP y a los valores ingresados al VI.

- Session Handle: Especifica la sesión USRP abierta.
- IQ Rate: Especifica la velocidad en fase y cuadratura con la que los bits ingresara desde el dispositivo USRP hacia el computador.
- Carrier Frequency: Especifica la frecuencia central a la que el USRP debe filtrar y recibir la señal.
- Gain: Especifica la ganancia en dB agregada a la señal RF, cabe destacar que el dispositivo USRP no está calibrado y los valores de ganancia no representan una ganancia absoluta y tampoco tienen un comportamiento lineal.
- Active Antenna: Indica al USRP cual antena debe utilizar.

### Adquisición de datos.

Para la adquisición de datos es necesario realizar ciertas configuraciones en los Vis de la librería exclusiva para el uso del USRP. Sin embargo el proceso se hará de acuerdo al diagrama de bloques de la figura 35:



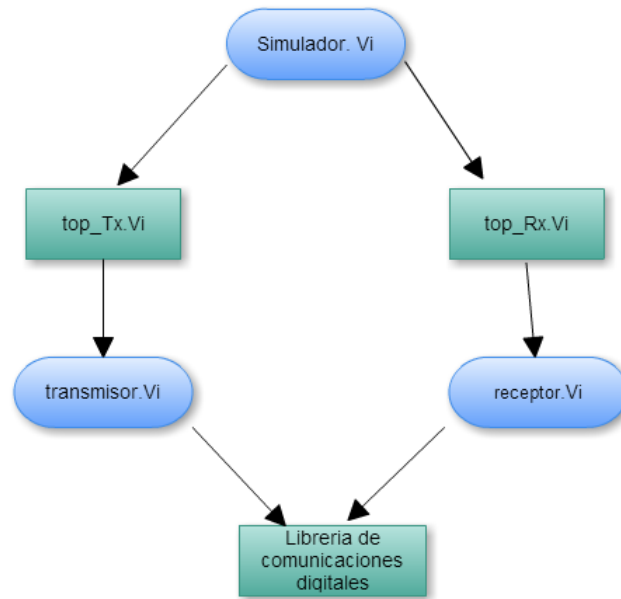


Figura 35: Diagrama de flujo para la adquisición y recepción de datos  
 Fuente: Digital Wireless Communication[1]

Después de realizar las respectivas conexiones y configuraciones, en la figura se representa el diagrama de bloques de un transmisor básico a través del dispositivo USRP 2920.

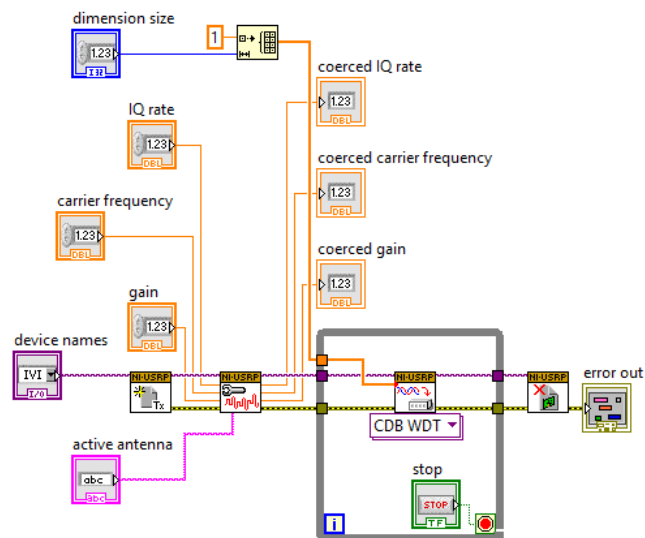


Figura 36: Diagrama de bloques de un Tx de información a través de USRP 2920  
 Fuente: Fuente: Investigador a través de Labview

El panel frontal de la simulación del transmisor básico a través del USRP 2920, se representa en la figura 37

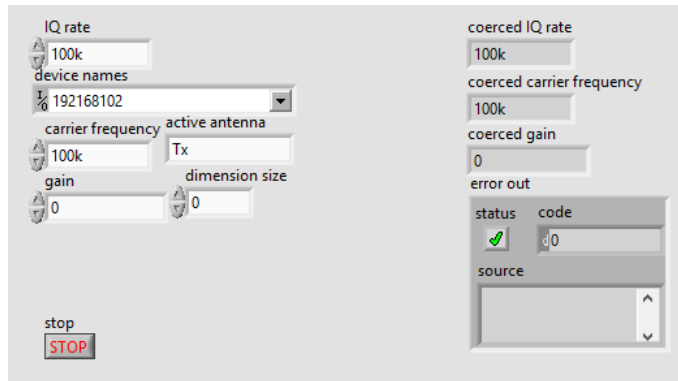


Figura 37: Panel frontal en Labview de un Tx a través del USRP 2920  
Fuente: Investigador a través de Labview

Se puede observar que se tiene los parámetros básicos de configuración del USRP y de transmisión, como la dirección IP del equipo, la tasa de muestras IQ, que es la que se encarga de determinar la tasa de transmisión a la que debe trabajar el equipo. La frecuencia de operación o carrier frequency, que se encarga de determinar la frecuencia a la cual el equipo emitirá las ondas de radio frecuencia en el espectro radioeléctrico. La configuración de la antena que sirve para determinar si el equipo trabaja como Tx o Rx de información y la ganancia de transmisión.

### Recepción de datos a través de USRP 2920.

Para finalizar el desarrollo del sistema, se requiere de 2 VIs proporcionados por Lbview, el primero llamado Abort VI que se encarga de detener a adquisición de datos del USRP Y el segundo, llamado close session VI, el cual finaliza la sesión del USRP.

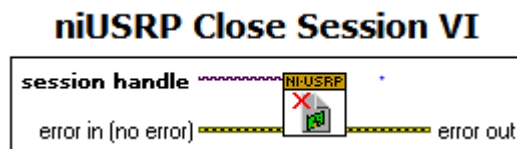


Figura 38: VI de cierre de sesión de USRP  
Fuente: Investigador a través de Labview

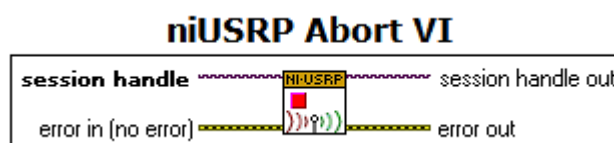


Figura 39: Abort VI del USRP  
Fuente: Investigador a través de Labview

Finalmente se presenta el diagrama de bloques de un receptor a través del dispositivo USRP 2920.

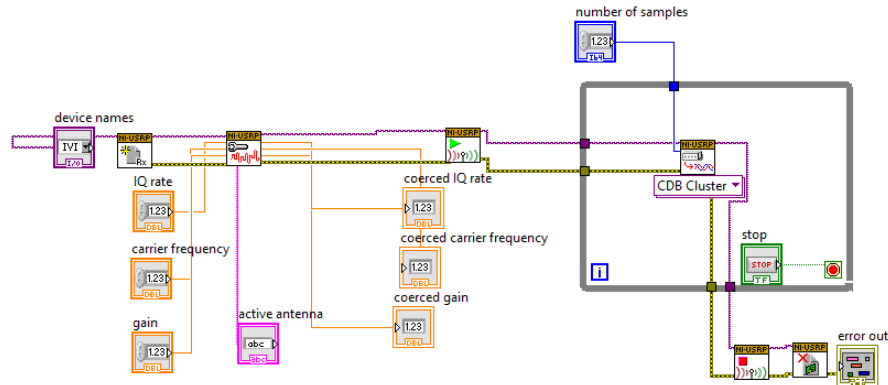


Figura 40: Diagrama de bloques, receptor de información a través de USRP 2920  
Fuente: Investigador a través de labview

De igual forma que en el transmisor, los parámetros de configuración del equipo, deben ser iguales que el Tx, para que no exista problemas al momento de transmitir información.

#### 4.5. Simulación del Sistema OFDM.

Para la simulación del sistema de comunicación inalámbrica, basado en OFDM, es necesario diseñar un transmisor y un receptor. El transmisor funcionará en base a un modulador OFDM y el receptor mediante un demodulador OFDM, los cuales están constituidos por diferentes etapas; cada una de estas se irá detallando permitiendo así obtener una correcta implementación y su entendimiento. Además está contemplado realizar en la parte de recepción la ecualización en el dominio de la frecuencia para corregir los efectos que el canal inalámbrico de transmisión produce. OFDM es un tipo de modulación digital donde la información se modula en ondas sinusoides en tiempo discreto. Con OFDM, los símbolos se consideran en el dominio de la frecuencia. Se asume que  $K = 0$  y que hay  $N$  símbolos de dominio de frecuencia en un símbolo OFDM. [1]

Para la adquisición y recepción de datos es necesario realizar configuraciones en los Vis de la librería exclusiva para el uso del NI-USRP. El proceso se hará de acuerdo al diagrama de bloques de la figura 41:

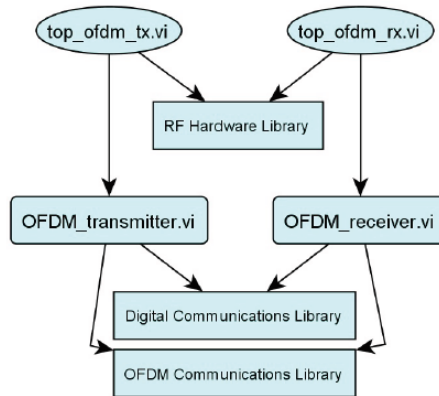


Figura 41: Diagrama de flujo para la adquisición y recepción de datos OFDM  
Fuente: Digital Wireless Communication[1]

A partir de la librería OFDMcomm1.0.llb proporcionada en Labview para el desarrollo de sistemas de comunicaciones con USRP, se implementa un transmisor y un receptor con los sub VIs: modulate.vi, demodulate.vi, transmitter.vi OFDM y receiver.vi OFDM, los cuales se encuentran dentro de los VIs top\_tx.vi y top\_rx.vi, respectivamente y contienen las configuraciones de los parámetros de la modulación OFDM. [1]

#### 4.5.1. Transmisor OFDM

El transmisor OFDM básicamente trabaja transformando un grupo de bits en un grupo de números complejos correspondientes a valores dentro de las constelaciones disponibles para realizar la modulación I/Q. En la figura 42 se muestra un diagrama de bloques de un transmisor OFDM.

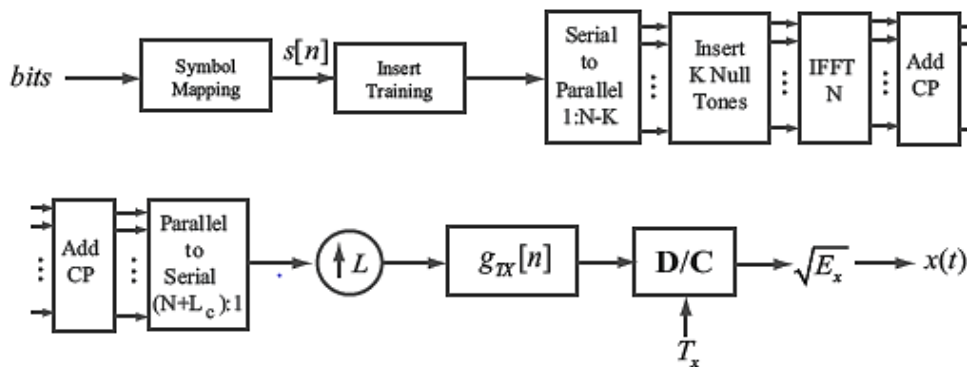


Figura 42: Diagrama de bloques de un Tx OFDM  
Fuente: Digital Wireless Communication [1]

En el transmisor OFDM ingresan los bits, los cuales necesitan ser mapeados para

poder ser convertidos de serial a paralelo. Luego el Tx envía grupos de  $N - K$  símbolos, donde  $N$  es el número de subportadoras y  $K$  el número de ceros. Los ceros se insertan en grupos de  $N - K$  símbolos transmitidos, que se transforman del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo a través de la FFT. Seguido de ello se antepone un CP (Prefijo cíclico) para combatir las interferencias generadas por la naturaleza de la modulación y que necesitan ser controladas para evitar problemas en la transmisión de la información. [1]

Se desarrolló diferentes subVIs tales como el mapeador de banda base y el modulador OFDM los cuales son de fundamental importancia en el proceso. El Tx envía grupos de  $N - K$  Símbolos, donde  $N$  representa el número de subportadoras y  $K$  representa el numero de ceros. Los ceros son insertados en grupos de  $N - K$  símbolos transmitidos, los cuales son tranformados del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo o viceversa, dependiendo del prefijo cíclico que se ha escogido en el transmisor. [1]

### Simulación en Labview.

Para realizar la simulación del transmisor en OFDM, se realizó los procesos de muestreo, modulación, inserción de null tones y prefijo cíclico, conversión serial a paralelo, IFFT, acorde a lo mostrado en el diagrama de bloques de un transmisor OFDM.

Para crear el muestreo se hizo uso del Vi de la figura 43

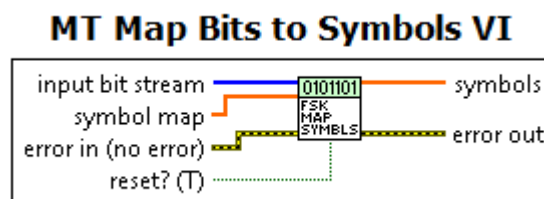


Figura 43: Vi de tipo de modulación y muestres (map)  
Fuente: Investigador a través de Labview.

El Vi MT Map to Symbols permite tomar muestras de bits, y los convierte a números complejos a través de los diferentes tipos de modulación digital, como ASK, FSK, PSK, QAM, PAM. El bloque modulador QAM consta de una entrada llamada input bit stream y una salida output symbols que son arreglos unidimensionales. Una vez elegido el tipo de modulación 4 QAM, del arreglo input bit stream se obtiene su tamaño a través de la función Array Size para conocer el número de iteración que realizará el lazo FOR dividiendo este valor para cuatro, lo que indica la cantidad de

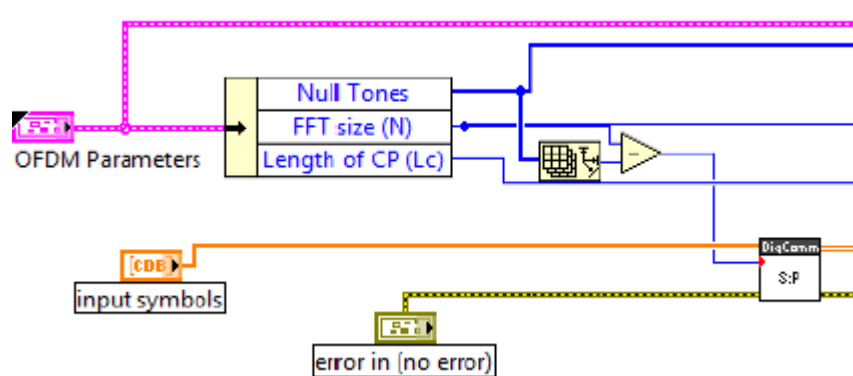


Figura 44: Parámetros para modulación OFDM  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

paquetes de bits que son mapeados. Los bits se convierten en símbolos, los cuales al ingresar al modulador se transforman de forma serial a paralela en base a cuantos datos va a tener cada fila, lo que se logra calculando la diferencia entre el número de portadoras y los Null Tones ( $N-K$ ). Al obtenerse varias filas de datos de tamaño ( $N-K$ ) se agrega la cantidad  $K$  de Null Tones en todas las filas existentes. Todos los datos tratados hasta este punto se encuentran en el dominio de la frecuencia, por lo que es necesario hacer el cambio de dominio al tiempo usando la transformada Inversa Rápida de Fourier (iFFT). Para evitar los efectos de la multi-trayectoria de la señal OFDM se agrega el prefijo cíclico. Finalmente se realiza el proceso inverso con los datos, es decir se transforma los datos de paralelo a serial obteniendo una trama unidimensional de datos.

A la secuencia de entrada se la transforma de serial a paralelo para ello se debe especificar qué tamaño debe tener cada fila, este valor es la diferencia entre FFT size y el tamaño del arreglo Null tones que se lo obtiene a través de la función array size.

En la figura 44 se detalla la extracción de los parámetros para realizar la modulación OFDM.

En resumen para realizar la implementación del transmisor OFDM se siguen los siguientes pasos:

1. Inicializar y configurar los parámetros de transmisión y de banda de transmisión del USRP.

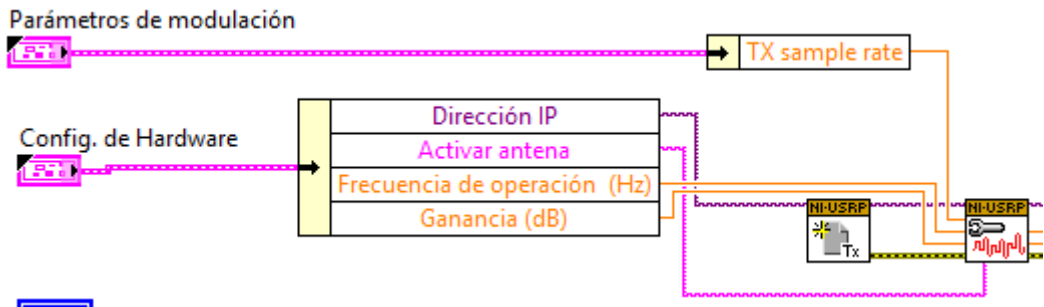


Figura 45: Parámetros de Tx del USRP  
Fuente: Investigador a través de Labview.

2. Generar una secuencia de bits aleatoria

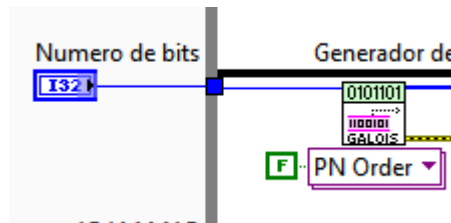


Figura 46: Generador aleaotorio de bits  
Fuente: Investigador a través de Labview.

3. Realizar el mapeo de símbolos, a traves de 4QAM, generando una muestra de alrededor de 625 símbolos.

4. Construir los simbolos OFDM, a través de la configuración de los parámetros de modulación OFDM.

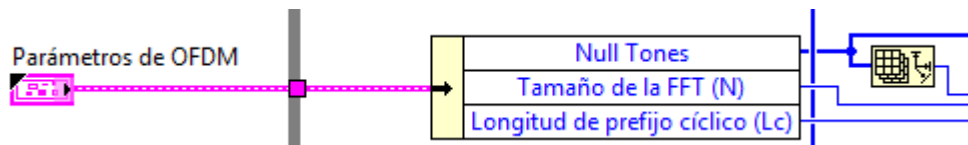


Figura 48: Construcción de los simbolos OFDM  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

5. Convertir la cadena de bits de forma serial a paralelo, en base a la longitud del prefijo cíclico, el tamaño de la muestra de la FFT y la longitud de los Null Tones.

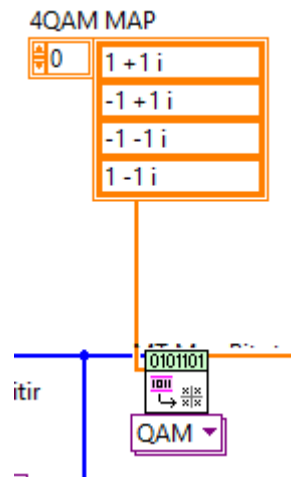


Figura 47: Mapeo de símbolos  
Fuente: Investigador a través de Labview.

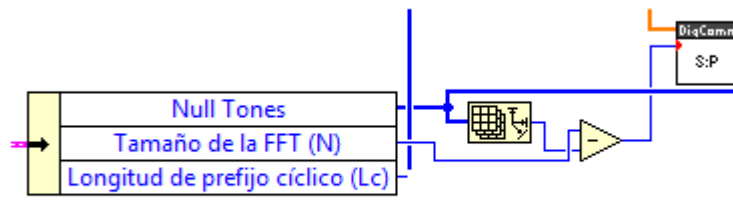


Figura 49: Simbolo adicional de 25 bits  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

6. Realizar la inserción de los Null Tones, proveniente de la salida de los datos en forma paralela y el parámetro de configuración de OFDM, Null Tones.

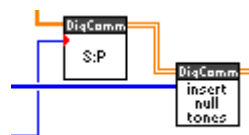


Figura 50: Inserción de ceros al esquema  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

A la salida del bloque S:P se le deben agregar los Null tones, para ello se utiliza el bloque insert null tones que recibe de parámetros un arreglo bidimensional que es la salida del bloque S:P y el arreglo Null Tones que contiene las posiciones de donde se deben agregar los ceros, obteniéndose un arreglo de símbolos de N filas con K valores de Null-tones.



7. Realizar una FFT inversa para convertir el diseño de dominio de la frecuencia de una señal de dominio de tiempo.

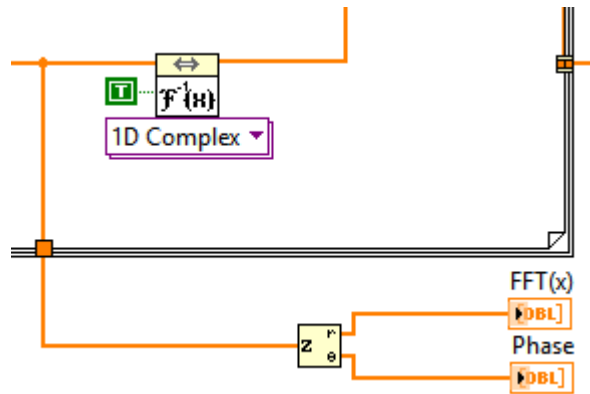


Figura 51: FFT Inversa de conjunto de datos  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

8. Insertar un prefijo cíclico de 64 puntos mediante la duplicación de los últimos 64 puntos de la matriz al comienzo

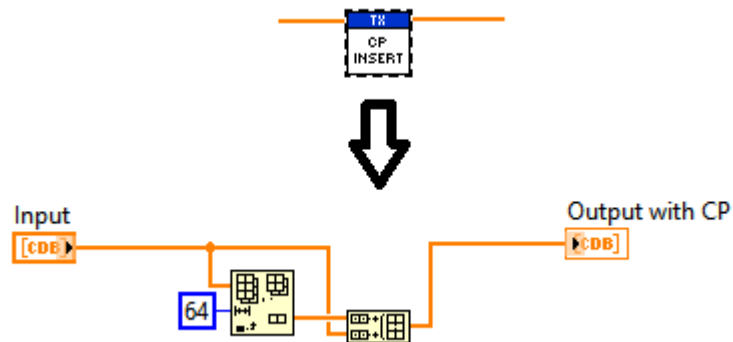


Figura 52: Inserción del prefijo cíclico  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

9. Escalar las formas de onda OFDM en el dominio del tiempo en una magnitud compleja por debajo de 1, típicamente por debajo de 0,7 por cada I & Q .

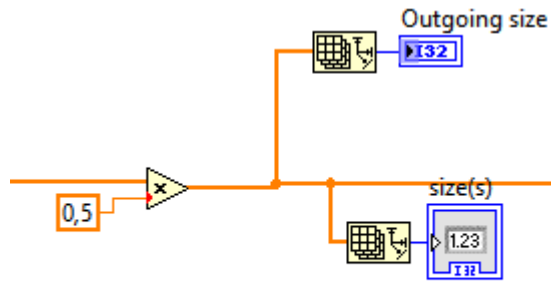


Figura 53: Escalamiento de la señal OFDM  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

10. Transmitir el dato procesado a través del USRP Write Tx Data.vi

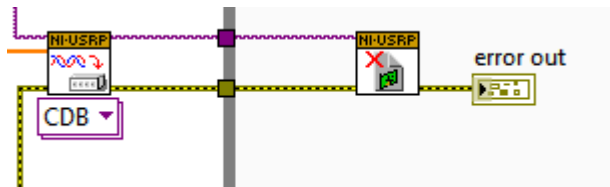


Figura 54: Transmisión de información  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

La interfaz final con el usuario, se representa en la figura 55

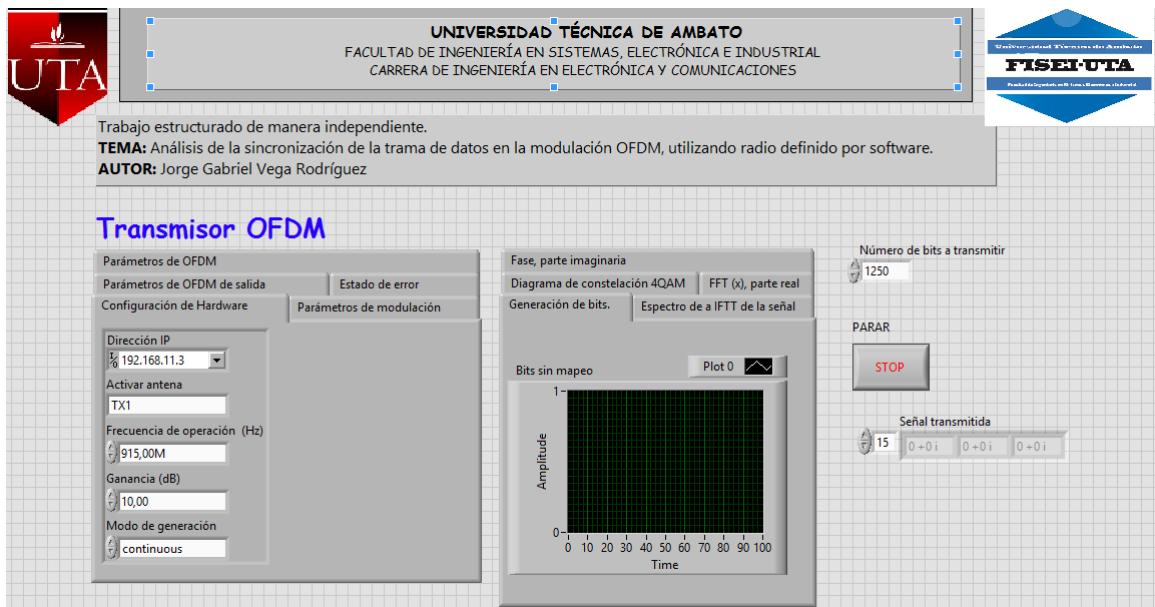


Figura 55: Interfaz final del Tx OFDM  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

#### 4.5.2. Sincronización de trama en OFDM.

##### Estructura de la trama OFDM.

La sincronización en cualquier sistema de comunicaciones es un aspecto importante que se debe tener en cuenta. La sincronización en OFDM, que debe realizarse tanto en tiempo como en frecuencia, es muy importante, de hecho, la sincronización es uno de los puntos más importantes a la hora de diseñar cualquier sistema OFDM. La figura 56 muestra la estructura de la trama de datos de OFDM.

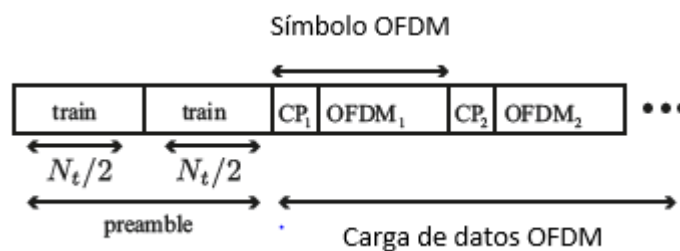


Figura 56: Estructura de una trama de datos OFDM  
Fuente: "Digital Wireless Communication [1]"

El símbolo de OFDM, consta de un preámbulo o preamble. El preámbulo consta de dos secuencias de training repetidas y se envía utilizando la modulación por amplitud de pulso PAM. Se envían los datos posteriores utilizando la modulación OFDM, con la inserción del prefijo cíclico para controlar la sincronización. Para OFDM, es un estándar el utilizar un prefijo cíclico durante este intervalo, añadiendo las  $N$  FFT muestras; de esta manera se completa el símbolo OFDM.

##### Short training sequence del estándar IEEE 802.11a.

Para la sincronización de la trama en OFDM, se hace uso de una secuencia de información conocida como short training sequence, definido por el estándar IEEE 802.11a. En la figura 57 se observa la estructura del símbolo OFDM en base al estándar IEEE 802.11a.

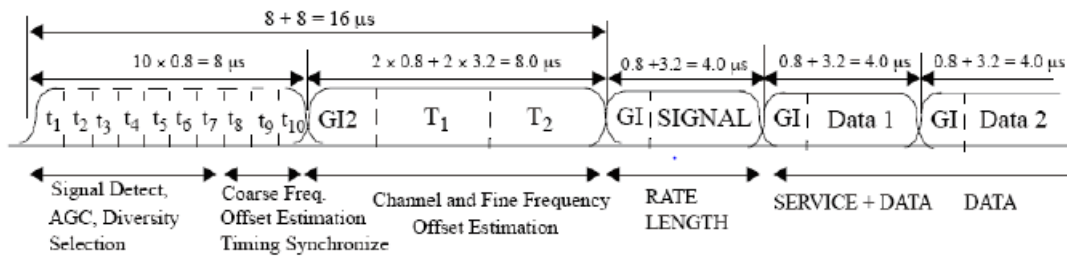


Figura 57: Estructura del símbolo de OFDM  
Fuente: Digital Wireless Communication [1]

En la figura 57 se observa la secuencia de Prueba Corta (Short Training Sequence), que va hasta los 8μs y se determina el tiempo de sincronización a través de la detección de la señal, está compuesta por la repetición de 10 símbolos de prueba, usa un Control Automático de Ganancia (ACG), diversidad de selección, tiempo de adquisición, y frecuencia robusta en el receptor.. La Secuencia de Prueba Larga (Long training Sequence), en el cual se encuentra el canal de desplazamiento de frecuencia y me indica las bandas de guarda usadas en OFDM. El índice de Longitud (Rate Length) que determina el inicio del símbolo de la trama de datos OFDM y los datos de Servicio (Service Data), en los cuales consta la inserción del prefijo cíclico y los datos transmitidos.[1]

### Método de sincronización.

El propósito de la sincronización de trama es resolver el retraso del periodo de símbolo transmitido, determinando el comienzo de la trama y encontrando una referencia conocida en la señal transmitida de manera que los procesos como estimación de canal y ecualización de la señal se desarrollen con normalidad. Generalmente para la realización de la sincronización de trama, se realiza y se estudia algoritmos de sincronización basados en la frecuencia de portadora. [22]

El algoritmo de Schmidl & Cox que fue propuesto por Ch. Nanda Kishore y V. Umamathi Reddy da la posibilidad de analizar un símbolo OFDM precedido por un prefijo cíclico. Las dos mitades de este símbolo son idénticas (en el dominio del tiempo) por la carga de portadores impares con una secuencia de pseudo ruido. Si la longitud de CP es al menos tan grande como la de la respuesta de impulso de canal, a continuación, las dos mitades del símbolo siguen siendo idénticas a la salida del canal, a excepción de una diferencia de fase entre ellos debido a la frecuencia portadora desplazada. Para poder aplicar el logaritmo se realizan los siguientes pasos: [2]

1. Se calcula la métrica de correlación:

$$R(d) = \sum_{i=0}^{M-1} y[n+d]y[n+d+W] \quad (23)$$

Donde  $W$ , es la mitad del tamaño de la secuencia de entrada,  $n$  es el número de subportadoras, y  $d$  es un índice que indica la primera muestra de la ventana de muestreo adoptada por el sistema

2. Se calcula la potencia media de la señal recibida.

$$P(d) = |y[n+d+W]|^2 \quad (24)$$

3. Se encuentra la relación entre  $R(d)$  y  $P(d)$ :

$$M(d) = \left| \frac{R[d]}{P[d]} \right|^2 \quad (25)$$

4. Se aproxima el desplazamiento de frecuencias a un valor de fase:

$$e = \text{phase} \frac{P[d]}{R[d]} \quad (26)$$

5. Estimar los parámetros de frecuencia de desplazamiento.
6. Corregir el desplazamiento de trama y de frecuencia.

### **Sincronización de trama en Labview.**

En el desarrollo del proyecto, se implementó un transmisor y un receptor, basados en OFDM. Al usar este tipo de modulación, los datos son enviados en paquetes o tramas, los cuales necesitan ser sincronizados en el receptor OFDM, con el objetivo de no perder información a través de varios procesos dentro de la modulación

Al utilizar la plataforma de desarrollo Labview, se hizo uso del VI OFDM\_synchronize y los dos subVIs: symbol\_timing.vi y frame\_detect.vi que representan a la temporización de símbolos, detección de trama y estimación del desplazamiento de frecuencia respectivamente. [1]

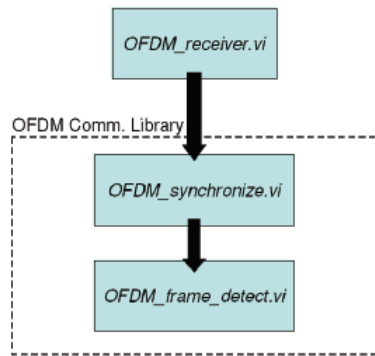


Figura 58: Diagrama de bloques de las librerías de detección de trama.  
Fuente: Digital Wireless Communication [1]

En la figura se observa el diagrama de bloques para implementar el algoritmo de detección y sincronización de trama, en vase a las librerías anteriormente nombradas.[1]

### Temporización de símbolos.

La temporización de símbolos a través del VI symbol\_timing.vi se encarga de que el receptor muestree la señal correctamente. Dentro de este bloque existen varios subVIs en los que se encuentran implementados los distintos algoritmos para temporización de símbolos.

En la figura 59 se muestra el diagrama de panel frontal de temporizador de símbolos, donde se configuran los parámetros de forma de onda que permiten realizar el proceso de temporización de símbolo de datos, proceso necesario para poder realizar la detección de la trama de datos.

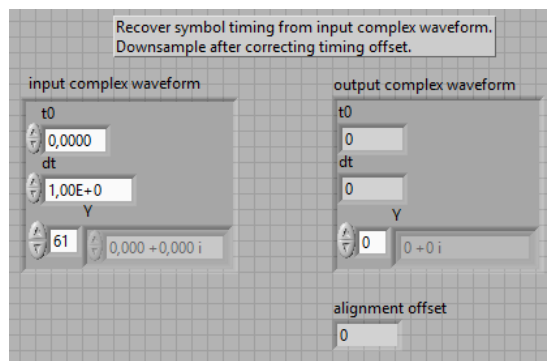


Figura 59: Diagrama de bloques de temporizador de símbolo.  
Fuente: "Digital Wireless Communication [1]

## DetECCIÓN DE TRAMA.

La detección de trama se encarga de detectar el inicio y fin de la trama, de manera que se pueda corregir el desplazamiento de frecuencia de manera opcional, si se detecta errores en la recepción de información. Se encuentra implementado en el VI `frame_detect`. En la figura 60 se representa el diagrama de bloques del detector de trama para OFDM.

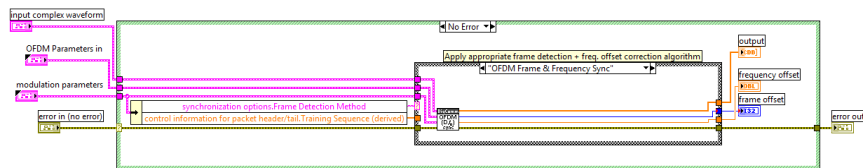


Figura 60: Diagrama de bloques de detección de trama  
Fuente: "Digital Wireless Communication [1]"

En la figura 61 se detalla el panel frontal del detector de trama. Se escoge el método de sincronización de trama con el que se desea trabajar.

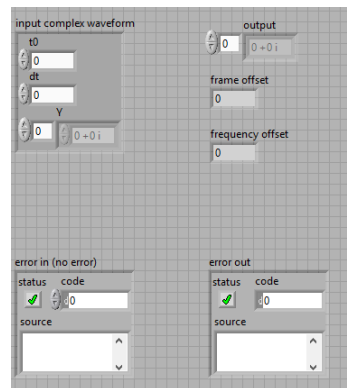


Figura 61: Panel frontal del detector de trama  
Fuente: "Digital Wireless Communication [1]"

Dentro de este bloque se encuentran los subVIs donde están implementados los métodos de detección de trama.

### 4.5.3. Receptor OFDM.

En esta sección se describieron los subVIs correspondientes a la etapa receptora tales como el demodulador de banda base, el demodulador OFDM y el ecualizador en el dominio de la frecuencia. El receptor procesa bloques de longitud  $N + L_c$ , descartando las primeras muestras  $L_c$  de cada bloque. Un solo proceso de ecualización se realiza en el dominio de la frecuencia. Las operaciones de

sincronización de frecuencia portadora y sincronización de trama se omiten por simplicidad.[1]

En la parte de recepción del sistema OFDM los parámetros de tamaño de la FFT (N), la longitud del prefijo cíclico ( $L_c$ ) y el arreglo que contiene la posición de los Null Tones, sirven para realizar el proceso de demodulación de la señal recibida. Para demodular se necesita extraer los datos ingresados en la modulación y se procedió a realizar el proceso inverso en el transmisor; se sumó el tamaño de la FFT (N) y la longitud del prefijo cíclico Se realizó la transformada de Fourier para pasar los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y poder trabajar con símbolos. Se ecualizó los datos OFDM de forma paralela con todas las filas existentes, y se pudo extraer los Null Tones que se encuentran en posiciones específicas en todas las filas de la matriz que contiene la trama OFDM. Se convirtió los datos de paralelo a serie para tener datos de forma unidimensional.

En resumen, para implementar en Labview, el receptor basado en modulación OFDM, se siguen los siguientes pasos:

1. Inicializar y configurar los parámetros de recepción y de banda de transmisión del USRP.

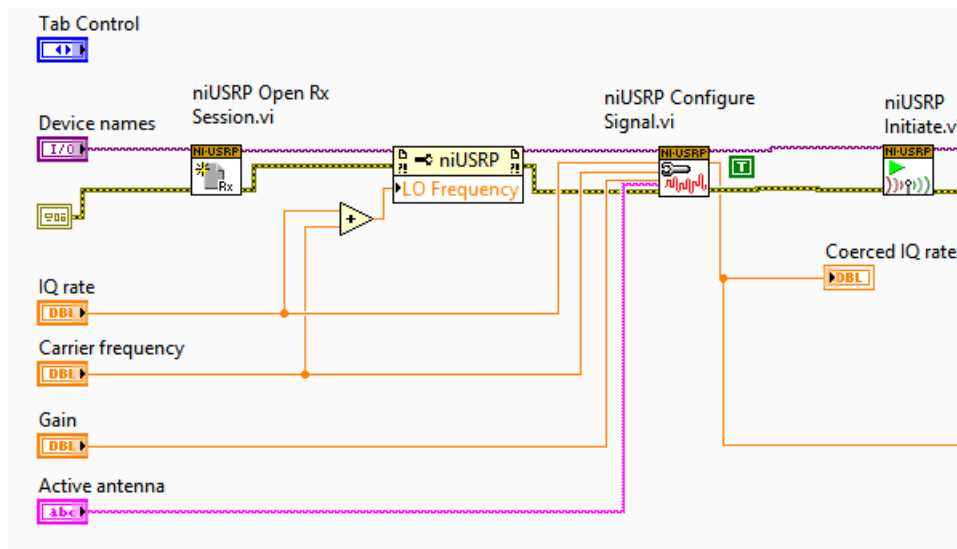


Figura 62: Diagrama de bloques de Parámetros de recepción de hardware  
Fuente: Investigador, a través de Labview

2. Generar una secuencia de bits aleatoria (125 bits)



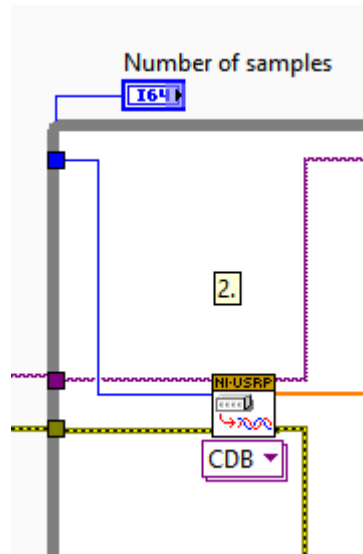


Figura 63: Generador de bits aleatorio en receptor OFDM  
Fuente: Investigador a través de Labview

3. Detectar la ubicación del prefijo cíclico para la sincronización de la trama y la frecuencia de offset.

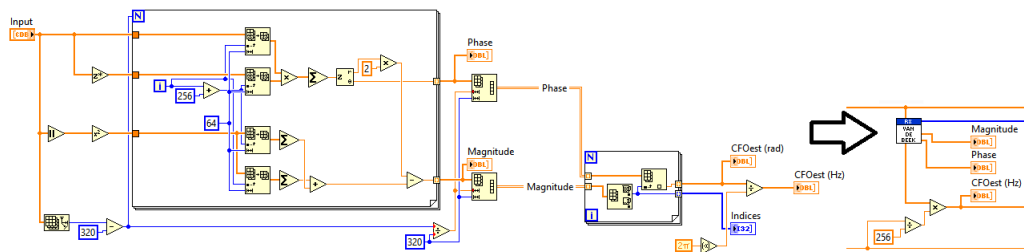


Figura 64: Detección de prefijo cíclico en el receptor.  
Fuente: Investigador a través de Labview

4. Remover el prefijo cíclico.

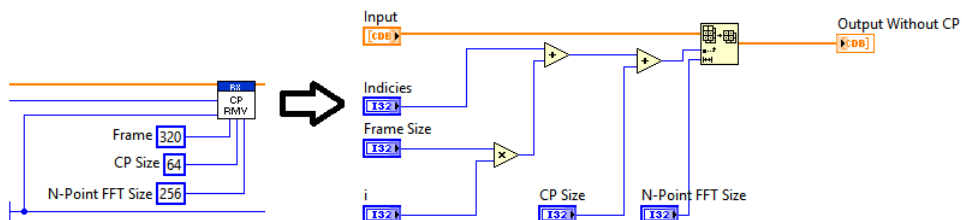


Figura 65: Remoción de prefijo cíclico en receptor OFDM  
Fuente: Investigador a través de Labview

5. Remover la frecuencia de offset de la señal de entrada.

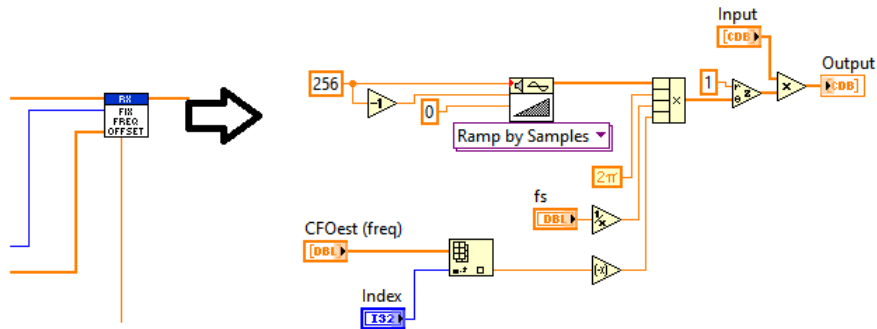


Figura 66: Remoción de frecuencia de OFFSET en receptor OFDM  
Fuente: Investigador a través de Labview

6. Calcular la FFT convirtiendo el símbolo OFDM del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

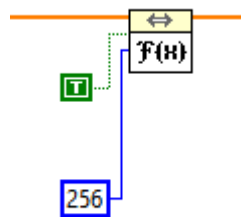


Figura 67: FFT de la señal de entrada del receptor OFDM  
Fuente: Investigador a través de Labview

7. Separar los bits de datos y de referencia y remover los ceros de la señal.

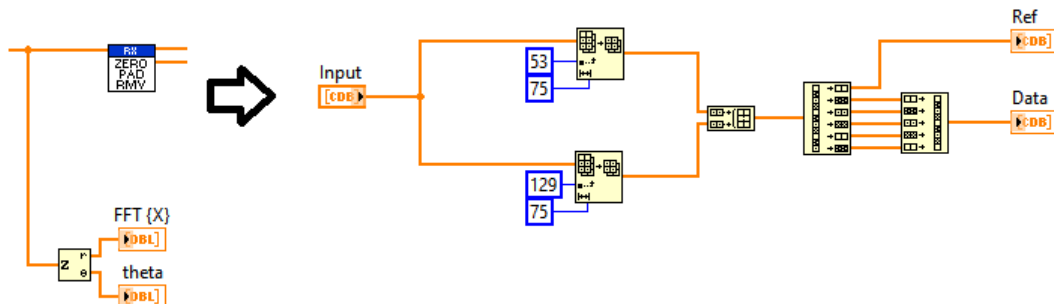


Figura 68: Separación de bits de datos  
Fuente: Investigador a través de Labview

8. Calcule los coeficientes de equalización utilizando un ajuste lineal para ambos I y Q basado en símbolos de referencia.

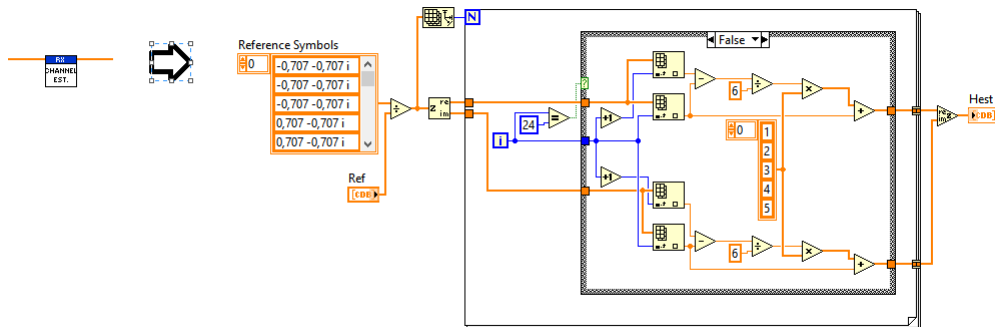


Figura 69: Ecuación de la señal DE ENTRADA  
Fuente: Investigador a través de Labview

9. Aplicar la ecualización a los símbolos de OFDM.

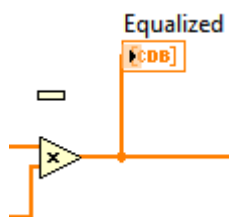


Figura 70: Ecuación de los símbolos OFDM  
Fuente: Investigador a través de Labview

10. Convertir los símbolos de datos mapeados a bits de datos.

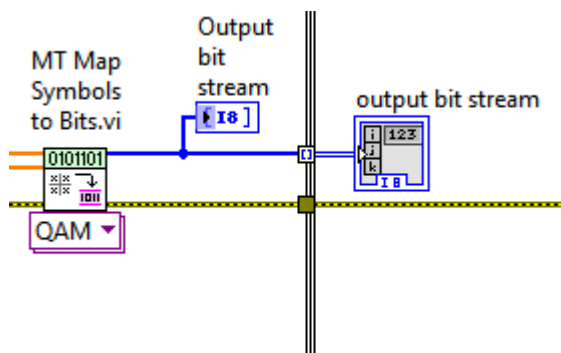


Figura 71: Conversión de datos mapeados a bits  
Fuente: Investigador a través de Labview

#### 4.6. Recolección de información y análisis.

Una vez configurados el Tx y Rx en OFDM, se realizaron las pruebas de funcionamiento, en las cuales se alteraba las condiciones de trabajo del canal de

transmisión, con el fin de analizar el comportamiento del sistema simulado en diferentes condiciones, aumentando y disminuyendo los niveles de interferencia ISI e ICI, aumentando la distancia entre T y Rx.

Para el correcto uso del transmisor primero se configura los parámetros de hardware, como indica la figura 72:

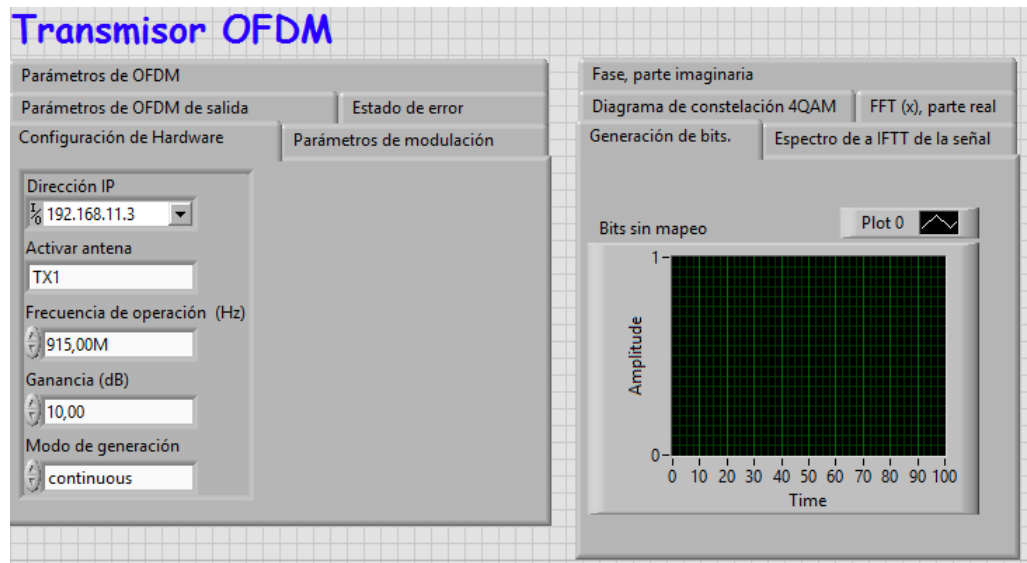


Figura 72: Parámetros de hardware USRP 2920  
Fuente: Investigador a través de Labview

Seguido de esto se configuraron ciertos valores y parámetros que permitieron obtener la señal OFDM de un sistema de comunicación inalámbrica, como indica la figura 73.

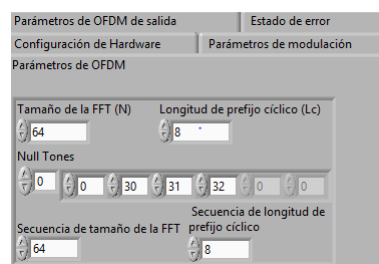


Figura 73: Configuración de los parámetros de una señal OFDM  
Fuente: Investigador, a través de Labview.

Se pueden apreciar los diferentes parámetros de configuración de un sistema modulado en OFDM, y se recomienda hacerlo con los siguientes valores:

longitud del paquete = 500 bits

Tipo de modulación = QPSK

Longitud de estimación de canal = 4

El tamaño de FFT ( $N$ ) = 64

Longitud del CP ( $L_c$ ) = 8

Null tones = {0, 31, 32, 33}

La generación de forma aleatoria de bits, permite que al activar el transmisor, se este enviando información de manera permanente y se lo representa mediante un diagrama de fase, como muestra la figura 74 :

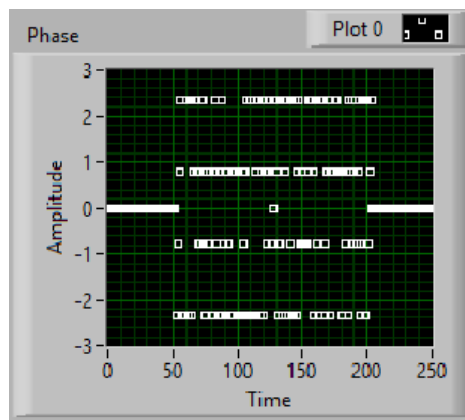


Figura 74: Diagrama de fase de información transmitida.

Fuente: Investigador a través de Labview

Se puede observar que inicialmente, los datos se encuentran en función del tiempo. Si en la figura no aparecieran datos, nos indica que el transmisor no esta generando información.

En la figura 75se puede observar el diagrama de constelación formado por 4QAM, modulación base escogida para realizar el esquema OFDM.

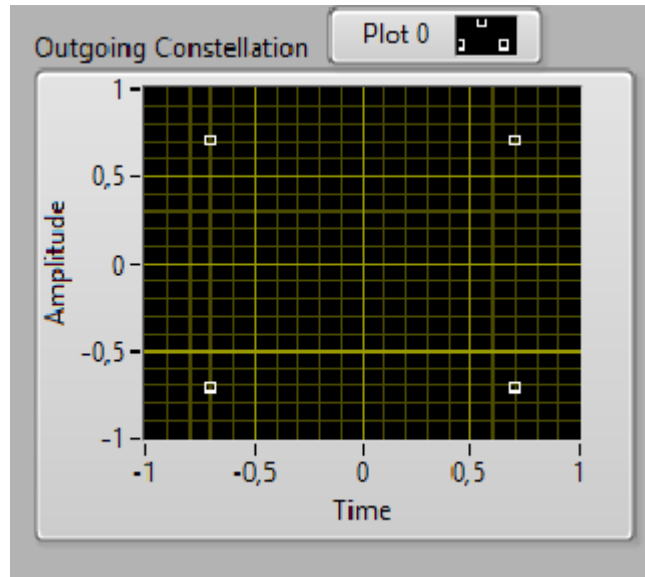


Figura 75: Diagrama de constelación 4QAM  
Fuente: Investigador a través de Labview

Se observa que los bits se distribuyen un bit por cada cuadrante. Esto se produce por que la señal de entrada es modulada en 4QAM.. Si se escogiera 16QAM, como modulación de señal de entrada, se formarían grupos de 4 bits para cada cuadrante. Al cambiar las propiedades del gráfico del diagrama de cosntelación, se puede notar con mayor claridad la características del diagrama de constelación, como lo muestra la figura 76:

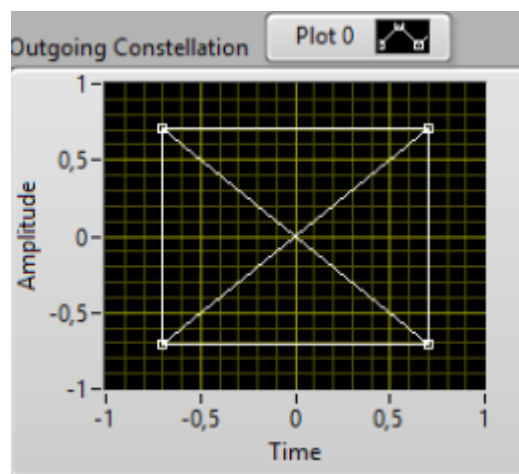


Figura 76: Gráfico modificado del Diagrama de conetelación 4QAM  
Fuente: Investigador a través de Labview

En la figura 77 se muestra la  $FFT(x)$ , en la cual se puede notar que los datos transmitidos se encuentran en el dominio del tiempo y están representados por impulsos unitarios, ya que su valor de amplitud no excede a 1.

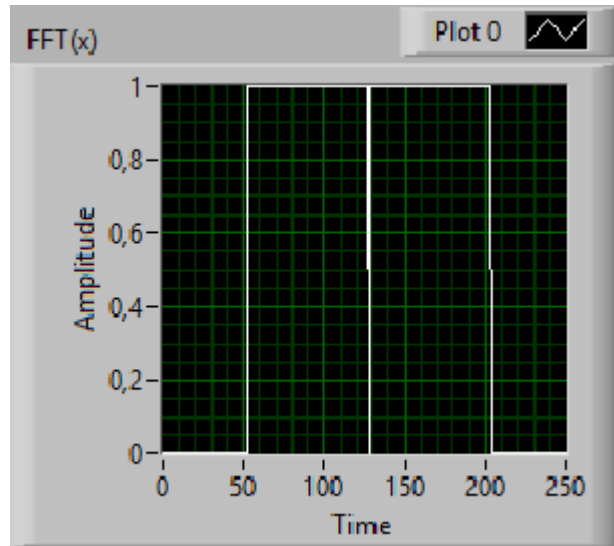


Figura 77: FFT de señal transmitida  
Fuente: Investigador a través de Labview

Al momento de recibir la señal del receptor, se miden ciertos parámetros que permiten realizar el análisis del sistema de comunicaciones usando modulación OFDM. Al igual que el transmisor, primero se necesita tener configurado los parámetros de Hardware, como indica la figura 78:

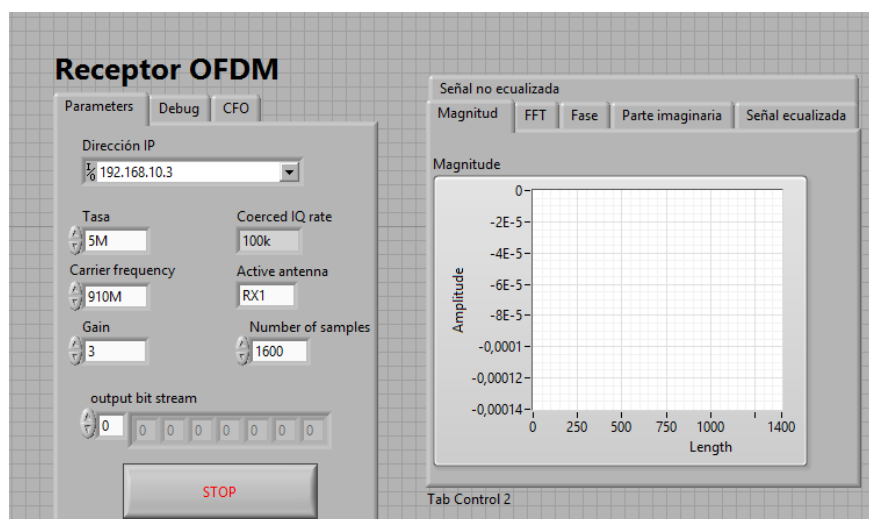


Figura 78: Parámetros de Hardware del receptor OFDM  
Fuente: Investigador a través de Labview

El espectro de frecuencias de la FFT de la señal receptada, se muestra en la figura 79:

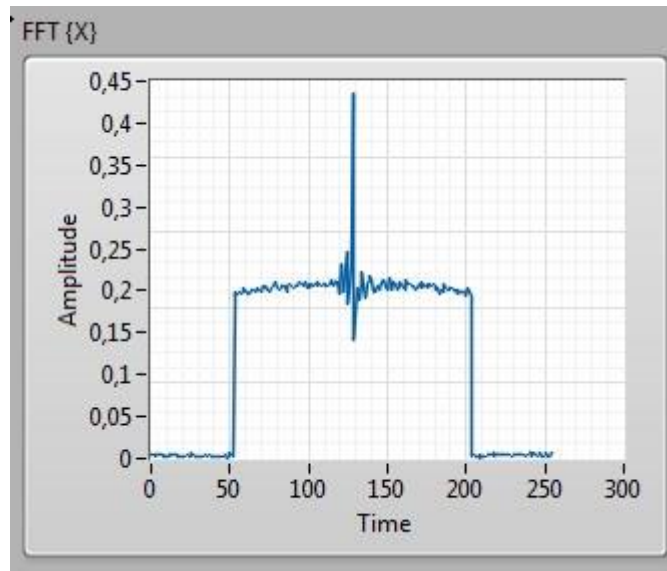


Figura 79: Espectro FFT del receptor  
Fuente: Investigador a través de Labview

La magnitud y fase de la señal receptada, se muestra en la figura 80 como resultado de la utilización de la modulación 4QAM.

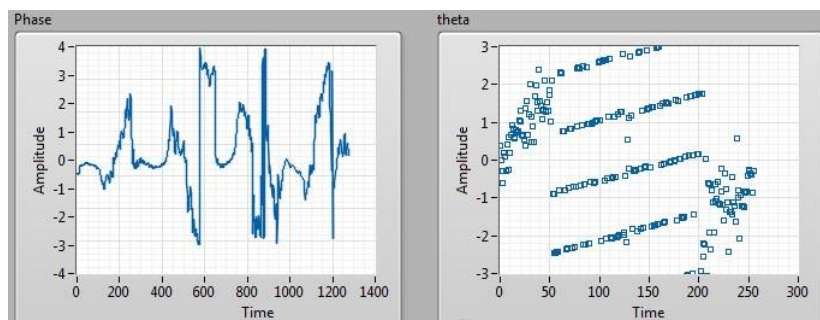


Figura 80: Gráfico de fase y cuadratura de la señal receptada  
Fuente: Investigador a través de Labview

La ecualización de la señal en el receptor es importante ya que permite evitar pérdidas en la señal, con lo cual se garantiza que la información será recibida en su totalidad y sin distorsiones. En la figura 81 se muestra el diagrama de constelación de la señal recibida con y sin ecualización. Se puede observar claramente que las características de la misma cambian.



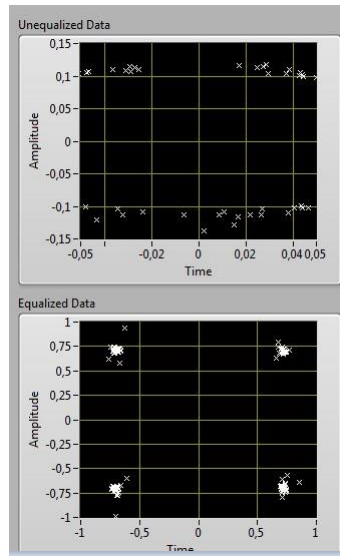


Figura 81: Ecuación de la señal recibida  
Fuente: Investigador a través de Labview

Se observa que el dato recibido sufre distorsión si no se ecualiza la señal de entrada en el receptor.

Si se altera los valores de potencia de transmisión y recepción de la señal, los valores de la señal ecualizada cambian, de la siguiente forma:

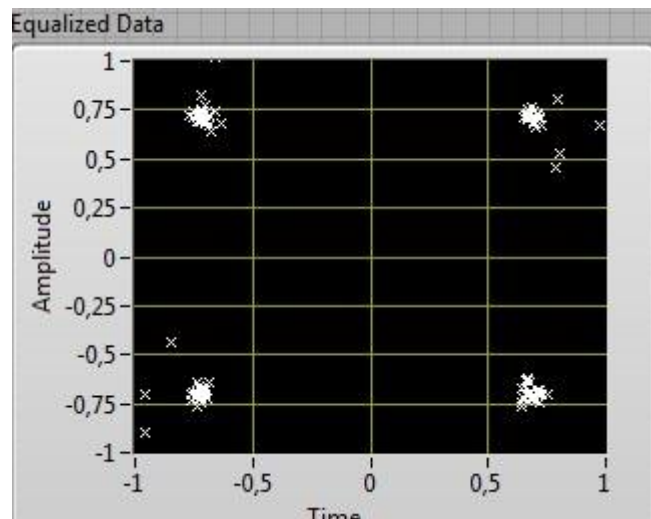


Figura 82: Señal ecualizada a mayor potencia

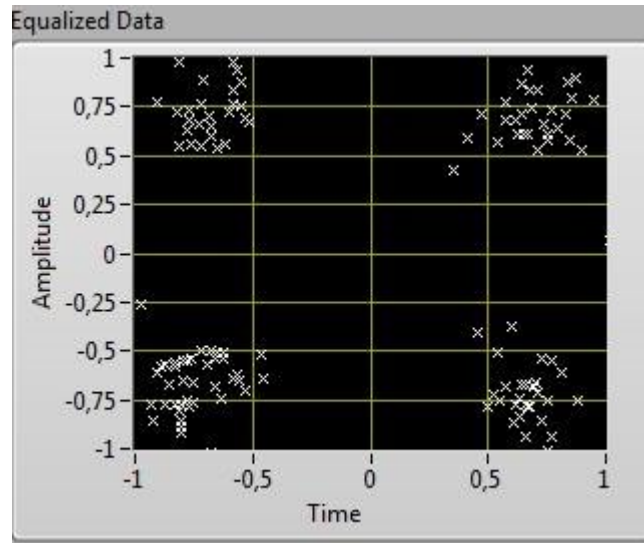


Figura 83: Señal ecualizada a menor potencia  
Fuente: Investigador a través de Labview

Este efecto se produce al alterar el canal de transmisión, que en este caso es de radiofrecuencia, ya que se posicionan los equipos USRP 2920, de manera que exista algún tipo de interferencia en la transmisión de la información.

### **Sincronización de la trama de datos.**

En el transmisor se genera continuamente una trama compuesta por 8 símbolos OFDM, como muestra la Fig 84. El primer símbolo se utiliza para sincronización del receptor y es un símbolo nulo. Después, se introduce el símbolo de referencia que se utilizará en el receptor para estimar el canal. Posteriormente se incluyen 6 símbolos de datos, debido a que el objetivo es medir el canal, se generan aleatoriamente.

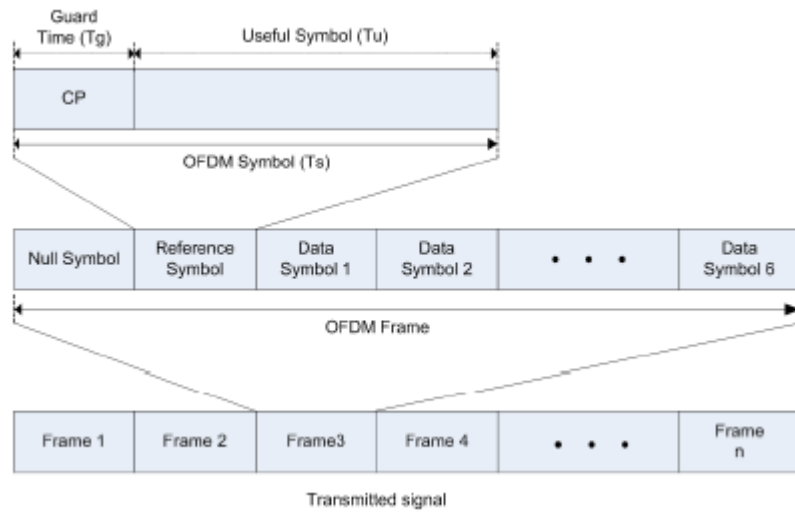


Figura 84: Estructura de la trama de datos OFDM  
Fuente: Estudio de la trama y la capa de enlace de datos [17]

Para nuestro caso las tramas se generan por símbolos, tomando en cuenta también la magnitud de la señal adquirida por el receptor.

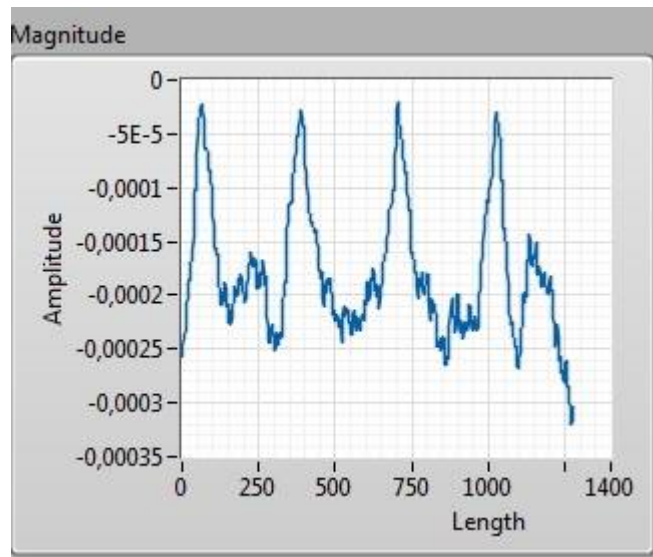


Figura 85: Magnitud de la señal adquirida por el receptor OFDM  
Fuente: Investigador a través de Labview

En la figura 86 se puede observar la métrica de correlación del algoritmo de Schmidl & Cox.

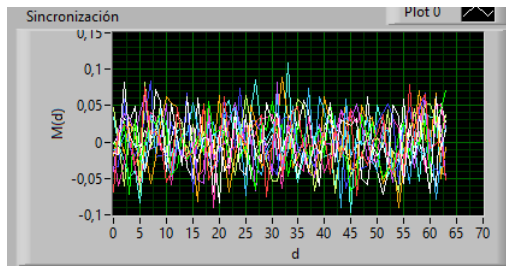


Figura 86: Métrica de sincronización para algoritmo de Shmil &Cox  
Fuente: Investigador a través de Labview

Se observa que el valor de  $M(d)$  no sobrepasa la unidad, lo que indica que los valores de la señal se encuentran sincronizados, y los bits se transmiten de manera correcta, en relación a la señal transmitida, donde los bits se ubicaban en valores aproximados a 0.7071, con una señal modulada en 4QAM.

Los bits generados en la trama de la señal recibida se representan en la figura 87, acompañados de los diagramas de fase, cuadratura y ecualización de la señal, los cuales demuestran que al funcionar de manera íntegra, reciben la información de manera precisa, a pesar de los problemas de interferencia, a los cuales se puso a prueba el sistema.

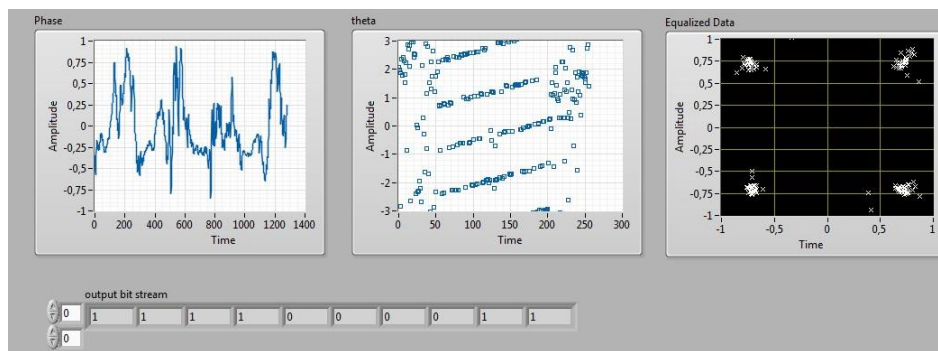


Figura 87: Bits de la trama de datos OFDM  
Fuente: Investigador a través de Labview

La cadena de bits recibidos, modulados mediante el esquema OFDM, pueden sufrir alteraciones al cambiar, principalmente las condiciones del canal de transmisión, sin embargo la inserción del prefijo cíclico y la detección y corrección de la trama a través del algoritmo de Schmil & Cox, han permitido controlar el envío y recepción de la trama.

## CAPÍTULO 5

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 5.1. Conclusiones

- A diferencia de otro tipo de modulaciones, OFDM tiene bajos desvanecimientos de la señal por lo que se adapta fácilmente a sistemas de comunicaciones que carecen de línea de vista, por la naturaleza de su ortogonalidad, permitiendo así la transmisión de múltiples subportadoras en un ancho de banda reducido.
- Al aumentar la potencia de transmisión de la señal del USRP, el diagrama de constelación de la señal ecualizada en el receptor de la red OFDM, muestra los valores en fase de la señal, indicando como se agrupan de acuerdo a la modulación 4QAM en función de valores de amplitud y tiempo.
- El solapamiento de las subportadoras de OFDM, se lo evidencia en el gráfico de los valores de fase del receptor, luego de haber insertado el prefijo cíclico en la trama de datos, lo cual se debe corregir configurando los valores de los parámetros de la modulación OFDM para evitar el retraso de frecuencias en la modulación.
- Los ecualizadores en el receptor OFDM, permiten identificar los valores de las interferencias ISI e ICI, a más de indicar si los símbolos están ubicados en los cuadrantes respectivos a través de los diagramas de constelación.
- La aplicación de la FFT y la IFFT es un algoritmo exclusivo para expresar la suma de señales sinusoidales representadas en la señal portadora, separadas por una frecuencia específica permitiendo realizar un muestreo que se adapta a la ortogonalidad de la modulación.
- El uso del USRP 2920, aplicando tecnología SDR, permite reducir el nivel de complejidad en la implementación de un sistema de comunicaciones inalámbricas, especialmente si este es de altas prestaciones y tiene características especiales como un gran ancho de banda, alta velocidad y alta capacidad de

información transmitida, las cuales son tomadas en cuenta para la modulación OFDM.

- Al implementar el algoritmo de Schmidl & Cox, se puede corregir el desplazamiento de frecuencias, que generan retardos en la señal a más de identificar, cuando la señal sobrepasa los valores normales de la métrica de correlación, ayudando a que exista sincronización en la señal recibida.

## 5.2. Recomendaciones

- Tratar de elegir los parámetros que mas se ajusten al sistema realizado, con el fin de aprovechar todas las bondades de la modulación OFDM dentro de los sistemas de comunicaciones.
- Realizar una investigación exhaustiva en el manejo del USRP 2920 con el software Labview, a fin de tener una base de conocimiento que nos permita crear aplicaciones versátiles con estos equipos, aprovechando sus altas prestaciones.
- Analizar el contenido teórico de la transformada de Fourier y de sus principales características, ya que al ser parte primordial de este tipo de modulación se necesita saber como funciona cada una de las propiedades a usarse en la modulación.
- Configurar los parámetros del equipo USRP 2920, de manera correcta, cerciorandose especialmente que la parte de red este bien, ya que sin una buena configuración, los equipos no van a funcionar.
- Realizar varias pruebas con los equipos, acercándolos y alejándolos entre si, con el fin de observar las variaciones que sufre la señal y los distintos parámetros del sistema de comunicación inalámbrica a través de OFDM.
- Procurar tener instalado los paquetes y librerías completos del software Labview, para así sacarle el máximo provecho a todo lo que nos ofrece el equipo USRP 2920, y no tener problemas al momento de compilar los diferentes programas que se realicen a lo largo de la investigación.
- Revisar los Vis disponibles en Labview que permitan implementar algoritmos de detección y sincronización de trama, a más del estudiado en este proyecto, para poder tener alternativas en estudios similares de este tipo de sistemas.

## Bibliografía

- [1] R. Heath, *Digital Wireless Communication*. Hungary, 2012. Cap. 6, Pag. 99-114.
- [2] R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for wireless multimedia communications*. Artech House, Inc., 2000.
- [3] D. V. P. G. Jiménez, “Algoritmos en transmisión y recepción para ofdm en entornos multi-usuario,” *Madrid*, 2005. Ultimo acceso, Julio 2015.
- [4] A. Marwanto, “Experimental study of ofdm implementation utilizing gnu radio and usrp - sdr,” <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5423778>, Diciembre, 2009.
- [5] J. F. Quiroz Terreros, “Emulador de un sistema de comunicaciones utilizando tecnología sdr.,” *Tesis, ESPE*, 2010.
- [6] C. R. Eduardo Luis, C. R. Carlos Alberto, and R. S. Boris, “Diseño, simulación, e implementación de la sincronización de la portadora y de la trama en sistemas ofdm,” *Tesis, ESPOL*, 2014.
- [7] M. M. Julio Cesar, G. J. Ronald Fabricio, and R. S. Boris, “Diseño, simulación e implementación del esquema de modulación ofdm y de la ecualización en el dominio de la frecuencia,” *Tesis, ESPOL*, 2014.
- [8] W. Tomasi, G. Hernández, and V. González, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson educación, Cuarta Edición, 2003. Cap. 1, pag. 1-32. Cap. 12, pag. 467-522.
- [9] Pere Martí, “Sistemas de comunicaciones digitales [En Línea].” Disponible en: [http://www.tsc.uc3m.es/hmolina/wp-content/uploads/2010/02/lsec\\_ittst\\_p7.pdf](http://www.tsc.uc3m.es/hmolina/wp-content/uploads/2010/02/lsec_ittst_p7.pdf), 2013. Ultimo acceso en julio 2015.

- [10] B. Sklar, *Digital communications*, vol. 2. Prentice Hall NJ, 2001.
- [11] L. Couch, R. Salas, and R. de Jesús Bravo de la Parra, *Sistemas de comunicación digitales y analógicos*. Prentice-Hall, Séptima Edición, 1998.
- [12] C. T. Científicos, “Redes & modulación análoga-digital.” Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/analogica-digital>, 2005. Último acceso en mayo 2015.
- [13] A. A. Rodríguez, F. P. González, J. C. Sueiro, R. L. Valcarce, C. M. Nartallo, and F. P. Cruz, *Comunicaciones digitales*. Pearson Prentice Hall, 2007.
- [14] E. Paredes, “Multiplexacion por division ortogonal de frecuencia,” <https://prezi.com/ejtsak2xsti-/ofdm-cp-isi-ici/>, Abril, 2013.
- [15] A. Saburrido, “Multiplexacion por división de frecuencias ortogonales,” <http://www.modulo0tutoriales.com/ofdm-multiplexacion-por-division-de/>, 2013.
- [16] Albentia Systems. S.A., “Modulación ofdm.” <https://albentia.wordpress.com/2013/09/05/modulacion-ofdm/>, Sevilla, 2014. Ultimo acceso Junio 2015.
- [17] F. Pérez, “Estudio de la trama y capa de enlace de datos.” Disponible en: <http://es.slideshare.net/francescperezfdez/fundamentos-de-redes-la-capade-enlace-de-datos>, 2012. Ultimo acceson en Agosto 2015.
- [18] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Señales y sistemas*. Pearson Educación, 1998.
- [19] M. J. Roberts, G. N. Cazares, and G. M. Hernández, *Señales y sistemas: análisis mediante métodos de transformada y Matlab*. McGraw-Hill, 2005.
- [20] Escuela Superior de ingenieros, “Calculo eficiente de la transformadad de fourier [En Línea].” Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11014/fichero/Volumen+1> Ultimo acceso en mayo 2015.
- [21] Pinar Domínguez Iván & Murillo Fuentes Juan José, *Laboratorio de Comunicaciones Digitales, Radio Definida por Software*. Universidad de Sevilla, 2011.
- [22] H. Arslan, *Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems*, vol. 10. Springer, 2007.



- [23] National Instruments, “Características de ni usrp 2920 [En Línea].” Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/212990>, 2013. Último acceso en julio 2015.
- [24] N. Instruments, “Ni usrp,” <http://www.ni.com/usrp/esa/>, Julio, 2014.
- [25] N. Instruments, *NI USRP 2920 Getting Started Guide*. National Instruments Corporation,, Austin, Texas, Febrero 2014.
- [26] N. Instruments, *NI USRP 29XX Getting Started Guide*. National Instruments Corporation, Austin, Texas,, 2014.

## **Anexos y Apéndices**

Pruebas de laboratorio.



Figura 88: Laboratorio UODIDE

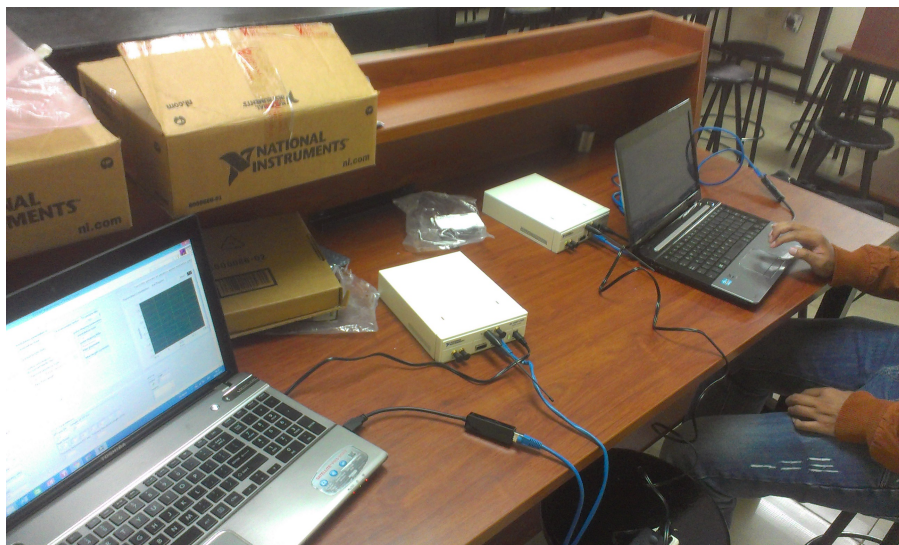


Figura 89: Implementación de sistema OFDM con USRP 2920