



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“SINCRONIZACIÓN PARA COMUNICACIÓN D2D
(DEVICE TO DEVICE) EN UNA RED LTE
IMPLEMENTADO EN USRP (UNIVERSAL SOFTWARE
RADIO PERIPHERICAL).”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO/A EN TELECOMUNICACIONES

JOHANNA MARITZA BLACIO ROMERO

DOUGLAS ISAAC TORRES MORÁN

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis profesores, a la PhD. María Antonieta Álvarez, a el PhD. Boris Ramos y a la Ing. Maricela Freire por sus consejos, colaboración, y guía profesional para el desarrollo del proyecto.

JOHANNA BLACIO ROMERO

A mis profesores, la PhD. María Antonieta Álvarez, al PhD. Boris Ramos, quienes han sido excelentes instructores para mi formación de ingeniero, y de manera muy especial a la Ing. Maricela Freire quien se ha esforzado por ayudarme a cumplir mis metas profesionales.

DOUGLAS ISAAC TORRES MORÁN

DEDICATORIA

El esfuerzo y dedicación para este proyecto se lo dedico a Dios por ser mi guía espiritual para conseguir las metas que me he propuesto.

A mi familia, en especial a mis padres Rolando y Nidia quienes me brindaron su apoyo incondicional a lo largo de mi formación académica, permitiéndome ser una persona responsable, respetuosa y perseverante.

A mis hermanos quienes con sus palabras de aliento me ayudaron a perseverar en mi objetivo.

A mis abuelitos Neshito, Yolita, Lucho, Estelita porque gracias a su amor y sus sabios consejos me han ayudado a tomar decisiones con sabiduría.

A mis tías quienes siempre han estado dispuestas a escucharme, brindándome sus mejores consejos.

JOHANNA MARITZA BLACIO ROMERO

Este Proyecto se lo dedico primeramente a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida con mucha sabiduría, por siempre estar conmigo y no dejarme caer.

A mis padres Carlos y Maribel porque son una parte fundamental en mi vida y lo más importante para mí, me han brindado su amor, comprensión y ternura para ser un buen hijo, estudiante y ahora buen profesional.

A mis abuelitos, Tomas, Egda, Cesar y Eugenia; quienes han estado en el momento exacto para darme un sabio consejos, palabras de aliento y mucho amor.

A mis hermanos por siempre estar conmigo en los buenos y malos momentos, apoyándome siempre.

Y finalmente a una gran persona que Dios ha puesto en mi camino, mi pareja de tesis, Johanna, por estar conmigo en los buenos y malos momentos siempre brindándome su apoyo, paciencia y me ha enseñado a no rendirme jamás.

DOUGLAS ISAAC TORRES MORÁN

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

PhD. María Álvarez

PROFESOR EVALUADOR

PhD. Boris Ramos

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
JOHANNA BLACIO ROMERO

.....
DOUGLAS TORRES MORÁN

RESUMEN

La evolución de la telefonía móvil, a través del desarrollo de nuevas aplicaciones y la asignación de las bandas de frecuencia a los operadores móviles, ha producido el consumo en exceso de la telefonía móvil y la consiguiente congestión producida en las redes de comunicación. El presente trabajo consiste en implementar un sistema de sincronización en una red D2D con parámetros LTE utilizando equipos USRP, la cual puede ser una alternativa en la comunicación tradicional disminuyendo las congestiones en la red. Se plantean las topologías de las redes D2D, así como también los tipos de sincronización, debido a que, en las redes de dispositivo a dispositivo, la sincronización de tiempo, trama y frecuencia son importantes para garantizar una comunicación eficiente dentro de las redes densas.

Se diseñan dos escenarios: Cobertura total, a través de dos equipos USRP que se sincronizan para transmitir y recibir en diferentes instantes de tiempo. Cobertura parcial, a través de tres equipos USRP, en donde dos de ellos cumplen la función de enviar información simultáneamente al otro equipo que funciona como receptor. Estos dos escenarios fueron implementados mediante el software LabVIEW, utilizando parámetros LTE y aplicando los métodos de sincronización de Máxima energía para la sincronización de tiempo, Sliding correlator para la sincronización de trama y el algoritmo de Moose para la sincronización de frecuencia. También se aplicó el método de consensus para realizar la corrección de desplazamiento de tiempo y así poder encontrar el inicio de la trama, mediante la superposición de ondas de los nodos de transmisión, obteniendo así el valor de TO que es usado como referencia para sincronizar la red. En la cobertura total se obtuvo la gráfica de la constelación en el receptor, además del gráfico del TO vs t. En la cobertura parcial se obtuvo la constelación en la recepción, además del gráfico del desplazamiento de tiempo vs el número de iteraciones. A través de estas gráficas se pudo evidenciar que la implementación del sistema de comunicación D2D fue sincronizada.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ABREVIATURAS	ix
INDICE DE FIGURAS.....	¡Error! Marcador no definido.
INDICE DE TABLAS.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 1.....	13
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo General.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 Estado del Arte.....	¡Error! Marcador no definido.
1.3 Descripción del Proyecto	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 2.....	19
2. SINCRONIZACIÓN PARA COMUNICACIÓN D2D.....	19
2.1 La tecnología LTE	20
2.1.1 Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales .	20
2.1.2 Modulación por desplazamiento de fase cuaternaria	21
2.1.3 Prefijo Cíclico.....	22
2.1.4 Parámetros de la red LTE.....	23
2.2 Device to Device.....	23
2.2.1 Sincronización	23
2.2.2 Sincronización D2D	24
2.2.3 Desplazamiento de Tiempo - Time Offset:.....	25
2.2.4 Sincronización de Tiempo.....	26
2.2.5 Sincronización de Trama	27
2.2.6 Sincronización de Frecuencia	28
2.2.7 Secuencia de entrenamiento:	28

2.2.8	Tipos de Escenarios	29
2.3	Radio Definido Por Software SDR	30
2.3.1	Periférico Universal de Radio Software USRP	31
2.3.2	NI USRP 2921	31
CAPÍTULO 3.....		33
3. IMPLEMENTACIÓN DE METODOS DE SINCRONIZACION EN UNA RED D2D		33
3.1	Implementación de escenarios	34
3.1.1	Primer Escenario (Todo en cobertura):.....	37
3.1.2	Segundo Escenario (Cobertura Parcial):.....	40
3.2	Métodos de sincronización	42
3.2.1	Máxima Energía	43
3.2.2	Slidding Correlator	44
3.2.3	Moose.....	45
3.2.4	Algoritmo de Consensus.....	47
CAPÍTULO 4.....		49
4. ANALISIS Y RESULTADOS.....		49
4.1	Parámetros de diseño	51
4.1.1	Parámetros de diseño del Transmisor	51
4.1.2	Parámetros de diseño del Receptor.....	54
4.2	Resultados	59
4.2.1	Primer Escenario – Representación cobertura total:.....	59
4.2.2	Segundo escenario – Representación cobertura parcial..	66
CONCLUSIONES		68
RECOMENDACIONES.....		69
BIBLIOGRAFÍA.....		70
ANEXOS		74

ABREVIATURAS

3GPP	Proyecto Asociación de Tercera Generación
BER	Bit Error Rate
bps	bits por segundos
CFO	Carry Frequency Offset
CP	Prefijo Cíclico
D2D	Device to Device
EB	Estación Base
EPC	Evolved Packet Core
FDD	División de Duplexación por Tiempo
FFT	Transformada de Fourier
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General Packet Radio Service
IFFT	Transformada Inversa de Fourier
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISI	Interferencia Intersimbólica
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LTE	Long Term Evolution
OFDM	Multiplexación por División de Tiempo
OFDMA	Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NI	National Instruments
NT	Tonos Nulos
PSK	Modulación por desplazamiento de fase

QPSK	Modulación por desplazamiento de fase
QAM	Modulación de amplitud en cuadratura
RF	Radio Frecuencia
RX	Receptor
SNR	Relación Señal-Ruido
SDR	Software Defined Radio
ST	Training Sequence
TDD	División de Duplexación por Frecuencia
TO	Time Offset
TX	Transmisor
UE	Equipo de Usuario
USRP	Universal Software Radio Peripheral
VI	Virtual Instrument

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1; DIAGRAMA DE EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 1.2: DIAGRAMA DEL ESCENARIO DE SINCRONIZACIÓN “COBERTURA TOTAL”	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 1.3: LITERAL A REPRESENTA LA PRIMERA SECUENCIA. LITERAL B SEGUNDA SECUENCIA, LITERAL C TERCERA SECUENCIA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 2.1: REPRESENTACIÓN DE COMUNICACIÓN D2D.....	19
FIGURA 2.2: DIFERENCIA ENTRE OFDMA Y SC-FDMA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 2.3: CONSTELACIÓN QPSK.....	21
FIGURA 2.4: ADICIÓN DEL PREFIJO CÍCLICO EN DOS SÍMBOLOS OFDM	22
FIGURA 2.5: COMUNICACIÓN MULTITRAYECTO DE UNA MISMA SEÑAL ENTRE EL TRANSMISOR Y RECEPTOR CON DIFERENTES TIEMPOS DE LLEGADA	22
FIGURA 2.6: DIAGRAMA DE COBERTURA BÁSICA D2D	23
FIGURA 2.7: ESCENARIOS D2D DE LTE.....	25
FIGURA 2.8: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MÉTODO DE SOBRE MUESTREO	26
FIGURA 2.9: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MÉTODO DE RE MUESTREO	26
FIGURA 2.10: CONSTELACIÓN QPSK SIN DISTORSIÓN	27
FIGURA 2.11: CONSTELACIÓN QPSK CON ERROR DE SINCRONISMO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 2.12: ESTRUCTURA DE LA TRAMA DE DATOS	27
FIGURA 2.13: ILUSTRACIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA DE PORTADORAS	28
FIGURA 2.14: TIPOS DE ESCENARIOS EN LA RED DEVICE TO DEVICE	29
FIGURA 2.15: DESCRIPCIÓN DE UNA CONFIGURACIÓN DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE	30
FIGURA 2.16: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL USRP	31
FIGURA 2.17: PANEL FRONTAL Y DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SOFTWARE LABVIEW	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 2.18: CONEXIÓN FÍSICA ENTRE EL HOST Y EL EQUIPO NI – USRP 2921.....	32
FIGURA 3.1: DIAGRAMA DE TRANSMISIÓN MEDIANTE EL CANAL	35
FIGURA 3.2: DIAGRAMA DE BLOQUES DE TRANSMISOR	35
FIGURA 3.3: DIAGRAMA DE BLOQUE DEL RECEPTOR	37
FIGURA 3.4: DIAGRAMA DE BLOQUE DEL ESCENARIO DE COBERTURA TOTAL.....	37
FIGURA 3.5: DIAGRAMA DE COMUNICACIÓN ENTRE USRP1 Y USRP2 DEL VI TX-RX Y RX- TX	39
FIGURA 3.6: ESQUEMA GENERAL DE LA TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN SECUENCIAL ENTRE 3 EQUIPOS	40
FIGURA 3.7: DIAGRAMA DE BOQUE DEL ALGORITMO DE MÁXIMA ENERGÍA	44
FIGURA 3.8: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALGORITMO DE MOOSE	45
FIGURA 3.9: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALGORITMO DE MOOSE	47
FIGURA 4.1: CONEXIÓN FÍSICA DE COMUNICACIÓN D2D DE FORMA PARCIAL	49
FIGURA 4.2: CONEXIONES FÍSICAS DEL SEGUNDO ESCENARIO	50
FIGURA 4.3: PARÁMETROS DE MODULACIÓN	52
FIGURA 4.4: PARÁMETROS OFDM.....	53
FIGURA 4.5: PARÁMETROS DE CANAL.....	53
FIGURA 4.6: PARÁMETROS DEL EQUIPO	54

FIGURA 4.7: PARÁMETROS DEL HARDWARE	58
FIGURA 4.8: PARÁMETROS DE MODULACIÓN	56
FIGURA 4.9: PARÁMETROS OFDM.....	57
FIGURA 4.10: CONSTELACIÓN OBTENIDA POR USRP1 (TX – RX) SIN SINCRONIZACIÓN DE TRAMA	59
FIGURA 4.11: CONSTELACIÓN OBTENIDA POR USRP2 (RX – TX) SIN SINCRONIZACIÓN DE TRAMA	60
FIGURA 4.12: CONSTELACION PRODUCIDA POR EL USRP1 (TX-RX) APLICANDO METODO DE SINCRONIZACION DE TRAMA.....	61
FIGURA 4.13: CONSTELACION PRODUCIDA POR EL USRP2 (RX-TX) APLICANDO METODO DE SINCRONIZACION DE TRAMA.....	61
FIGURA 4.14: CONSTELACION GENERADA POR EL USRP1 (TX-RX) SIN APLICAR ALGORITMO DE MOOSE	62
FIGURA 4.15: CONSTELACION GENERADA POR EL USRP2 (RX-TX) SIN APLICAR ALGORITMO DE MOOSE	63
FIGURA 4.16: CONSTELACION GENERADA POR EL USRP1 (TX-RX) APLICANDO ALGORITMO DE MOOSE	63
FIGURA 4.17: CONSTELACION GENERADA POR EL USRP1 (RX-TX) APLICANDO ALGORITMO DE MOOSE	64
FIGURA 4.18: DIAGRAMA DE OJO PRODUCIDA POR EL USRP1 (TX –RX) SIN APLICAR MOOSE	64
FIGURA 4.19: DIAGRAMA DE OJO PRODUCIDA POR EL USRP2 (TX –RX) SIN APLICAR MOOSE	64
FIGURA 4.20: DIAGRAMA DE OJO CON CORRECTOR DE FRECUENCIA EN EL USRP1 (TX-RX)	64
FIGURA 4.21: DIAGRAMA DE OJO CON CORRECTOR DE FRECUENCIA EN EL USRP2 (RX-TX)	64
FIGURA 4.22: GRAFICA DEL TIME OFFSET EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	64
FIGURA 4.23: VALOR OBTENIDO DEL SYMBOL RATE	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 4.24: VALOR OBTENIDO DEL OFFSET EN COBERTURA TOTAL EN LA RED D2D.....	65
FIGURA 4.25: RESULTADO DEL BIT ERROR RATE EN LA COBERTURA TOTAL	66
FIGURA 4.26: MEDICIONES OBTENIDAS DEL CANAL.....	66
FIGURA 4.27: GRAFICA DE $\tau k(n + 1)$ CON RESPECTO AL NÚMERO DE ITERACIONES	67
FIGURA 4.28: GRÁFICA RMSE CON RESPECTO AL NÚMERO DE ITERACIONES.....	67

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: PARÁMETROS GENERALES DE LA RED LTE [37].....	75
TABLA 2: BANDAS E -ULTRA OPERATIVOS [37].....	77

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años se ha producido una gran evolución de las redes de comunicación, observándose que la mayoría de estas, debido a la baja calidad en cuanto a la modulación digital, tienen limitaciones al momento de transmitir la información generando problemas por el aumento de densidad de nodos, colisión y los consiguientes valores de retardos en la recepción [1].

Ante este escenario, las redes de cuarta generación al momento de adicionar la tecnología LTE ha permitido lograr un alto rendimiento al momento de enrutar el tráfico a través de la estación base, mediante la implementación de la tecnología denominada dispositivo a dispositivo (Device to Device sus siglas en inglés D2D, propuesta por el centro de competencias móviles también llamado equipo de apoyo 3GPP [2].

El desarrollo de la telefonía celular se ha basado en los estándar GSM, que usa la tecnología TDMA, con una velocidad de hasta 9.6 kbps; posteriormente evolucionó al GPRS que alcanza velocidades de hasta 56 kbps, luego se desarrolló la tecnología EDGE, dando paso al comienzo de una tercera generación UMTS, usando tecnología WCDMA que posee una velocidad de hasta 384 kbps.

La tercera generación fue mejorando los enlaces descendentes y ascendentes, siendo estos nuevos avances denominados HSDPA y HSUPA, que permiten velocidades de 14 Mbps y 5.7Mbps respectivamente; la tecnología HSPA+ brinda un mejor ancho de banda a los usuarios, siendo estos los nuevos avances de la generación 3.5. Con la cuarta generación de la telefonía móvil denominada LTE, se logra velocidades superiores a los 100 Mbps, con menor latencia y un gran ancho de banda [6]. En la figura 1.1 se aprecia la evolución

de las tecnologías anteriormente descritas.

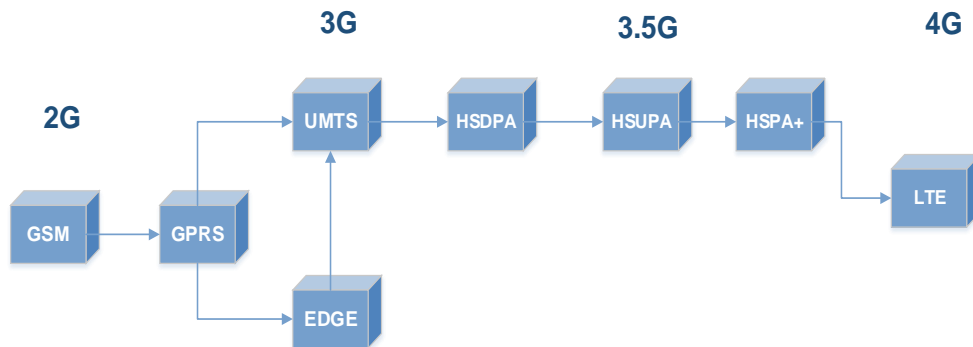


Figura 0.1: Evolución de Tecnologías Móviles

En Ecuador, de acuerdo con datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), en el año 2016 se registró un incremento del 31,6 % de personas que tienen al menos un celular activado, con respecto al año 2011, observándose que existe una gran demanda de la telefonía móvil, [3] (ver figura 1.2). Ante la necesidad de satisfacer la demanda en cuanto a cobertura y velocidad, se motivó a implementar la migración a la tecnología 4G, pensando en un futuro próximo desarrollar la tecnología 5G.

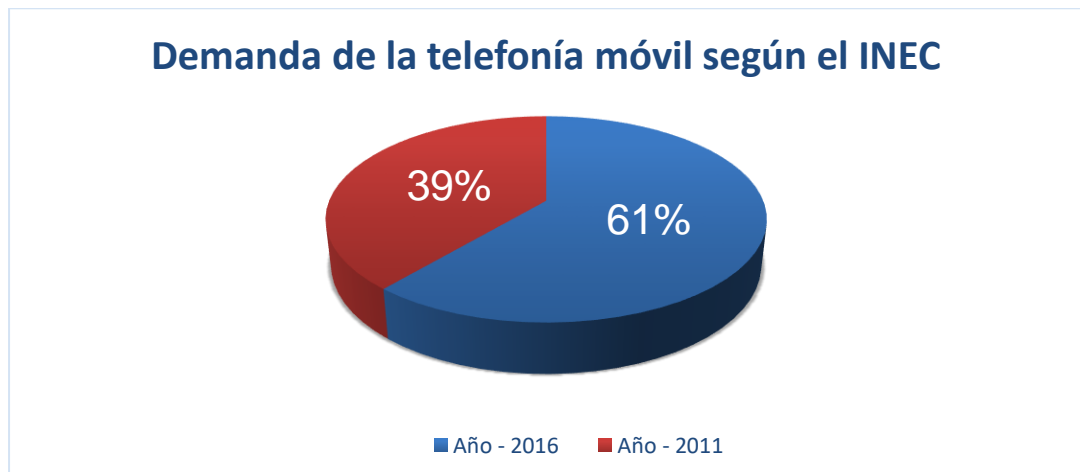


Figura 0.2: Demanda de la telefonía móvil

Se ha realizado estudios en donde se analizan los diferentes protocolos de comunicación o emparejamiento entre dispositivos sin necesidad de pasar por

una estación base, considerando la seguridad de la red y la viabilidad al utilizar una comunicación D2D [7].

Entre las ventajas que presenta la comunicación D2D tenemos una mayor eficacia espectral y un retraso reducido; mientras que se observa como desventaja el poco control de la interferencia, así como también la limitación de que los dispositivos a utilizarse deben tener la misma interfaz de radio en el escenario fuera de banda. [8].

Para garantizar una comunicación de dispositivo a dispositivo de manera eficiente dentro de una red, es necesario tener en cuenta que exista la sincronización de tiempo y frecuencia de la portadora, haciendo el uso de algoritmos de sincronización como el de Moose, máxima energía, Slidding Correlator y el de consensus, que permiten realizar la superposición de todos los nodos de transmisión a un conjunto de temporización de referencia, que se usará para realizar la sincronización.

En el presente trabajo se efectúa la sincronización para comunicación D2D en una red LTE; para tal cometido se desarrolla dos modelos de pruebas implementados con equipos USRP 2921 y el software LabVIEW [4], de esta forma se emula dos escenarios de comunicación inalámbrica D2D para realizar el análisis del sincronismo de tiempo, trama, y frecuencia [5].

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Implementar un sistema de sincronización en una red D2D con parámetros LTE utilizando equipos USRP como una alternativa en la comunicación tradicional disminuyendo las congestiones en la red.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Describir los tipos de sincronización para D2D en la red LTE.
- ✓ Analizar dos escenarios para comunicación D2D con respecto a la cobertura de la red LTE.
- ✓ Implementar métodos de sincronización para comunicación D2D de tiempo, trama y frecuencia utilizando radio definido por software, empleando los parámetros de un sistema LTE.
- ✓ Evaluar el desempeño de los métodos de sincronización implementados.

1.2 Descripción del Proyecto

En el presente proyecto se realiza la implementación de la comunicación D2D en la red LTE, en dos escenarios, considerando los tipos de modulación, comunicación de dispositivo a dispositivo y software para sincronizar los equipos a utilizar.

La comunicación D2D es implementada inicialmente con el montaje de los equipos USRP de tal manera que la cobertura sea total, para lo cual un equipo transmite y la otra recepta. La información por enviar se modula con parámetros de la red LTE, mientras que la información receptada se analiza a través de un software para determinar el desfase que tiene con respecto a lo transmitido. De existir un desfase, se aplican métodos de sincronización a fin de minimizar el mismo, y encontrar el inicio de la trama y así proceder a recuperar la información transmitida. Después de esto, transcurrido un determinado tiempo, el equipo receptor realiza la función del transmisor. La figura 1.3 muestra el escenario descrito.

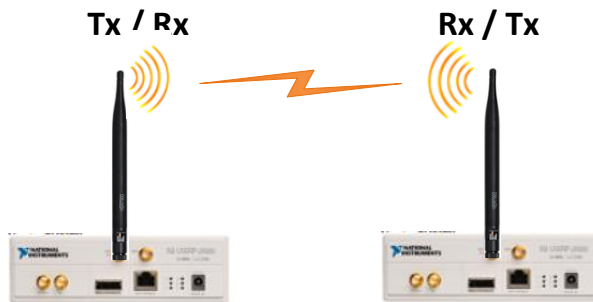


Figura 0.3: Escenario de Cobertura total

Posteriormente se efectúa otra implementación de la comunicación D2D usando tres equipos USRP de tal forma que exista una cobertura parcial, para lo cual dos equipos transmiten al mismo tiempo, cada uno con información diferente y el equipo restante lo recepta. Las informaciones que se van a enviar también son moduladas con parámetros LTE. La información receptada es analizada mediante el software con la finalidad de determinar el desfase obtenido aplicando un método de corrección de desfase en el tiempo. Este proceso se replica cuando, transcurrido un determinado tiempo los equipos cambian de funcionalidad de manera secuencial, de tal forma que haya un solo receptor en la red; es decir, se realiza tres veces la corrección de desfase logrando de esta manera determinar un valor de desplazamiento que permitirá sincronizar los equipos. La figura 1.4 muestra el escenario descrito.

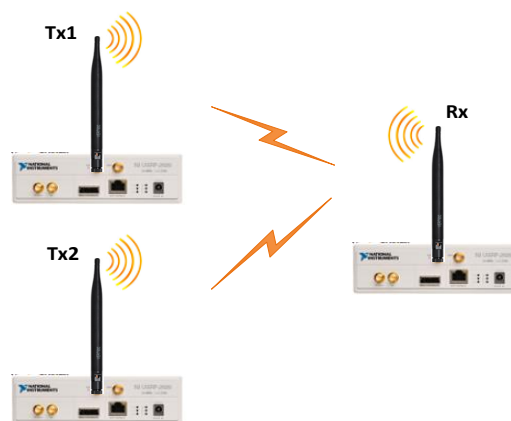


Figura 0.4: Escenario de Cobertura parcial

Adicionalmente, este proyecto consta de los siguientes capítulos, los cuales se describen brevemente:

- En el capítulo dos, se expone los conceptos fundamentales de la comunicación Device to Device (D2D), así como también los tipos de sincronización y modelos implementados aplicando los criterios y modulaciones de la red LTE. Además, se presenta un detalle del hardware NI-USRP 2921.
- En el capítulo tres, se realiza una descripción de la implementación de escenarios y métodos de sincronización para comunicación D2D empleando los parámetros de un sistema LTE. Se presenta una breve descripción de los métodos de sincronización implementados para medir el desplazamiento en tiempo y frecuencia de las técnicas.
- En el capítulo cuatro, se presenta los parámetros de diseños utilizados para los escenarios de comunicación D2D implementados con el Hardware NI-USRP 2921; se registra los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2

2. SINCRONIZACIÓN PARA COMUNICACIÓN D2D.

Para obtener una comunicación eficiente de dispositivo a dispositivo (D2D), ya sea con cobertura total, parcial o fuera de cobertura con respecto a la estación base, como se ilustra en la figura 2.1, es importante considerar la sincronización de tiempo, trama y frecuencia. De esta manera se logra incrementar la eficiencia espectral, reducir retardos en la transmisión y recepción de información, he incluso se podrá alcanzar altas velocidades.



Figura 2.1: Representación de comunicación D2D

A continuación, se exponen conceptos utilizados para el desarrollo del proyecto, así como tecnologías que se usa, técnicas de sincronización, modulaciones, equipos, software, que serán de gran ayuda al momento de realizar la emulación de la comunicación D2D en tiempo real.

2.1 La tecnología LTE

La tecnología de radio acceso de cuarta generación Long Term Evolution (evolución a largo plazo), que por sus siglas en inglés se conoce como LTE o 4G, se caracteriza por su alta capacidad de ancho de banda, con canales cuyo ancho de banda están entre 1.4MHz y 20MHz. Esta tecnología se basa en la arquitectura de red troncal Evolved Packet Core (EPC) [10], arquitectura plana de baja latencia que va entre 80 y 100 ms. A futuro se propone reducir la latencia a 10 ms a través de la tecnología 5G [11]. Todos los equipos físicos de las redes (troncal y acceso) que conforman la arquitectura de la red LTE utilizan la tecnología de red IP convencional [12].

La interfaz de comunicación móvil de las redes LTE utiliza dos mecanismos de duplexado basados en tiempo y frecuencia: FDD (Duplexado por división de frecuencia) para transmitir información ascendente y descendente de manera simultánea, empleando frecuencias diferentes; TDD (Duplexado por División de Tiempo) usando las mismas frecuencias para ambas transmisiones en diferentes tiempos, los que dependen de la cantidad de datos a transmitir [13].

2.1.1 Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM)

La modulación OFDM consiste en una multiplexación en frecuencia de diferentes portadoras, es una técnica en el cual se divide el flujo de símbolos que ingresan al modulador en n subflujos para los cuales le corresponden una subportadoras a cada uno, cada subportadora transporta una información modulada siendo una constelación QAM o QPSK, para que al momento de unirlos se forme la señal OFDM que se transmite en paso banda. [14]. La expresión matemática con la cual se puede expresar a la señal OFDM viene dada por la ecuación 1.1:

$$s(t) = \sum_{i=\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} d_i \exp \left[2\pi j \left(f_c + \frac{i}{T} \right) t \right] \quad (2.1)$$

En donde $s(t)$ es la señal OFDM en el dominio del tiempo, d_i es el símbolo con información, f_c es la frecuencia central y T es el período. La ortogonalidad entre portadoras permite un mejor aprovechamiento del ancho de banda y ayuda a reducir la interferencia entre símbolos [15]; la separación entre sub portadoras adyacentes Δf esta dado por (2.2):

$$\Delta f = \frac{1}{2T} \quad (2.2)$$

2.1.2 Modulación por desplazamiento de fase (QPSK)

La modulación QPSK se basa en el desplazamiento de fase cuaternaria, convirtiendo una cantidad de bits a símbolos, los cuales están ubicados en cada uno de los cuadrantes del plano cartesiano, por lo que la fase entre cada uno de ellos es de 90° . En la figura 2.2 se observa la constelación QPSK.

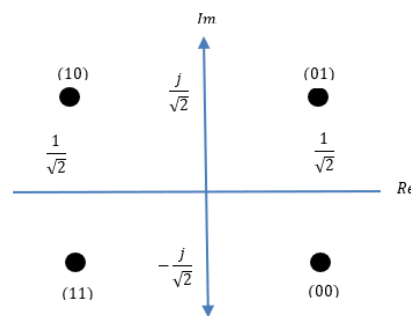


Figura 2.2: Constelación QPSK

La modulación QPSK se la puede representar mediante (2.3):

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos \left[2\pi f_c t + \frac{2\pi(i-1)}{M} \right], 0 < t < T_s, i = 1, 2, \dots, M \quad (2.3)$$

2.1.3 Prefijo Cíclico

El prefijo cíclico CP, es el intervalo de tiempo que se inserta entre los símbolos; durante ese tiempo se transmite una réplica de la parte final del símbolo del cual procede, con el fin de mantener el periodo cíclico del símbolo. En la figura 2.3 se muestra dos símbolos con sus partes útiles y los respectivos prefijos cíclicos, formándose de esta manera dos símbolos completos de OFDM.

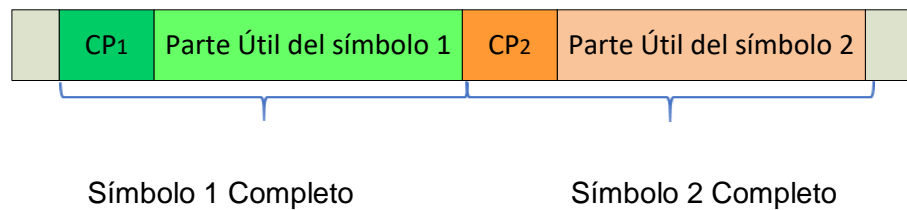


Figura 2.3: Adición del prefijo cíclico en dos símbolos OFDM

El tiempo de duración de un prefijo cíclico puede ser hasta el 25% de la duración de cada símbolo transmitido; si supera este límite, la tasa de error de bit (BER) disminuye y se produce un retardo en la señal [17]. La modulación OFDM utiliza el prefijo cíclico para que exista ortogonalidad entre portadoras y de esta manera poder evitar la interferencia entre símbolos (ISI) que se genera debido a la comunicación de multitrayecto como se ilustra en la figura 2.4, donde se observa los trayectos X, Y y Z en diferentes instantes de tiempo.

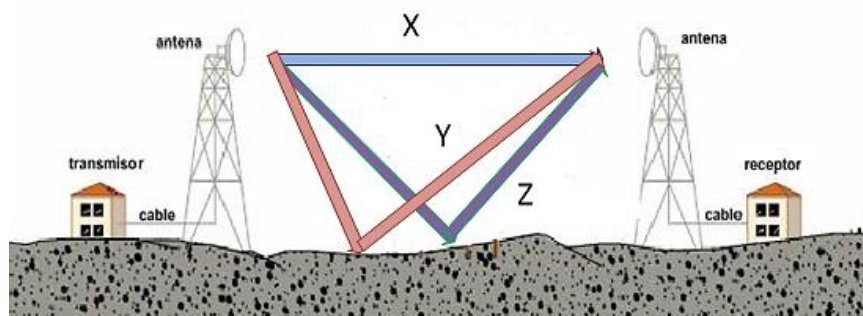


Figura 2.4: Comunicación multitrayecto de una misma señal entre el transmisor y receptor con diferentes tiempos de llegada

2.1.4 Parámetros de la red LTE

Para la implementación de los escenarios en este proyecto, adicional a los parámetros como prefijo cíclico, tonos nulos, se utilizan los siguientes parámetros OFDM: velocidad de transmisión 100Mbps, modulación de enlace descendente QPSK, rango de frecuencia de 2.4 GHz debido a que el equipo NI USRP 2921 opera a un rango de frecuencia de 2.4GHz. En las Tablas 1 y 2 del Anexo A se puede observar parámetros de la red LTE.

2.2 Device to Device (D2D)

La comunicación entre dispositivos (D2D) permite alcanzar altas velocidades de transmisión de datos, logrando el aumento de la eficiencia del canal de comunicación, evitando la congestión que presenta el tráfico, brindando mayor cobertura de la telefonía celular convencional, beneficiando de esta manera a los usuarios que no usan D2D. En la figura 2.5 se puede observar un diseño básico de una cobertura D2D [9].

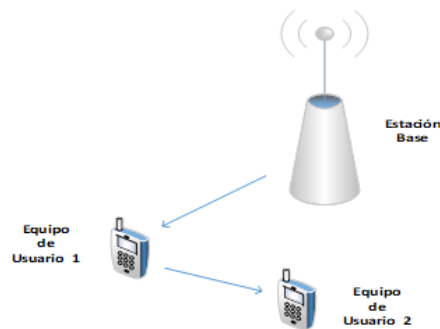


Figura 2.5: Diagrama de cobertura básica D2D

2.2.1 Sincronización

En telecomunicaciones, la sincronización es un proceso en el que se logra que todas las centrales digitales de una red trabajen con un reloj idéntica o lo más parecida posible tanto en frecuencia como en fase, de esta manera realizar el control de la tasa de transmisión y procesamiento de señales digitales en la red. La sincronización es necesaria para garantizar la buena calidad de la transmisión en la red.

Con el proceso de sincronización, todos los equipos de la red trabajan con una misma tasa promedio de datos, la misma que debe mantenerse aún de existir alguna variación en la topología de la red. En este proceso se realiza estimaciones de tiempo y frecuencia de portadora, para observar el inicio del símbolo dentro del prefijo cíclico y del desplazamiento de frecuencia de portadora con una precisión entre las subportadoras [18].

Las técnicas de sincronización se la pueden clasificar en tres categorías:

- 1. Sincronización en pulsos.** En la capa física se cumple la función de transmitir pulsos, sincronizando la frecuencia de los osciladores.
- 2. Sincronización en secuencia.** Las secuencias estructuradas permiten correlacionarse al momento de iniciar el símbolo o trama que se obtiene en el receptor.
- 3. Sincronización en marca de tiempo.** Al momento de sincronizar tiempo de reloj permite transmitir unidades de reloj.

2.2.2 Sincronización D2D

La sincronización D2D, ilustrada en la figura 2.6, puede llevarse a cabo entre varios equipos de usuarios, enlazados de forma parcial a una red, e incluso no necesariamente debe de estar dentro de la red; se lo hace mediante una consecución de sincronización de tiempo y frecuencia. En la sincronización, las redes utilizan una aplicación tipo maestro-esclavo, en donde los desplazamientos de tiempo (TO) y frecuencia de portadora (CFO) permiten que se sincronicen los nodos dependiendo de la señal maestra [21].

Se define dos niveles de sincronización:

- **Sincronización global,** Los equipos de usuario tienen que estar sincronizados en tiempo y frecuencia y cada uno debe minimizar el desplazamiento de los demás equipos de usuarios [20].

- **Sincronización local**, Los equipos de usuario reducen el desplazamiento de tiempo y el desplazamiento de frecuencia con respecto a los equipos de usuarios vecinos [20].

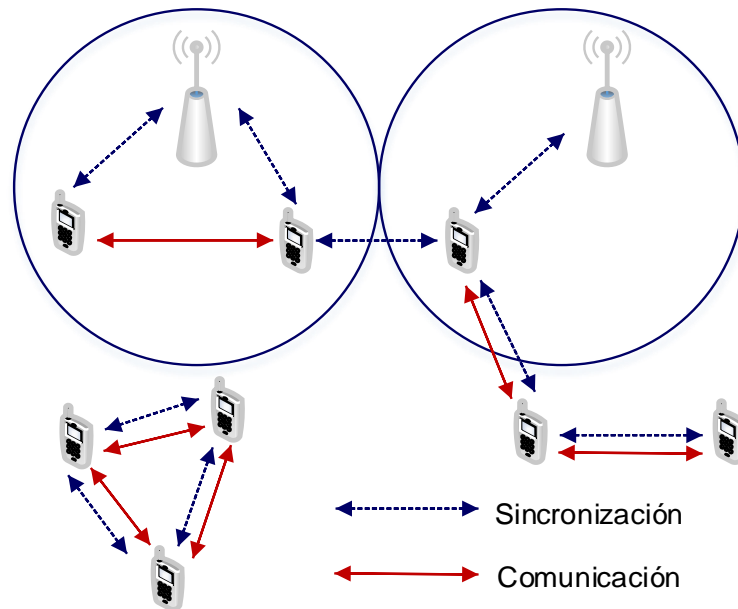


Figura 2.6: Sincronización de una red D2D

2.2.3 Desplazamiento de Tiempo (Time Offset):

El time offset o recuperación de tiempo es el tiempo desde que se empieza a procesar el paquete de control hasta cuando se envían los datos, el mismo que es necesario para compensar el tiempo que tarda en ser procesado el paquete de control o cabecera (paquete de ceros y secuencia de entrenamiento) [20]. Esta recuperación de tiempo es la sincronización de símbolos, la cual toma dos estrategias que depende de la conversión de continuo a discreto y se puede efectuar a una baja tasa de muestreo o una alta frecuencia de muestreo [22].

- **Método de sobre muestreo**. En la figura 2.7 se ilustra que el sobre muestreo se efectúa cuando M es grande, además el algoritmo de

sincronización escoge el múltiplo de T_s/M , e incrementa un retardo antes de reducir el muestreo [22].

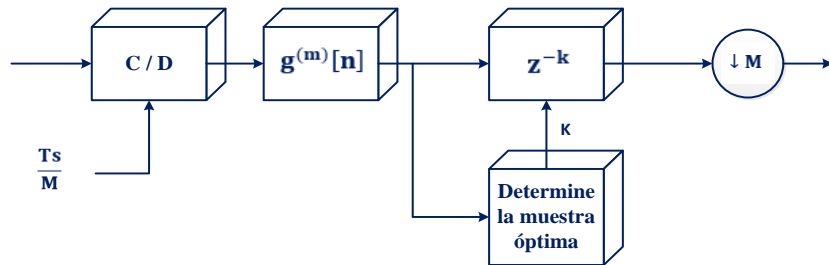


Figura 2.7: Método de Sobre muestreo

- **Método de re muestreo.** Para aplicar el método se utiliza un interpolador para diseñar una señal sobre muestreada que posea un periodo T_s/N de muestreo como podemos observar en la figura 2.8 [22].

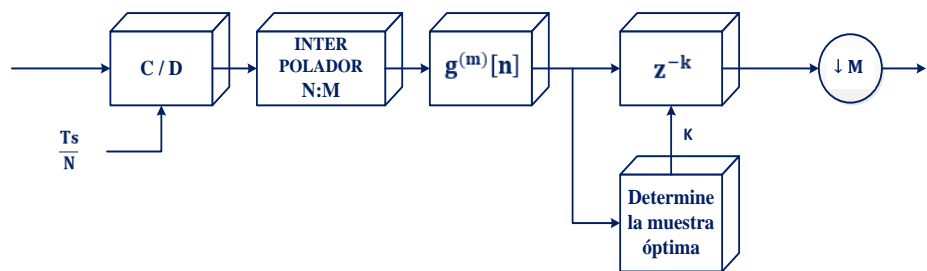


Figura 2.8: Método de re muestreo

2.2.4 Sincronización de tiempo

Aplicar este mecanismo es de gran importancia debido a los errores que se genera al momento de sincronizar una señal produciendo una rotación de las sub-portadoras, lo cual afectara la constelación. La figura 2.9 muestra la sincronización de símbolos mediante la constelación de una modulación QPSK [23].

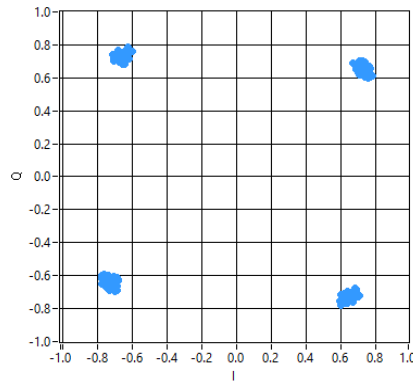


Figura 2.9: Constelación obtenida en LabVIEW

Cabe mencionar que, al momento de usar prefijos cíclicos entre símbolos, ayudará a contrarrestar la interferencia intersimbólica debido a la ortogonalidad entre portadoras, no obstante, si el offset (retardo o desplazamiento introducido por el canal) es mayor que la longitud del prefijo cíclico será inevitable combatir la interferencia entre símbolos generando una distorsión en la constelación [23].

2.2.5 Sincronización de trama

La sincronización de trama ayuda a evitar pérdida de información provocados por desfases de la señal, mediante la clasificación y dirección de los bits de una transmisión multiplex, separándolos en distintos grupos y dirigiéndolos a un canal de salida adecuado. Una trama de datos se basa en la secuencia de bits empaquetados que dependerán del tipo de sistema y transmisión que se quiere realizar. La figura 2.10 muestra la estructura de la trama OFDM [4].

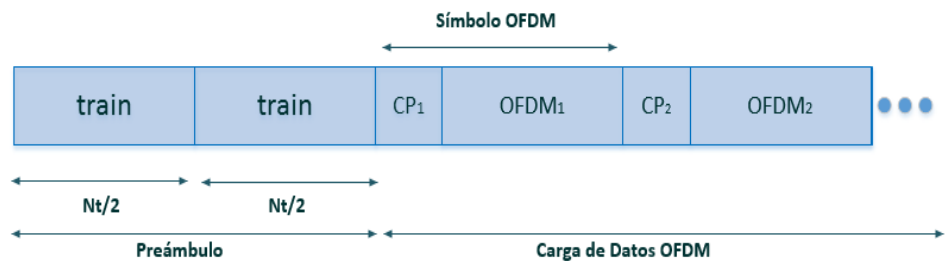


Figura 2.10: Estructura de la trama de datos OFDM

2.2.6 Sincronización de frecuencia

Antes de realizar una demodulación de una señal OFDM en el receptor, es necesario que exista una sincronización tanto de tiempo como de frecuencia tomando en cuenta la frecuencia de la portadora que está siendo transmitida, debido a que los sistemas OFDM son muy sensibles al CFO y al tiempo.

Si no ocurre la sincronización entre el oscilador local y la señal portadora contenida en la señal recibida, ocurrirá el CFO y habrá una diferencia entre las frecuencias de portadora que se generará en el receptor, esta diferencia se denomina desplazamiento de frecuencia, el cual viene dado por (2.10) [24].

$$f_{offset} = f_c - f'_c \quad (2.10)$$

Donde f_c es la frecuencia portadora en el transmisor y f'_c es la frecuencia portadora en el receptor. La figura 2.11 muestra un ejemplo del desplazamiento de frecuencia que es generada por no existir una sincronización entre las frecuencias de portadoras [24].

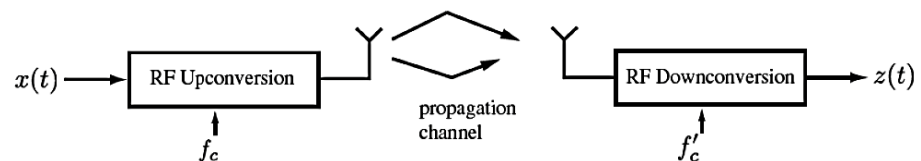


Figura 2.11: Ilustración de desplazamiento de frecuencia de portadoras

2.2.7 Secuencia de entrenamiento:

Las secuencias de entrenamiento son tramas de bits que son utilizadas para la sincronización y estimación del canal entre estas tenemos:

La secuencia Barker, llamados códigos de dispersión o pseudo-ruido; son tramas de bits de longitud finita que deben estar en el transmisor y receptor, poseen propiedades de auto correlación periódica. La serie

Barker se coloca al inicio de la trama de datos modulados que se enviará al canal. Las secuencias Willard ofrecen un mejor desempeño que la secuencia Barker, diferenciándose de esta debido a la combinación de 1's y 0's [25].

SECUENCIA DE ENTRENAMIENTO	LONGITUD DE CÓGIDO	SECUENCIA BINARIA
Barker	11	+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1
Willard	11	-1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1 +1 +1 +1

Tabla 1. Secuencias de entrenamiento

2.2.8 Tipos de Escenarios

De acuerdo con el grupo de investigación en el área de las telecomunicaciones (3GPP) [19], considerando la cobertura de red, los escenarios D2D fueron clasificados como Todo en cobertura, Cobertura parcial y Fuera de cobertura, lo que puede observarse en la figura 2.12.

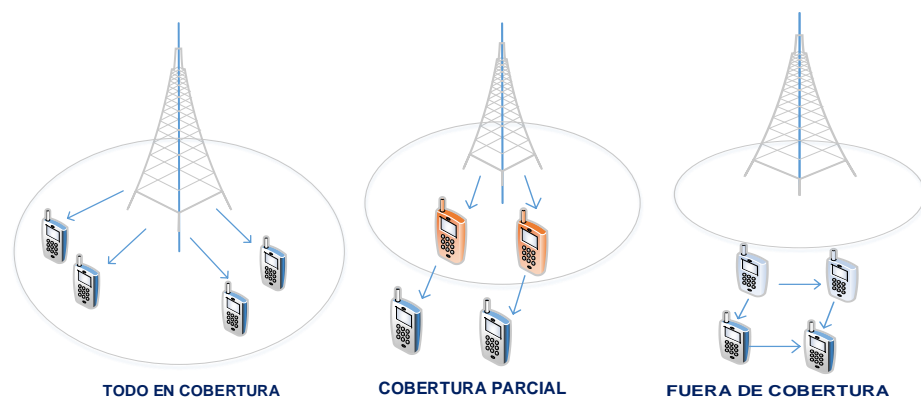


Figura 2.12: Tipos de Escenarios en la red D2D

- **Todo en cobertura.** - La cobertura es brindada por la estación base a todos los equipos de usuarios.

- **Cobertura parcial.** – Con una cierta cantidad de UE y estos a la vez cumplen el papel de un punto de acceso para otros UE. Se requiere esparcir su valor de reloj a los usuarios que están fuera de cobertura.
- **Fuera de cobertura.** - En este caso existe una comunicación D2D en su totalidad, y la principal función es alcanzar un valor de reloj igual en todos los equipos de usuario que están fuera de cobertura [19].

2.3 Radio definido por software (SDR)

Es una tecnología con avances en sistemas de procesamiento digital y computacional [26], en donde considera tanto al hardware como al software en la arquitectura de la red de comunicación [27]. Está formado por elementos como moduladores y demoduladores de señales, amplificadores, filtros digitales que mediante un software son programados [28]. Debido a que los SDR son reprogramables y son adaptables según la necesidad del usuario, e incluso pueden operar como USRP [29].

La Figura 2.13 muestra la estructura básica aplicando la tecnología SDR, realizando la conexión entre el software LabVIEW y el hardware NI USRP 2921 [28].



Figura 2.13: Descripción de una configuración de radio definido por software

2.3.1 Periférico Universal de Radio Software (USRP)

Es un sistema de radiocomunicaciones que trabaja con la tecnología SDR, el cual genera arquetipos inalámbricos, utilizando programas como LabVIEW, Matlab, GNU radio, etc [30].

En la figura 2.14 muestra la descripción de los dos niveles que se encuentra en la arquitectura interna de un periférico universal de software de radio USRP. [31]. Se observa que las tarjetas hijas se puede apreciar que se conectan a la tarjeta madre, teniendo como función principal transmitir y/o receptor en la señal banda base o señales de frecuencias intermedias IF hasta la banda de radio frecuencias RF [32].

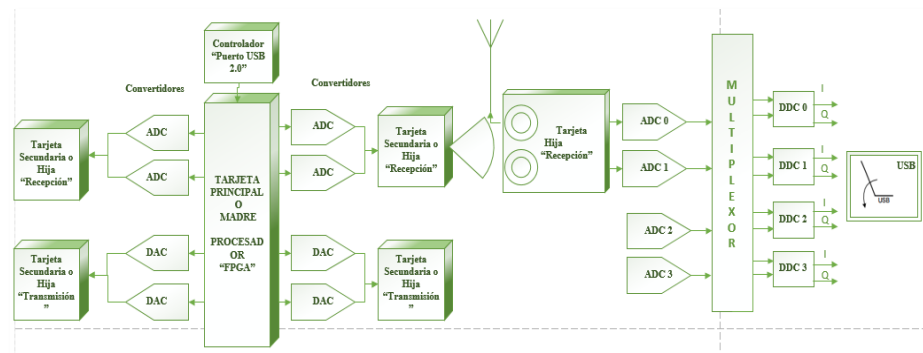


Figura 2.14: Diagrama de bloques del USRP

Son varios los avances tecnológicos que ha obtenido los sistemas USRP, teniendo varias aplicaciones enfocadas en radiofrecuencia, entre ellas tenemos: Red de telefonía móvil GSM, sistema de radares, transmisor y receptor de radio FM, radiodifusión de audio digital, redes de alta velocidad, estándar de televisión digital, entre otros [33].

2.3.2 NI USRP 2921

El equipo NI USRP 2921 fue diseñado por la empresa National Instruments, opera con un alto rango de frecuencias de hasta 20MHz de ancho de banda, siendo capaz de transmitir y recibir señales de RF; cuenta con una amplia gama de aplicaciones en radiofrecuencias y

comunicaciones inalámbricas. Permite diseñar, analizar e implementar arquetipos de algoritmos en tiempo real en las mismas bandas que 802.11a/b/g/n y ZigBee; dando paso al desarrollo en el ámbito de la educación [34] . En el anexo 2.1 se puede visualizar todas las características operacionales del NI USRP 2921.

LabVIEW es un software utilizado para controlar NI USRP y se enfoca en un lenguaje de programación gráfica y diseño de algoritmos de programación para analizar el procesamiento de señales digitales y de RF basados en mecanismos matemáticos. En la figura 2.15 se muestra la conexión física del computador con el hardware NI USRP 2921 mediante un enlace directo utilizando un cable Gigabit Ethernet 1/10[30].



Figura 2.15: Conexión física entre el host y el equipo NIUSRP 2921

CAPÍTULO 3

3. IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS DE SINCRONIZACIÓN EN UNA RED D2D.

La sincronización de equipos dentro de una red, ubicados espacialmente de forma remota, juega un papel muy importante en los servicios que se brindan, y se basa en la distribución de tiempo y frecuencia. Por tanto, se hace necesario conocer el funcionamiento de los equipos, los parámetros a utilizar, la programación en el software LabVIEW, la implementación de algoritmos usados para la sincronización, así como la arquitectura de los escenarios propuestos.

En este capítulo se muestra los mecanismos usados para desarrollar la emulación en tiempo real de una comunicación D2D en una red LTE. En la red D2D considerada en este proyecto, se implementó mecanismos de sincronización para la trama del paquete, el tiempo y la frecuencia, los mismos que son descritos a continuación.

3.1 Implementación de escenarios

La implementación de la comunicación D2D en una red LTE se efectuó mediante dos escenarios utilizando NI-USRP 2921. Por efecto didáctico y de ayuda en el desarrollo del proyecto, se plantea a continuación los diagramas de bloque de cada escenario, tanto del transmisor como del receptor.

Para lograr los objetivos planteados en este proyecto, es necesario implementar la tecnología OFDMA que es utilizada en los enlaces descendentes con el objetivo de contrarrestar la interferencia de multitrayecto en el canal de radio, dado que no necesita bandas de guarda y desarrolla operaciones de sincronización entre símbolos, para que exista ortogonalidad en un mismo instante de tiempo para varios equipos de usuarios durante una comunicación D2D.

Transmisor:

Inicialmente la información a transmitir es modulada utilizando una modulación digital QPSK mediante sinusoidales en el tiempo discreto. Luego se procede a agregar la secuencia de entrenamiento Barker de tamaño 44 para realizar la sincronización de trama en la recepción. Con el fin de enviar la información a través de las N subportadoras, se realiza la conversión serial paralelo mediante la formación de una matriz donde cada columna define la i -ésima subportadora.

Posteriormente se inserta cuatro tonos nulos, uno en la primera subportadora y los tres restantes en la subportadora central, logrando de esta manera limitar el ancho de banda y eliminar la componente DC en el espectro transmitido; luego se procede a aplicar la transformada inversa de Fourier para poder transformar la señal del dominio de la frecuencia al tiempo. Después se agrega el prefijo cíclico de tamaño NT , en este proyecto se trabajó con una longitud 8, el cual permite evitar la interferencia Interportadora.

La ecuación 3.1 muestra la salida $w[n]$ que se genera antes de ingresar al proceso de upsampling.

$$w[n] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} s[m] e^{j2\pi \frac{m(n-L_c)}{N}} ; n = 0, \dots, N + L_c - 1 \quad (3.1)$$

Consecutivamente se realiza la conversión paralelo serial para efectuar el proceso de Upsampling, que se basa en insertar L-1 ceros a la derecha de cada símbolo de la trama, para de esta forma incrementar la tasa de muestreo y mitigar el efecto de aliasing y evitar errores de muestreo. Finalmente, la señal pasa por el filtro formador de pulsos con el objetivo de enviar la información por el canal inalámbrico, que se representa en (3.2).

$$y[n] = w[n] + h[n] \quad (3.2)$$

La figura 3.1 nos muestra la salida del transmisor $y[n]$, en donde $h[n]$ es el canal inalámbrico y $w[n]$ es la señal obtenida luego del proceso de upsampling, la cual es procesada por el canal inalámbrico, obteniendo así la señal de salida $y[n]$.

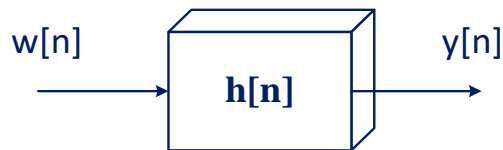


Figura 3.1: Diagrama de transmisión mediante el canal

La figura 3.2 nos muestra una representación gráfica mediante bloques de la transmisión para los dos escenarios implementados en LabVIEW.

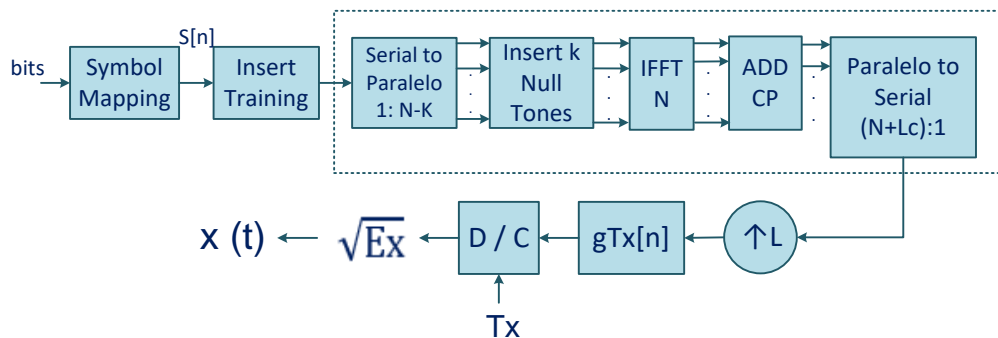


Figura 3.2: Diagrama de Bloques del transmisor

Receptor

Una vez transmitida la señal por el medio inalámbrico, la antena receptora capta esta señal y es ingresada al filtro de acoplamiento que se encarga de transformar los pulsos en una señal continua, para posteriormente realizar el sincronismo de tiempo aplicando el método de Máxima energía, el cual permite estimar retrasos del canal que están dentro del tiempo de símbolo de la señal.

Luego se procede a retirar las $M - 1$ muestras de cada símbolo agregado en el transmisor, para así tener el Downsampling en el receptor y tener la señal original que fue ingresada en el proceso de transmisión, dando como resultado $y[n]$ en (3.3):

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \left(\sum_{l=0}^L h[l] e^{-j2\pi \frac{ml}{N}} \right) s[m] e^{-j2\pi \frac{mn}{N}} + v[n] \quad (3.3)$$

Luego se procede a realizar el sincronismo de trama y frecuencia basado en el algoritmo de Correlator y el de Moose, respectivamente.

Posteriormente se extrae la secuencia de entrenamiento para así poder estimar los coeficientes del canal, y simultáneamente se realiza la conversión serial paralelo de la señal $y[n]$, y está a la vez es ingresada a la transformada rápida de Fourier, logrando obtener una señal en el dominio de la frecuencia $Y[k]$ como se muestra en (3.4).

$$Y[k] = H[k] S[k] \quad (3.4)$$

Después se realiza la división de la respuesta de frecuencia según (3.5), lo que ayuda a ecualizar la señal obteniendo $S[k]$.

$$S[k] = \frac{Y[k]}{H[k]} \quad (3.5)$$

Finalmente, se remueven los tonos nulos que fueron ingresados en el transmisor y se procede a realizar la conversión paralelo serial, para de esta forma realizar la demodulación QPSK, lo que nos permite recuperar la información que se transmitió.

La figura 3.3 ilustra el diagrama de bloques descrito anteriormente, el cual es usado en ambos escenarios.

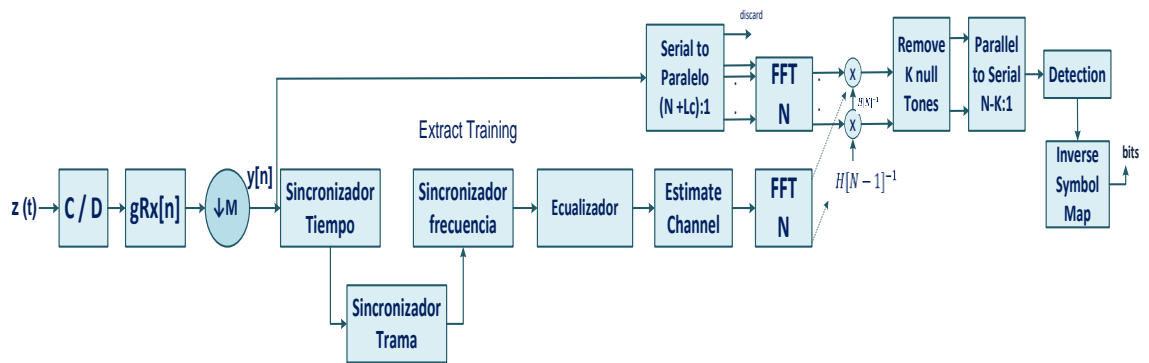


Figura 3.3: Diagrama de bloque del receptor

3.1.1 Primer Escenario (Cobertura total):

En este primer escenario se implementa la comunicación entre dos equipos USRP 2921, cada uno con la función de transmitir y recibir en diferentes instantes de tiempo. Dichos equipos cumplen con las propiedades necesarias para la implementación de una red LTE. La figura 3.4 nos muestra el diagrama en el cual se realiza la conexión de los equipos con el computador.

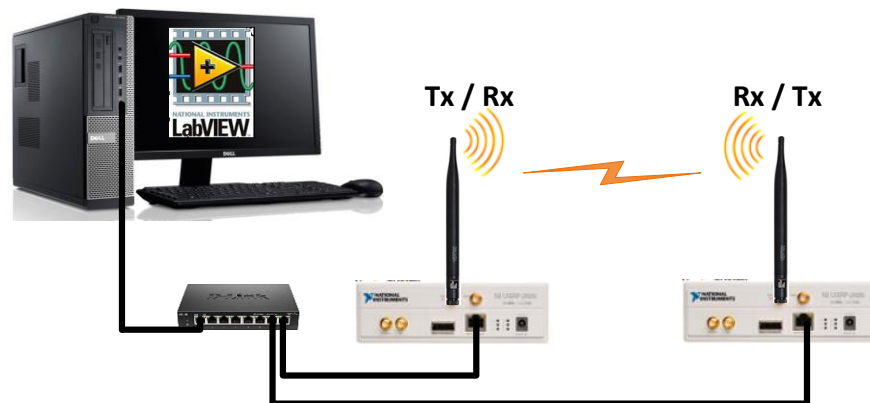


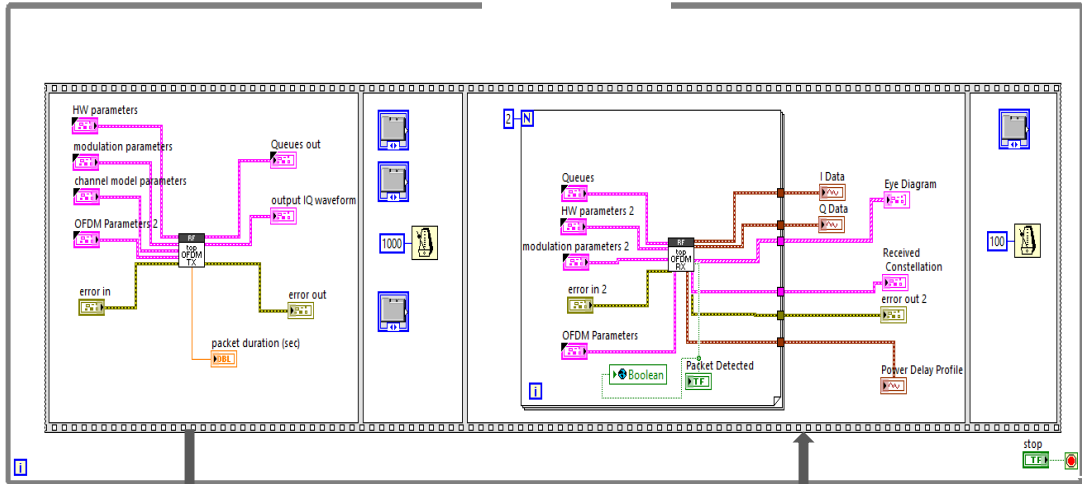
Figura 3.4: Diagrama de bloque del escenario de cobertura total

La implementación para este primer escenario se basa en una estructura secuencial, teniendo en cuenta que cada equipo USRP posee su propia

dirección IP y que cada uno tiene la función de transmitir y receptor, para así poder implementar la comunicación "Cobertura total". En la figura 3.5 se aprecia la programación grafica que se realizó en el diagrama de bloques del software LabVIEW.

La red de cobertura total consta de dos equipos USRP 2921, donde el primer USRP trabaja inicialmente como transmisor y el segundo USRP como receptor; una vez que el mensaje es enviado desde el primer equipo USRP hasta el segundo con éxito, ambos equipos reciben un retardo de 1000ms y 500ms para el primer y segundo equipo respectivamente, para de esta forma cada equipo se aliste para realizar la comunicación en el otro sentido, es decir, el segundo equipo USRP realiza la transmisión y el primer equipo recepta el paquete (receptor), y nuevamente se genere un retardo de 100 ms en el nuevo receptor. Esta secuencia se la realiza de forma continua hasta que el usuario presione el botón stop.

USRP 1



USRP 2

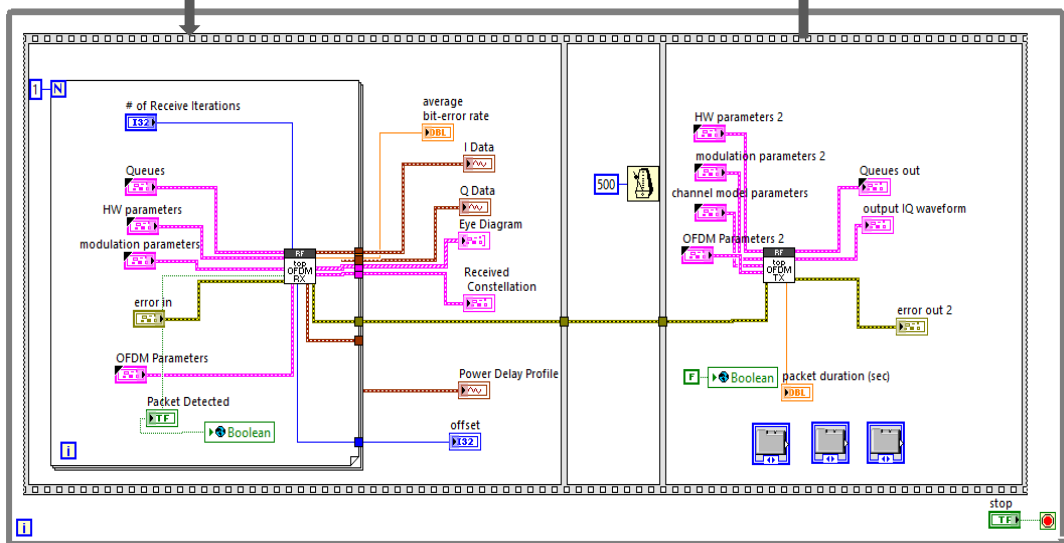


Figura 3.5: Diagrama de comunicación entre USRP1 y USRP2 del VI Tx-Rx y Rx- Tx

3.1.2 Segundo Escenario (Cobertura parcial):

En esta parte se realiza la implementación de la red formada por tres USRP; se desarrolla tres secuencias en dos VÍ's diferentes, teniendo en cuenta la función que cumple cada equipo. La figura 3.6 ilustra el esquema general de las secuencias del transmisor y receptor.

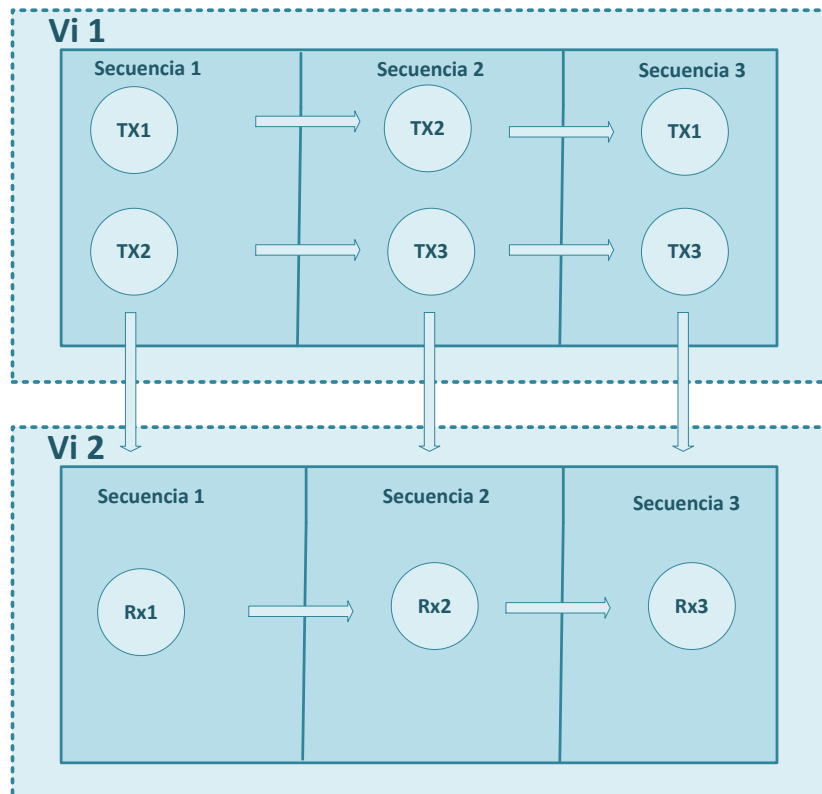


Figura 3.6: Esquema General de la transmisión y recepción secuencial entre 3 equipos

En el transmisor se envían dos tramas de información diferentes, donde cada trama contiene la secuencia de entrenamiento de tamaño 44 y un paquete de datos compuesto por 250 símbolos. En el instante que la información generada por los transmisores llega al receptor, se produce una colisión cuyo efecto es la superposición de las mismas. Esta situación es aprovechada para determinar el error de sincronización a través de la

correlación cruzada entre la señal recibida y la secuencia de entrenamiento, la cual se obtiene por (2.15).

El valor de la correlación es procesado por medio del software LabVIEW para obtener los valores de offset; este valor es el factor que multiplica a la ganancia para poder calcular el desfase entre los transmisores y el receptor, y corregir el mismo. Esta corrección se efectúa a través del software, el mismo que se aplica (3.17).

En el anexo D se presenta los Vís del escenario de cobertura parcial con sus respectivas secuencias. La primera secuencia consta de la transmisión del primer y segundo equipo USRP como se ilustra en la figura 3.7 a. La primera rotación de la funcionalidad de los equipos se la realiza en la segunda secuencia, en donde ahora los USRP dos y tres se encargan de realizar la transmisión como se ilustra en el literal b de la figura 3.7. Y la última secuencia consta en la transmisión del primer y tercer equipo USRP como se observa en la figura 3.7 c. Estas secuencias son realizadas con el fin de lograr la corrección del desfase aplicando el método de consensus que se produce en la transmisión de esta red, se ejecutan varias iteraciones hasta lograr que los valores corregidos converjan a un valor promedio inicial entre ambos.

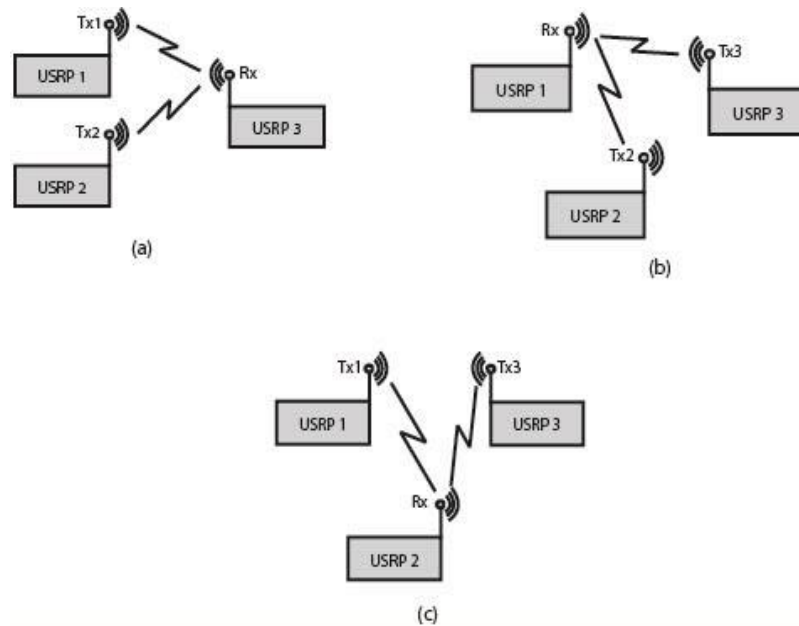


Figura 3.7: Ilustración de secuencias del segundo escenario: Cobertura parcial. a) USRP 1 y 2 transmisores b) USRP 2 y 3 transmisores c) USRP 1 y 3 transmisores

3.2 Métodos de sincronización

Al momento de realizar la implementación de la comunicación D2D, se usaron mecanismos de sincronización para la trama del paquete, el tiempo y la frecuencia.

Los cuales son:

- El algoritmo basado en la máxima energía, el cual permite sincronizar la trama cuando el retardo esta entre 0 y el T_s (tiempo de símbolo).
- El algoritmo de Slidding Correlator, que permite sincronizar la trama en caso de que los retardos sean múltiplos del tiempo de símbolo.
- El algoritmo de Moose que ayuda a corregir la frecuencia o también a corregir los desfases que se producen al momento de sincronizar los dispositivos.

3.2.1 Sincronizador de tiempo - Máxima energía

Es un algoritmo que se implementó en el software LabVIEW, de tal forma que nos permite realizar la sincronización de los equipos USRP y a su vez formar una red de comunicación D2D; este método será aplicado para el cálculo del desplazamiento de tiempo que existirá al inicio de la trama enviada al receptor. Por lo tanto, este mecanismo se enfoca en hallar un punto de muestra que permita que la energía promedio receptada tome el valor máximo se puede observar en (3.1).

$$J_{approx}[K] = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{p-1} |r(PMT + K)|^2 \quad (3.1)$$

En donde T es la división entre el factor de sobremuestreo ($M=20$) para la frecuencia de muestreo (que es 4MHz), obteniendo así un tiempo de símbolo de 5 microsegundos; r la señal transmitida que ingresa al receptor; K variará desde cero hasta el factor ($M-1$); P es el número de símbolos reales que se obtiene en (3.2), debido a que la señal llega sobremuestreada.

$$P = \frac{\# \text{ SIMBOLOS}}{\text{FACTOR DE SOBREMUESTREO}} \quad (3.2)$$

Una vez calculado el valor de $J_{approx}[k]$ que es valor de la energía recibida, se encuentra el retraso estimado, para luego obtener el porcentaje de desfase que tuvo la señal, es decir \hat{k} mediante (3.3).

$$\hat{k} = \text{máx } J_{approx}[k] \quad (3.3)$$

En la figura 3.8 podemos observar el diagrama de bloques del algoritmo de máxima energía implementado en el software LabVIEW, utilizado para encontrar el desplazamiento de tiempo.

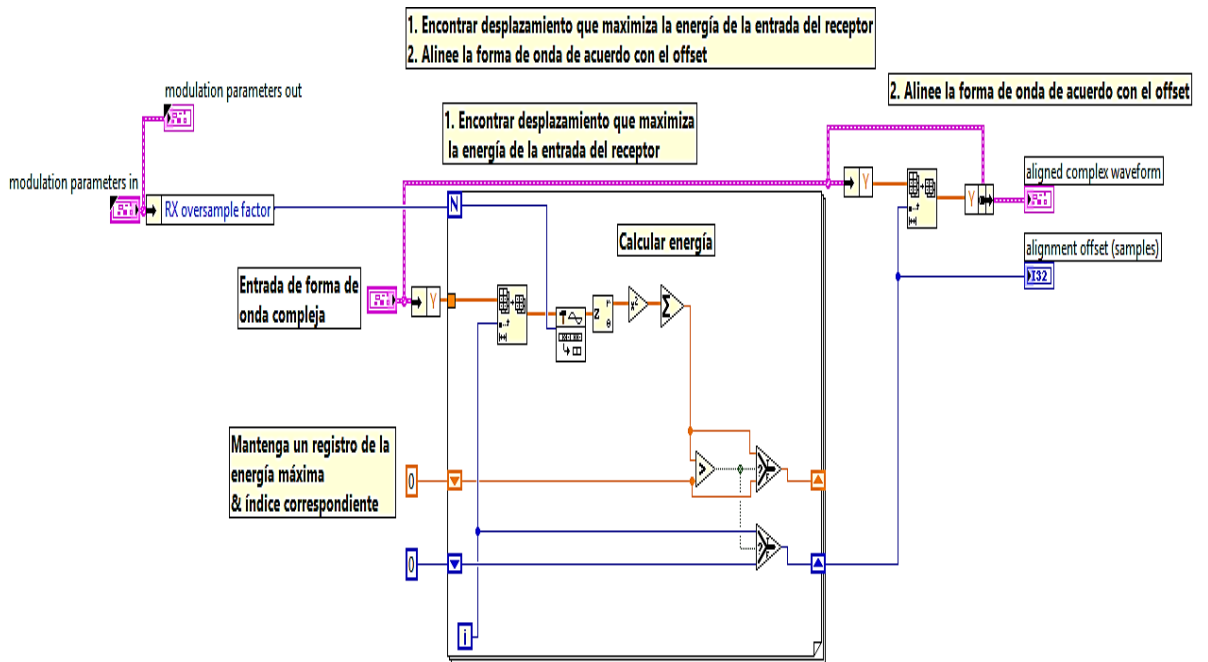


Figura 3.8: Diagrama de bloque del algoritmo de máxima energía

3.2.2 Sincronizador de trama - Sliding correlator

Es un algoritmo cuyo objetivo es crear un tiempo dilatado de correlación cruzada, para la obtención de la auto correlación de tiempo dilatado. El Sliding Correlator utiliza dos señales idénticas, donde una señal tiene un comportamiento más lento que la otra; la multiplicación de las dos señales idénticas nos da como resultado una aproximación de auto correlación de tiempo dilatado [35].

Este algoritmo se basa en correlacionar la secuencia de entrenamiento conjugada conocida por el receptor, con la señal transmitida $y[m]$ que llega a este. Asumiendo que $t^*[k]$ es la secuencia de entrenamiento modulada con un tamaño de secuencia de N_t , la operación se define en (3.4):

$$R[m] = \left| \sum_{k=0}^{N_t-1} t^*[k] y[m+k] \right|^2 \quad (3.4)$$

Una vez realizado la correlación de las dos señales, podemos encontrar el máximo valor de desplazamiento de trama a través de (3.5).

$$\hat{d} = \max R[m] \quad (3.5)$$

En donde \hat{d} es el desplazamiento de la trama y $R[m]$ es la correlación de dos señales. En la figura 3.9 podemos observar el diagrama de bloques del algoritmo de Sliding correlator, en el cual el objetivo es encontrar la estructura de la trama.

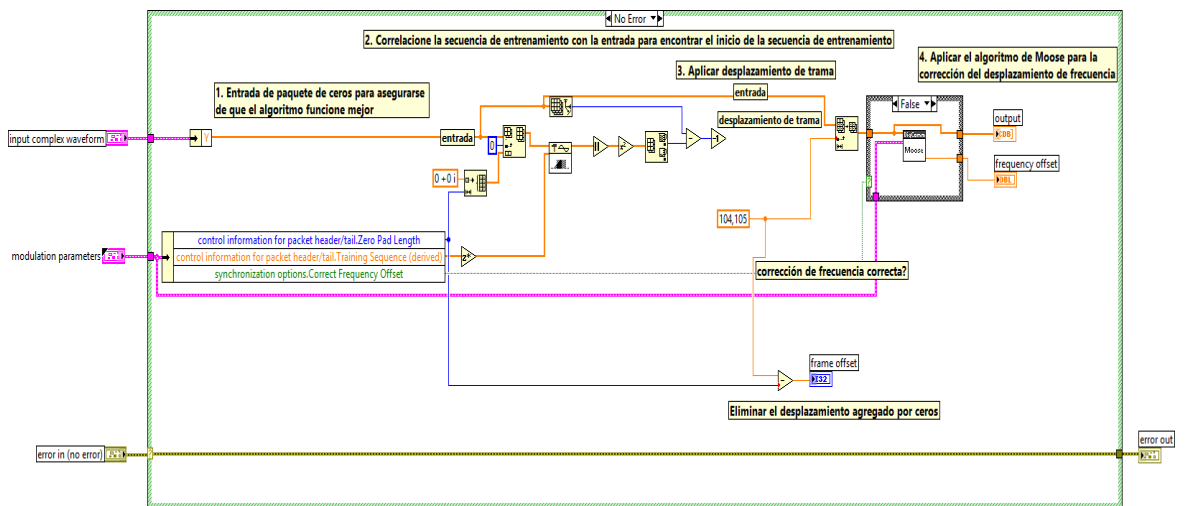


Figura 3.9: Diagrama de bloques del algoritmo de sliding correlator

3.2.3 Sincronizador de Frecuencia - Moose

El algoritmo de Moose está basado en corregir el desplazamiento producido en las frecuencias de portadora en la transmisión y recepción, este desfase se genera debido al efecto Doppler, producido por el movimiento relativo entre el transmisor, receptor y los osciladores de los equipos USRP.

Una vez que la información receptada pasó por el método de detección de trama, procedemos a corregir la fase reduciendo el desplazamiento de frecuencia aplicando la ecuación 3.12.

$$\hat{\epsilon} = \frac{\text{fase} \sum_{l=L}^{N_t-1} y[l + N_t]t^* [n]}{2\pi N_t} \quad (3.12)$$

En donde N_t es el tamaño de la secuencia de entrenamiento, l variará desde L que es tamaño de la trama hasta $(N_t - 1)$. A través de (3.13) se obtiene una frecuencia estimada, para luego calcular el valor del $\hat{\epsilon}$, el mismo que estimará la rotación de la constelación en (3.14).

$$\hat{f}_e = \frac{\text{fase} \sum_{l=L}^{N_t-1} y[l + N_t]t^* [n]}{2\pi T N_t} \quad (3.13)$$

$$\hat{\epsilon} = \hat{f}_e T \quad (3.14)$$

El valor del $\hat{\epsilon}$ permite determinar el desfase en la señal transmitida que ingresó al receptor, obteniendo una corrección en la señal mediante (3.15).

$$\bar{y}[n] = y[n]e^{-j2\pi\hat{\epsilon}n} \quad (3.15)$$

Donde $y[n]$ es la señal recibida, $\bar{y}[n]$ es la señal corregida y el desfase depende del valor de $\hat{\epsilon}$. En la figura 3.10 se observa el algoritmo implementado en el software LabVIEW [35].

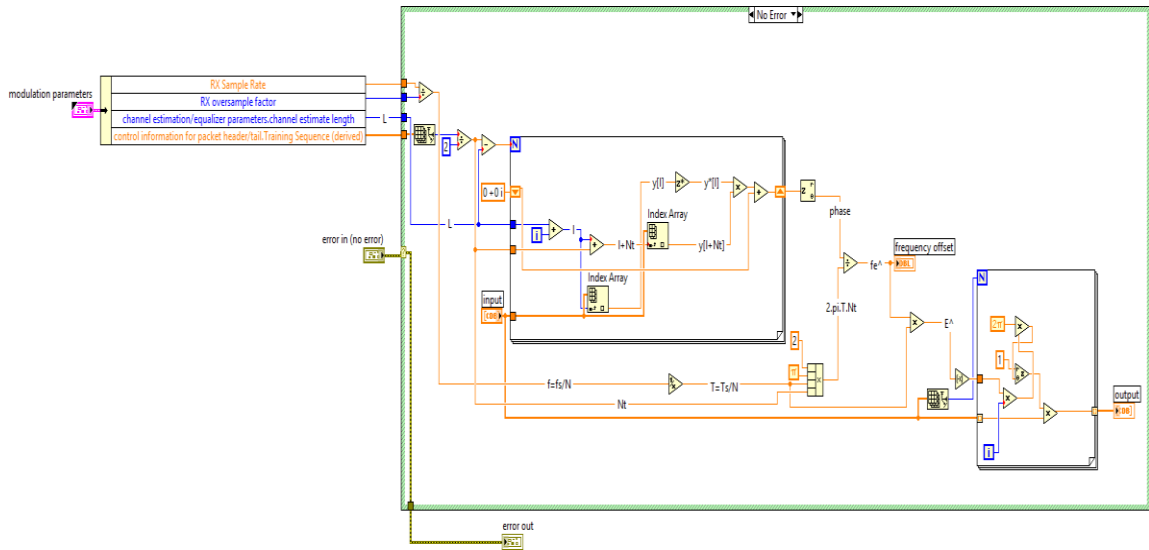


Figura 3.10: Diagrama de bloques del algoritmo de Moose

3.2.4 Algoritmo de consenso

Este algoritmo es implementado para corregir el error de sincronización en la red de cobertura parcial, en el cual todos los nodos de la red implementada llegan a un consenso a través de la comunicación D2D; el error de sincronización de tiempo $\Delta\tau_k[n]$ es obtenido mediante la diferencia entre el valor estimado \hat{a}_l y el valor τ_k de nodos transmisores que actúan como referencia, donde k es la cantidad de nodos existentes en la red, tal como se observa en (3.16).

$$\Delta\tau_k[n] = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\hat{a}_i - \tau_k) \quad (3.16)$$

El bucle de fase sincronizada distribuida (D-PLL) realiza el control iterativo para la sincronización común en cada nodo de la red, corrigiendo el TO de cada uno de ellos mediante el algoritmo de consenso que se lo ilustra en (3.17).

$$\tau_k[n + 1] = \tau_k[n] + \varepsilon \Delta \tau_k[n] \quad (3.17)$$

donde ε es la ganancia con valor de 0.1, el mismo que varía según la topología de la red y de las necesidades de convergencia. El análisis de convergencia se puede efectuar considerando la trayectoria del vector que contiene los desplazamientos de tiempo. En la figura 3.11 se muestra el diagrama de bloque del algoritmo descrito [36].

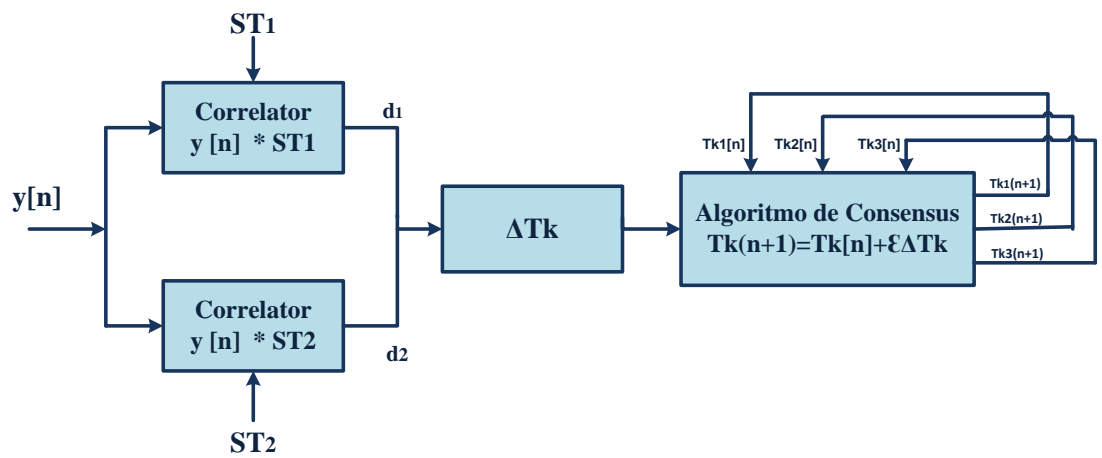


Figura 3.11: Diagrama de bloques del algoritmo de consenso

CAPÍTULO 4

4. ANALISIS Y RESULTADOS.

En este proyecto se implementó un sistema de comunicación D2D mediante tres equipos USRP 2921 y el software LabVIEW; se desarrolló dos escenarios representativos de la red D2D basado en el sincronismo.

En la figura 4.1 se ilustra el desarrollo del primer sistema, que consiste en la comunicación total dentro de la red D2D mediante dos equipos USRP y el software mencionado anteriormente. Se procedió a realizar varias pruebas de transmisión usando una modulación QPSK, una secuencia de entrenamiento de tamaño 44 símbolos y un paquete de información de 250 símbolos. Además, en el receptor se aplicó los algoritmos de sincronización mencionados en capítulos anteriores, con el objetivo de sincronizar la red de manera interna mediante el software LabVIEW y sin la utilización del cable MIMO, ya que el uso de este proporciona sincronizar los equipos sin errores producidos por el canal. Cabe mencionar que cada equipo posee la función de transmitir y recibir información en diferentes tiempos.

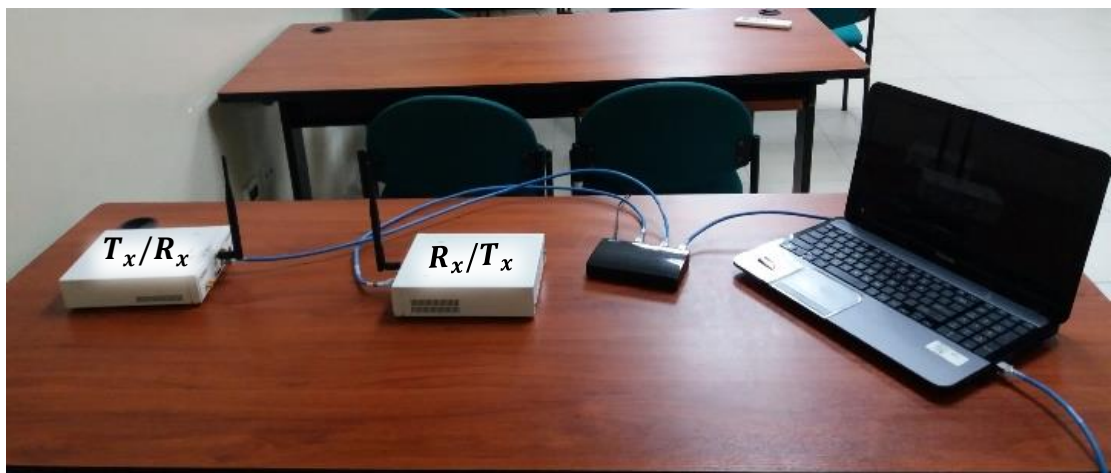


Figura 4.1: Conexión física de comunicación D2D de forma total

En el desarrollo del segundo sistema se implementó una comunicación parcial dentro de la red D2D, mediante tres equipos USRP 2921 y el software LabVIEW. La conexión física considera el uso de dos equipos transmisores y un equipo receptor como se muestra en la figura 4.2. Este escenario se basa en la transmisión de dos paquetes de datos de 250 símbolos, con dos secuencias de entrenamientos de 44 símbolos, utilizando una secuencia Barker y Willard con el fin de mejorar las propiedades de correlación para la sincronización, que serán enviadas simultáneamente al receptor, provocando una colisión que es aprovechada para determinar el desplazamiento de tiempo; este valor nos indica cuando se sincronizan los equipos, permitiendo encontrar en inicio de la trama.



Figura 4.2: Conexión física de comunicación D2D de forma total

4.1 Parámetros de diseño

Como se mencionó en capítulos anteriores, la comunicación de la red está formada por su parte transmisora y receptora, en el cual describiremos a continuación cada uno de los parámetros que se utilizó al momento de implementar la red D2D, es decir los valores a considerar para el desarrollo de cada escenario.

4.1.1 Parámetros de diseño del transmisor

A continuación, se describe los parámetros de diseño utilizados en el transmisor y las medidas empleadas, con el fin de simular una red LTE, así como las medidas del canal y del equipo USRP.

Parámetros de Modulación

En la figura 4.3 se ilustra los parámetros de modulación utilizados en la implementación de la red, los mismos que se describen a continuación:

- La cabecera de la trama, formada por un paquete de ceros de tamaño 8, el mismo que es un intervalo de guarda que evita datos basura durante la transmisión.
- Una secuencia de entrenamiento de Barker de tamaño 44 símbolos y una secuencia de Willard del mismo tamaño, a fin de mejorar las propiedades de correlación para la sincronización.
- Se usa un paquete de datos de 500 bits, que al ser modulado en QPSK se obtiene una longitud de 250 símbolos; dicho valor en conjunto con la secuencia de entrenamiento y los parámetros OFDM conforman la información total enviada al receptor.
- Se implemento un periodo de sincronización de 5 microsegundos, este valor se determinó mediante la división entre el oversample factor que es de 20 para el sample rate que es de 4MHz.

- Para generar el filtro formador de pulsos se emplea una modulación de PSK, para lo cual se implementó mediante la raíz del coseno elevado, con un filtro de tamaño de 8 símbolos y magnitud de 0.5.

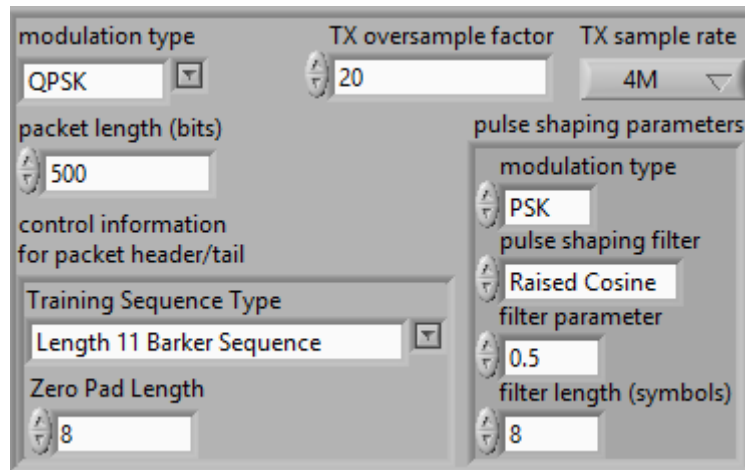


Figura 4.3: Parámetros de modulación del transmisor

Parámetros OFDM

Para la implementación de red D2D utilizando la tecnología LTE, se configuraron los siguientes parámetros OFDM como se muestra en la figura 4.4.

- Se agregó un prefijo cíclico CP de tamaño 8, que permite la ecualización digital en el dominio de la frecuencia. Este valor CP se inserta entre los símbolos como un intervalo de tiempo. Durante ese tiempo se transmite una réplica de la parte final del símbolo con el fin de mantener el periodo cíclico.
- El tamaño de la secuencia de entrenamiento FFT y el tamaño de la transformada de Fourier es igual a 64, debido a que es el número de subportadoras utilizadas para la implementación.
- La longitud del prefijo cíclico de la secuencia de entrenamiento es de 8, el mismo que permitirá evitar interferencia interportadora.
- Se insertó 4 tonos nulos: en la primera subportadora se coloca un tono nulo en la posición 0; los tres restantes en las posiciones 30, 31 y 32

de la subportadora central. Con lo cual se limita el ancho de banda y se elimina la componente DC en el espectro transmitido.

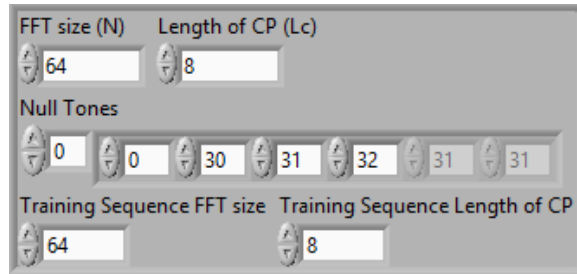


Figura 4.4: Parámetros OFDM del transmisor

Parámetros del Canal

En estos parámetros escogemos exclusivamente el canal que se utilizara, es decir el canal AWGN y una potencia de ruido infinita, como se muestra en la figura 4.5. En este caso no se aplican valores de retardo ni desplazamientos de frecuencia.

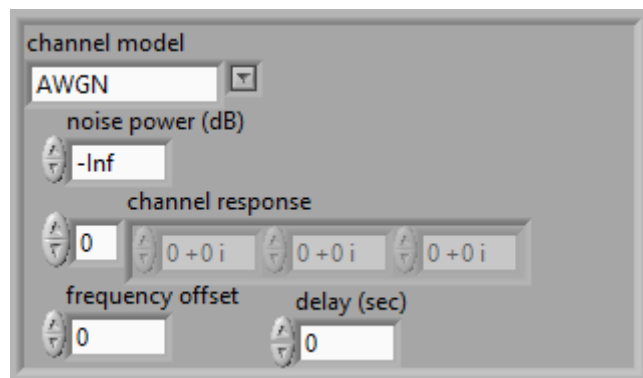


Figura 4.5: Parámetros de canal de transmisión

Parámetros del Hardware

Para una correcta utilización de los equipos USRP 2921, se los debe configurar con los siguientes parámetros, mostrados en la figura 4.6:

- La dirección IP es uno de los parámetros fundamentales para identificar al USRP en el computador.
- Identificación del puerto (Tx1) donde será conectada la antena del equipo.

- Se ingresó una frecuencia de operación de 2.45 GHz, frecuencia en la que opera el USRP 2921; simultáneamente permite emular la frecuencia de operación de una red LTE.
- La ganancia de las antenas es de 20 dB, el mismo que dependerá del alcance que se quiere tener entre equipos.
- El modo en el que se genera la transmisión es de forma continua para evitar la interrupción en el transmisor.

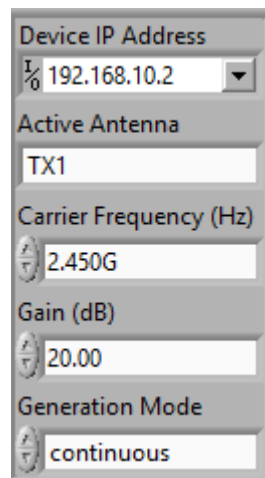


Figura 4.6: Parámetros de los equipos transmisores

4.1.2 Parámetros de diseño del Receptor

Se describe los parámetros de diseño necesarios para el correcto funcionamiento del receptor, como los valores utilizados para el desempeño de los equipos, modulación utilizada, parámetros utilizados para representar la tecnología LTE.

Parámetros de Modulación

En la figura 4.7 se visualiza los parámetros de modulación utilizados en la implementación del receptor, descritos a continuación:

- En la cabecera de la trama se utilizó un paquete de ceros de tamaño 8.
- Una secuencia de entrenamiento de Barker de tamaño 44 símbolos y una secuencia de Willard del mismo tamaño, con el objetivo de mejorar las propiedades de correlación para la sincronización.

- Se utiliza un paquete de 250 símbolos, donde al receptor le llega la trama con datos basura que son producidos por efectos del canal, ruido, los mismos que representan desplazamiento de frecuencia y tiempo.
- Se implementó un período de sincronización de 5 microsegundos; este valor se determinó mediante la división entre el Oversample factor que es de 20 para el Sample rate que es de 4MHz.
- Para generar el filtro formador de pulsos, se emplea una modulación de PSK, obtenida mediante la raíz del coseno elevado, con un filtro de tamaño de 8 símbolos y magnitud de 0.5.

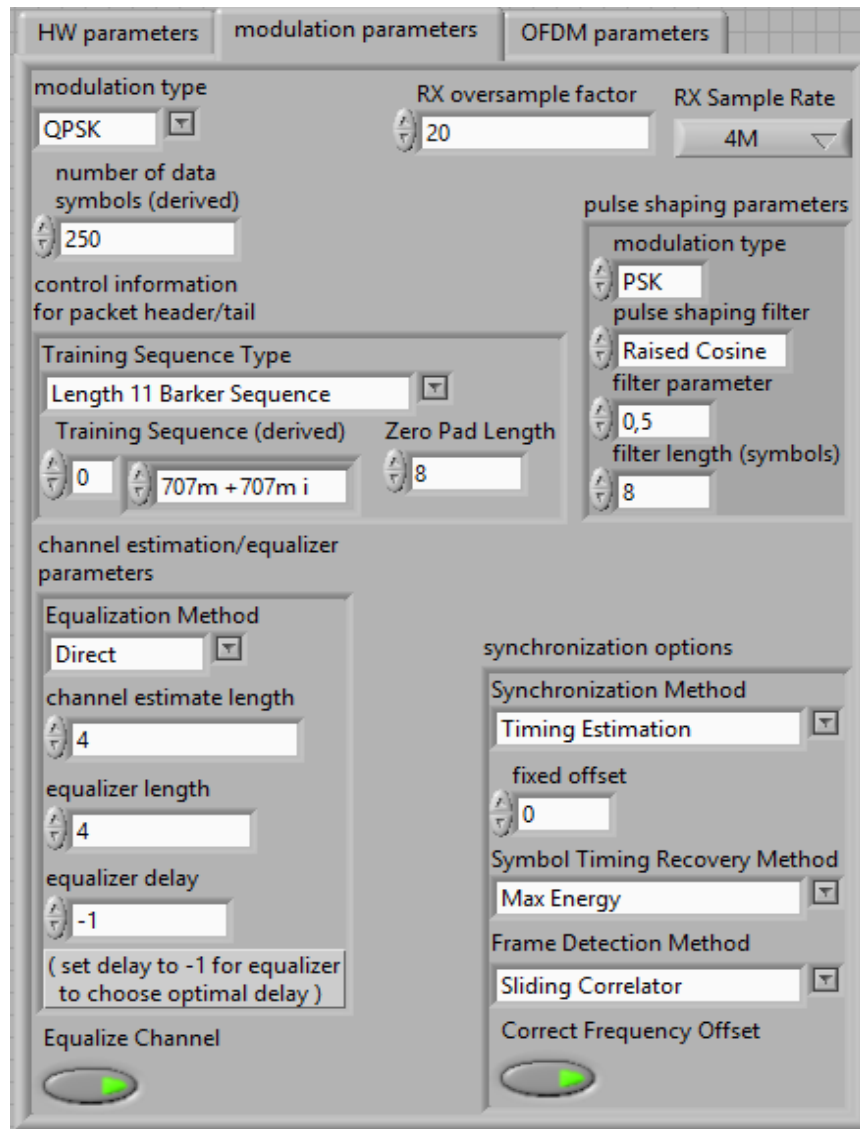


Figura 4.7: Parámetros de modulación del receptor

Parámetros OFDM

Los parámetros aplicados en el transmisor y un receptor de la red D2D, son los mismos parámetros de la tecnología LTE, descritos a continuación:

- Se agrega un prefijo cíclico CP de tamaño 8; es el intervalo de tiempo que se inserta entre los símbolos; durante ese tiempo se transmite una réplica con el fin de mantener el periodo cíclico del símbolo.

- El tamaño de la secuencia de entrenamiento FFT y el tamaño de la transformada de Fourier igual a 64, debido a que se utiliza 64 subportadoras.
- La longitud del prefijo cíclico de la secuencia de entrenamiento es de 8.
- Se insertó 4 tonos nulos: en la primera subportadora se coloca un tono nulo en la posición 0; los tres restantes en las posiciones 30, 31 y 32 de la subportadora central. Con lo cual se limita el ancho de banda y se elimina la componente DC en el espectro transmitido.

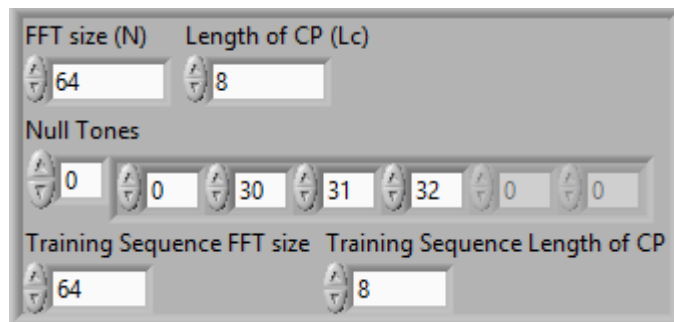


Figura 4.8: Parámetros OFDM de la recepción

Parámetros del hardware

Estos parámetros permiten definir las características del equipo NI – USRP 2921.

- La dirección IP es uno de los parámetros fundamentales para identificar al USRP en el computador.
- Identificación del puerto (Tx) donde será conectada la antena del equipo.
- Se ingresó una frecuencia de operación de 2.45 GHz, frecuencia en la que opera el USRP 2921; simultáneamente permite emular la frecuencia de operación de una red LTE.
- Identificación del puerto (Rx) donde será conectada la antena del equipo.
- La ganancia de la antena es de 10 dB, el mismo que dependerá del alcance que se quiere tener entre equipos.

- El tiempo de captura es de 4ms, valor que depende de la duración del paquete transmitido.
- Se colocó el nivel de disparo de 10m y un ancho de banda de 39.60 MHz.

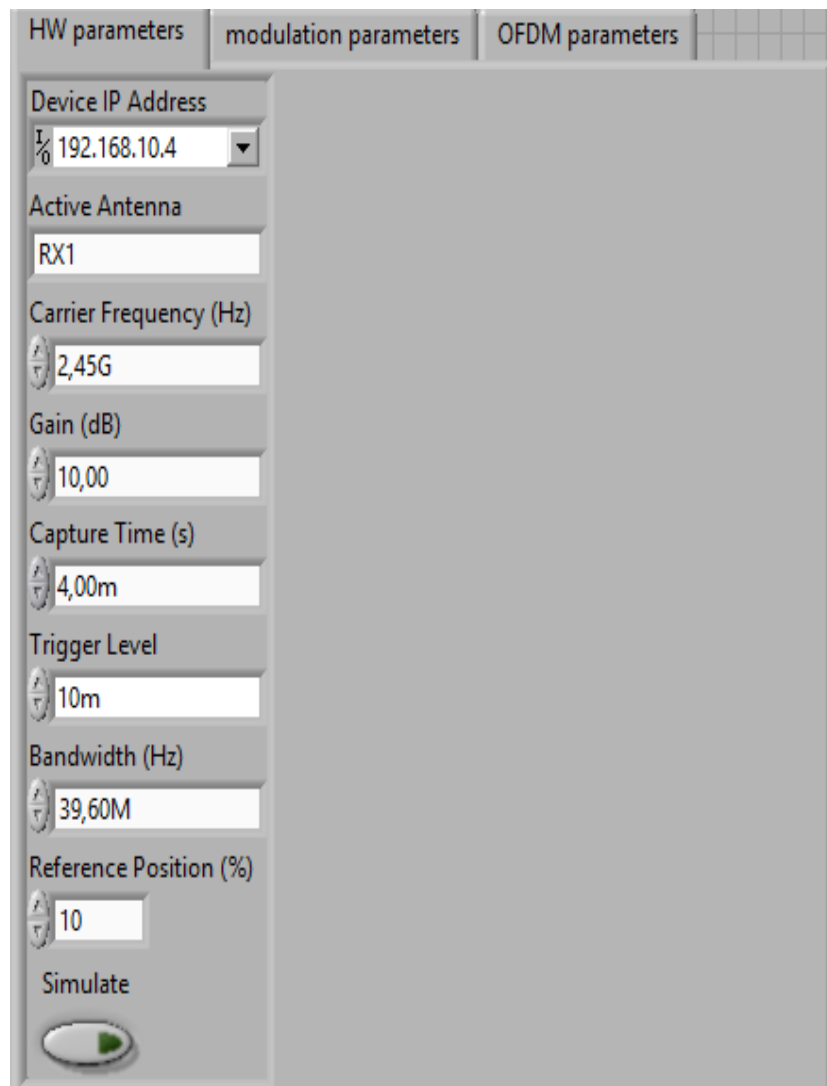


Figura 4.9: Parámetros del hardware de la recepción

4.2 Resultados

4.2.1 Primer escenario – Cobertura total en la comunicación de la red D2D:

Se realizó pruebas aplicando los métodos de sincronización de trama y frecuencia, y a su vez se comparó con los resultados obtenidos sin aplicar estos métodos; los resultados se los puede visualizar a través de diagrama de ojo y la gráfica del Time Offset (TO) vs el tiempo real (t).

Gráficas de sincronización de trama

En la Figura 4.10 se muestra la gráfica de la constelación del primer dispositivo (USRP1), que se basó en la programación secuencial como se ilustra en la figura 3.5. Dicha constelación se la aprecia distorsionada y algo extendida, debido a la ausencia del sincronismo de la trama al momento de realizar la comunicación entre los equipos (USRP1 y USRP2), lo cual se produce por el desplazamiento de frecuencia, generando una reducción de la detección de trama basado en la correlación.

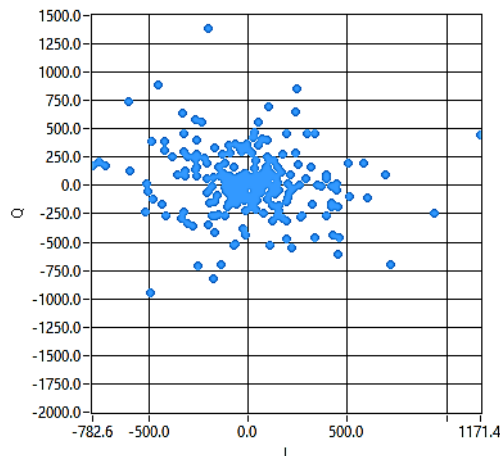


Figura 4.10: Constelación obtenida por USRP1 (Tx – Rx) sin sincronización de trama.

En la Figura 4.11 se aprecia una deformación de símbolos de la constelación producida en el segundo dispositivo (USRP2). Dicha deformación se la observa reducida con respecto a la constelación del

transmisor. La falta de sincronización de trama en la red de comunicación de ambos equipos (USRP1 y USRP2), retardos producidos por el canal y desplazamientos de frecuencia, son factores que influyen en la recepción de la trama.

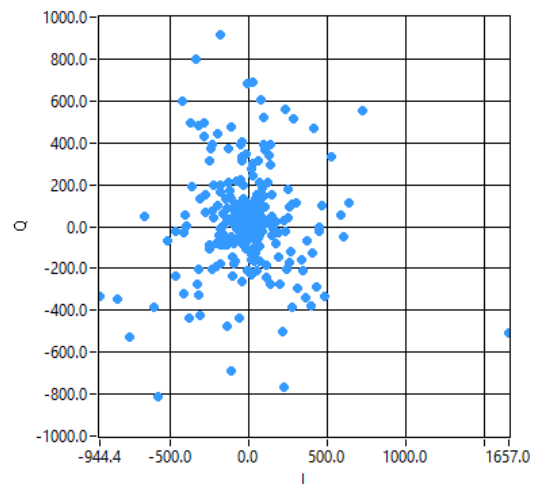


Figura 4.11: Constelación obtenida por USRP2 (Rx – Tx) sin sincronización de trama

En la figura 4.12 se puede apreciar la constelación recibida de una modulación QPSK; en este caso se obtiene una constelación igual a la transmitida, lo cual indica que la trama fue recibida sin errores, se eliminaron los retrasos del canal y el desplazamiento de frecuencia mediante los algoritmos de sincronización.

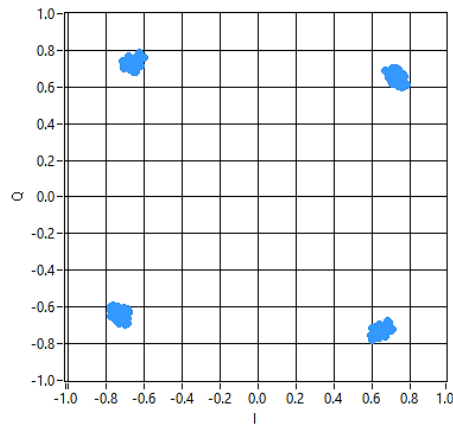


Figura 4.12: Constelación producida por el USRP1 (Tx-Rx) aplicando método de sincronización de trama.

En la figura 4.13 se observa la constelación enviada utilizando una modulación QPSK, en donde se muestra una constelación sin errores, sin desplazamientos de frecuencia, sin retardos producidos por el canal. Cabe mencionar que la trama es enviada a través del segundo dispositivo (USRP2), después de que realiza el cambio de Rx a Tx.

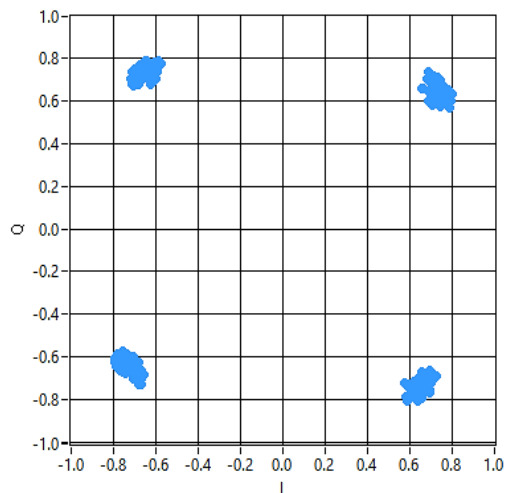


Figura 4.13: Constelación producida por el USRP2 (Rx-Tx) aplicando método de sincronización de trama.

Gráfica de sincronización de frecuencia aplicando Moose con Máxima energía.

El uso del algoritmo de Moose es de mucha ayuda para evitar los desfases en los símbolos transmitidos. En la figura 4.14 se muestra una constelación sin el uso de dicho algoritmo, produciendo mayor susceptibilidad al ruido o a la interferencia generada por el canal inalámbrico en comparación con señales que usan la corrección de desplazamiento de frecuencia como se ve en la Figura 4.13.

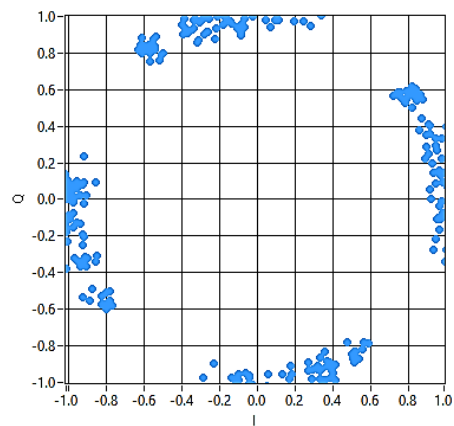


Figura 4.14: Constelación generada por el USRP1 (Tx-Rx) sin aplicar algoritmo de Moose

La constelación del segundo equipo (USRP2) sin aplicar el método de Moose se muestra en la figura 4.15, en donde se aprecia un desfase en los símbolos transmitidos, lo cual será fácil para captar el ruido o interferencias producidas por el canal inalámbrico.

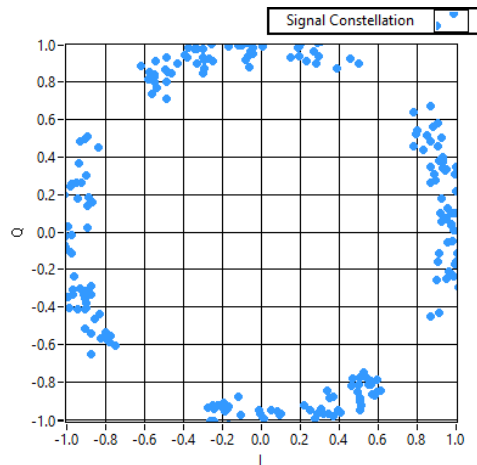


Figura 4.15: Constelación generada por el USRP2 (Rx-Tx) sin aplicar algoritmo de Moose

En la figura 4.16 se aprecia la constelación de símbolos ubicados en cuadratura una vez que se aplica el algoritmo de Moose en el primer dispositivo (USRP1), ayudando de esta forma a evitar interferencias producidas por el canal e incluso por ruidos externos que afecten la comunicación.

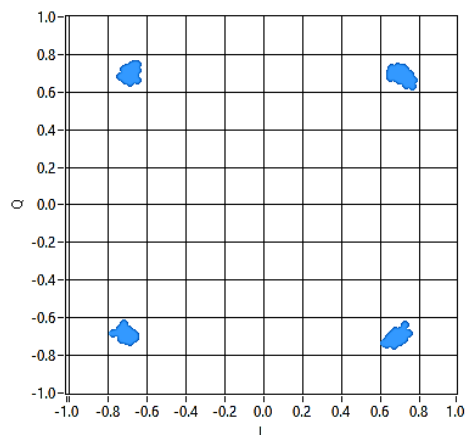


Figura 4.16: Constelación generada por el USRP1 (Tx-Rx) aplicando algoritmo de Moose

La constelación producida por el segundo equipo (USRP2) aplicando el algoritmo de Moose se la observa en la figura 4.17, en donde existe un sincronismo y una corrección de fase de los símbolos módulos en OFDM, ayudando así a mitigar interferencias generadas por el canal.

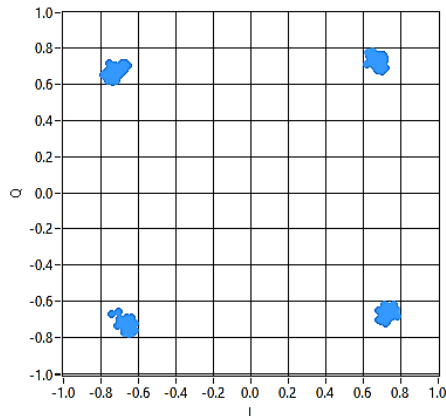


Figura 4.17: Constelación generada por el USRP2 (Rx-Tx) aplicando algoritmo de Moose

- **Graficas de TO vs t**

La grafica mostrada en la figura 4.22, se obtuvo luego de realizar 5 iteraciones y cada una de ellas con un tiempo de duración de 10seg. Se observa un incremento del TO, en donde en cada iteración se produce una perturbación de 5 microsegundos de retardo, demostrando así el sincronismo producido en la red de equipos.

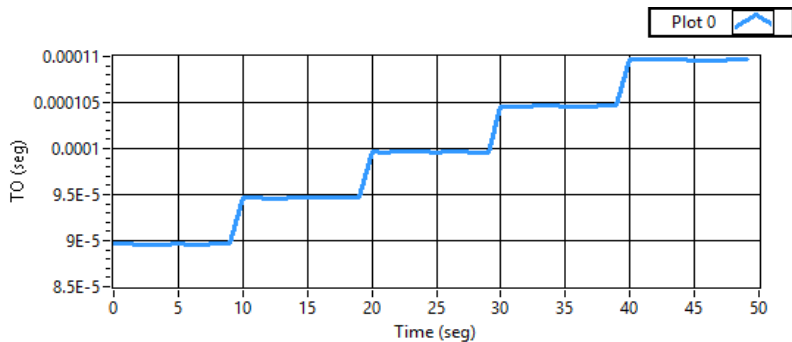
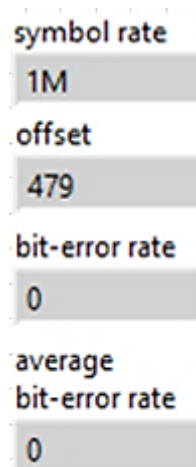


Figura 4.18: Gráfica del Time Offset en función del tiempo

En la figura 4.23 se puede observar los resultados obtenidos de la velocidad de símbolo (symbol rate) que es la tasa de símbolo del sistema con el cual se trabajó en el primer escenario; este valor se obtiene configurando la tasa de muestreo a 4MHz y el factor de sobre muestreo a 20, como se ilustra en la figura 4.24.

Además, se visualiza el retraso estimado (offset) de la trama al pasar por el canal inalámbrico. Se obtiene un valor de 479 una vez sincronizado en tiempo y en trama.

Luego se observa el bit error rate (tasa de error de bit) y la tasa promedio del error de bit que son parámetros importantes que considerar en la sincronización, ya que nos indica si la información ha sido recibida correctamente; durante la emulación el valor de la tasa error de bit y el promedio de tasa de error de bit obtenido es de cero. Por lo tanto, este valor indica que se sincronizó la red y se recibió la información sin error alguno.



The image shows a vertical list of simulation parameters and their values. Each parameter is followed by its value in a grey box. The parameters and values are: symbol rate (1M), offset (479), bit-error rate (0), and average bit-error rate (0).

symbol rate	1M
offset	479
bit-error rate	0
average bit-error rate	0

Figura 4.19: Resultados obtenidos de velocidad de símbolo, offset, el symbol rate

Mediciones de Canal

Por medio del uso de los algoritmos de sincronización se logró obtener un valor de retardo estimado, que es obtenido luego de aplicar la sincronización de tiempo y de trama, dando un valor de 0.00010975. Este valor es considerado el desplazamiento de tiempo.

Además, se obtuvo un valor de desplazamiento de frecuencia (Freq. Offset) entre los osciladores locales de los equipos, estimado por medio del algoritmo de Moose, dándonos así un valor de -24.4571 como se muestra en la figura 4.20.

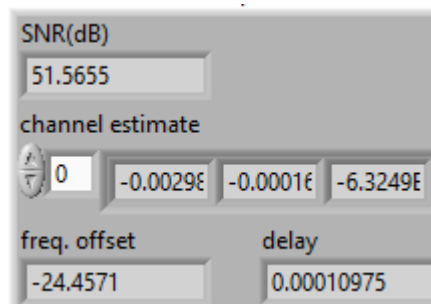


Figura 4.20: Mediciones obtenidas del canal

4.2.2 Segundo escenario – Cobertura parcial en la comunicación de la red D2D.

Se realizó las pruebas necesarias para obtener la sincronización de los equipos; mediante algoritmos de sincronización, se determinó el valor del desplazamiento de tiempo y también el error de sincronización. Para lo cual se obtuvo la gráfica de $\tau_k(n + 1)$ vs el número de iteraciones (hasta lograr la convergencia de un mismo valor de offset), obteniendo un valor de desplazamiento de offset de 104.10563, como se observa en la figura 4.21.

En la figura 4.22 se observa la constelación de símbolos ubicados en cuadratura una vez que se aplica algoritmos de sincronización y de corrección, en la recepción secuencial de la cobertura parcial.

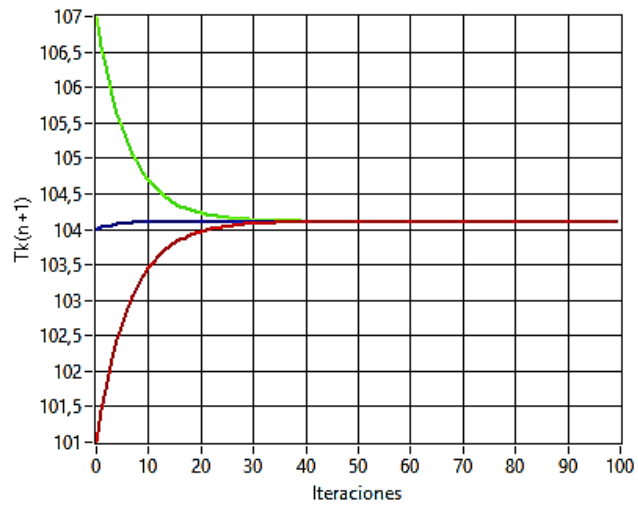


Figura 4.21: Gráfica de $\tau_k(n + 1)$ con respecto al número de iteraciones.

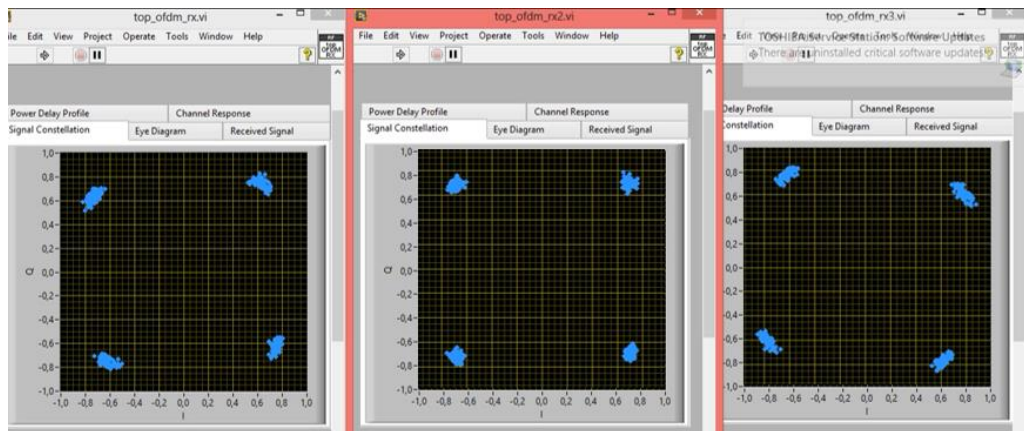


Figura 4.22: Constelación en las secuencias de la recepción

CONCLUSIONES

1. Para obtener una sincronización en redes D2D utilizando la tecnología LTE, es necesario: Considerar la sincronización de tiempo para obtener el desplazamiento de tiempo que existirá al inicio de la trama enviada al receptor; considerar la sincronización de trama para encontrar el máximo valor de desplazamiento de trama y así la estructura de la trama; y considerar la sincronización de frecuencia para corregir el desplazamiento producido en las frecuencias de portadora en la transmisión y recepción.
2. Existe diferencia en la implementación de las redes de comunicación D2D en cada escenario, debido a que en el escenario de *Cobertura Total* todos los equipos de usuario se comunican con una estación base, mientras que el escenario de cobertura parcial solo un usuario se comunica con la estación base y este usuario con los demás.
3. Se logró diseñar una red de comunicación D2D utilizando parámetros LTE. Los métodos de sincronización implementados fueron: máxima energía para la sincronización de tiempo, sliding correlator para la sincronización de trama y el algoritmo de Moose para la sincronización de frecuencia. La ganancia de las antenas es uno de los parámetros que influyen en la sincronización, debido que, a mayor distancia de cobertura, mayor debe ser la ganancia de la antena.
4. Los métodos de sincronización enunciados fueron implementados tanto en cobertura total como en cobertura parcial. Adicionalmente, en la cobertura parcial, se aplicó el método de consensus para realizar la corrección de desplazamiento de tiempo y así poder encontrar el inicio de la trama, mediante la superposición de ondas de los nodos de transmisión, obteniendo así el valor de TO que es usado como referencia para sincronizar la red.

RECOMENDACIONES

- Considerar los parámetros necesarios para implementar los algoritmos de sincronización en el software LabVIEW, además de la función que cumplen cada uno de ellos.
- Realizar varias pruebas con los equipos USRP, para observar el alcance máximo y variaciones que sufre la señal en cuanto a los desplazamientos de tiempo y frecuencia encontrados en el sistema de comunicación D2D.
- Para lograr de manera efectiva la sincronización para comunicación D2D en una red LTE usando equipos USRP, es necesario conocer el funcionamiento de los equipos, los parámetros a utilizar, la programación en el software LabVIEW, la implementación de algoritmos usados para la sincronización, los escenarios propuestos.
- Al aplicar el método de consenso, se debe considerar que el valor de la ganancia ε del bucle de fase sincronizada distribuida sea menor al periodo de sincronización

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Arasúa, «Aplicación de Técnicas Device-to-Device en la Gestión de Recursos Radio en Redes LTE para Minimizar la exposición Electromagnética,» Univ. Cantabria, Madrid, 2015.
- [2] A. Moraleda, B. Coll-Perales, J. Gozálvez y O. Lázaro, «Comunicaciones D2D Oportunistas: Evaluación Experimental del rendimiento en términos de Energía, Capacidad y QoS.,» *Researchgate*, pp. 1-4, 2014.
- [3] INEC, «En cinco años se quintuplicaron los usuarios de teléfonos inteligentes,» 20 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/en-cinco-anos-se-quintuplicaron-los-usuarios-de-telefonos-inteligentes/>. [Último acceso: 20 Noviembre 2017].
- [4] J. Vega, «Análisis de la sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM utilizando radio definido por software,» Univ. Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2015.
- [5] A. Lancho, «“Implementación de la señalización de una estación base UMTS”,» Dept. U3CM, Madrid, 2013.
- [6] CNMblog, «Sistemas de comunicaciones móviles,» 21 Mayo 2010. [En línea]. Available: <https://blog.cnmc.es/2010/05/21/conceptos-basicos-del-telecos-evolucion-de-las-comunicaciones-moviles-del-gsm-al-lte/>. [Último acceso: 7 Febrero 2018].
- [7] S. Patil, V. Nitnaware y S. Shelke, «Device to Device Communication in Spontaneous Ad Hoc network,» *IJIRCCE*, vol. 4, pp. 1-3, 2016.
- [8] A. Arash, Q. Wang y V. Mancuso, «A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks,» *IEEE*, vol. 16, pp. 1-4, 2014.
- [9] J. A. A. G. X. Lin, «An overview of 3GPP device to device proximity services,» *IEEE*, vol. 52, pp. 1-5, 2014.

- [1 M. Jaramillo, «Implementación de Red Móvil con Tecnología 4G LTE,»
0] Dspace Espol, Guayaquil, 2017.
- [1 «El Androide Libre,» 26 Febrero 2016. [En línea]. Available:
1] <https://elandroidelibre.elespanol.com/2016/02/que-diferencia-al-5g-de-las-redes-lte.html>. [Último acceso: 18 Diciembre 2017].
- [1 L. Almansa, «intotally,» 11 Julio 2013. [En línea]. Available:
2] <http://intotally.com/tot4blog/2013/07/11/lte-for-beginners-day-2-brief-description-about-lte-network-architecture/?lang=es>. [Último acceso: 19 Diciembre 2017].
- [1 A. Guevara y V. Vásquez, «Estado Actual de las redes LTE en
3] Latinoamérica,» Cuenca, 2013.
- [1 F. Valera, «OFDMA y SC-FDMA en la interfaz de radio LTE,» Sevilla.
4]
- [1 O. Rivas, «Sistema OFDM de alta eficiencia espectral,» Madrid, 2012.
5]
- [1 J. Ángeles, «Estudio y simulación de un sistema ACO-OFDM para
6] comunicaciones ópticas inalámbricas,» Sevilla.
- [1 Albentia.Wordpress, «Modulación OFDM,» 5 Septiembre 2013. [En línea].
7] Available: <https://albentia.wordpress.com/2013/09/05/modulacion-ofdm-wimax-madrid/>. [Último acceso: 26 Noviembre 2017].
- [1 K. Manolakis y W. Xu, «Time Synchronization for Multi-Link D2D/V2X
8] Communication,» de *Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2016 IEEE 84th*, Munich, 2016.
- [1 W. Fredrik y E. Ström, «Network Synchronization for mobile Device to
9] Device systems,» *IEEE*, vol. 65, pp. 1-5, 2017.
- [2 N. Abedini, S. Tavildar y J. Li, «Distributed Synchronization for Device-to-
0] Device Communications in an LTE Network,» *IEEE*, pp. 1-7, 2016.

- [2 M. Alvarez, W. Thompson y U. Spagnolini, «Distributed time and frequency
1] synchronization: USRP hardware implementation,» *IEEE*, pp. 1-5, 2015.
- [2 R. J. Heath, *Introduction to Wireless Digital Communication: A Signal
2] Processing Perspective*, Prentice Hall, 2012.
- [2 D. Pérez, «Implementación de Sistema MIMO mediante modulación
3] OFDM,» Madrid, 2014.
- [2 R. Singhai y P. Gupta, «Estimation and Analysis of channel distortion and
4] Carrier frequency offset (CFO) in MIMO-OFDM systems,» de *International
Journal of Computer Applications*, 2016.
- [2 M. Freire y W. Espinoza, «Diseño, simulación e implementación de un
5] esquema de detección de trama y de corrección del desplazamiento de
frecuencia en un Sistema de comunicación inalámbrico de una sola
portadora,» Guayaquil, 2014.
- [2 M. Espinoza, V. Castro, I. Díaz, M. González, C. Villate y G. Roncancio,
6] «Propuesta de diseño de un radio definido por software para la
caracterización de la banda IMT,» *Revista Colombiana de Tecnologías
Avanzadas*, vol. 2, pp. 48-52, 2014.
- [2 J. Rugeles, T. Mancilla y C. Clavijo, «Caracterización de la plataforma de
7] radio definido por software USRP N210-WBX,» *GTI*, pp. 1-3, 2013.
- [2 N. Instruments, «Une Introduction à la Radio Définie Par Logiciel (V1.1),»
8] 2013. [En línea]. Available:
<http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/3801/3801-manuel-tp-usrp-3h.pdf>. [Último acceso: 19
Noviembre 2017].
- [2 N. Instruments, «USRP Software Defined Radio Device - National
9] Instruments,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/es-cr/shop/select/usrp-software-defined-radio-device>. [Último acceso: 17
Noviembre 2017].

- [3 M. M. P. Vintimilla, «Reconocimiento del USRP / PXI,» Scribd, Cuenca, 0] 2015.
- [3 I. Pinar, «Software defined radio: USRP y plataformas de desarrollo,» 1] Sevilla.
- [3 N. Instruments, «NI USRP-292x/293x Datasheet,» 17 Agosto 2015. [En 2] línea]. Available: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-355>. [Último acceso: 11 Noviembre 2017].
- [3 J. Massey, J. Starr y S. Lee, «Implementation of a real-time wireless 3] interference alignment network,» de *Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, Pacific Grove, CA, USA, 2012.
- [3 N. Instruments, «Specifications USRP-2921 Software Defined radio 4] device,» 13 Julio 2017. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375867d.pdf>. [Último acceso: 7 Noviembre 2017].
- [3 G. Ramos, «Diseño, implementación y simulación del algoritmo de Moose 5] y Sliding Correlator a sistemas de portadora única en un canal inalámbrico para transmisión de imágenes,» Guyaquil, 2016.
- [3 M. Alvarez, B. Azari y U. Spagnolini, «Time and frequency self- 6] synchronization in dense cooperative network,» de *48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2014.
- [3 «w3ii.com,» [En línea]. Available: 7] http://www.w3ii.com/es/lte/lte_basic_parameters.html. [Último acceso: 27 Diciembre 2017].
- [3 L. S. d. Telecomunicaciones, «Practica 8 MODULACIÓN DIGITAL EN 8] BANDA BASE,» Fiec - Espol, Guayaquil, 2017.

ANEXOS

Anexo A. Parámetros de la red LTE

Parámetros Básicos	
Rango de Frecuencia	Bandas UMTS FDD y TDD, bandas definidas en 36.101 (V860) ver tabla 2.
Impresión a doble cara	FDD, TDD, FDD semidúplex
Codificación del canal	Código Turbo
Movilidad	350 km/h
Canal de Ancho de Banda (MHz)	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
Ancho de Banda de transmisión de configuración NRB: (1 bloque de recursos = 180 kHz en 1 mseg TTI)	6, 15, 25, 50, 75, 100
Esquemas de modulación	UL: QPSK, 16QAM, 64QAM (opcional)
	DL: QPSK, 16QAM, 64QAM
Esquema de Acceso Múltiple	UL: SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) es compatible con 50Mbps + (espectro de 20MHz)
	DL: OFDM (Orthogonal

	Frequency Division Multiple Access) soporta 100Mbps + (espectro de 20MHz)
Tecnología multi-antena	UL: MIMO multiusuario de colaboración
	DL: TxAA, multiplexado espacial, DDC, 4x4 máx matriz.
Velocidad de datos pico en LTE	UL: 75 Mbps (Ancho de banda de 20 MHz)
	DL: 150 Mbps (UE Categoría 5, MIMO 4x4, el ancho de banda de 20 MHz)
MIMO (Multiple Input - Multiple Output)	UL: 1 x 2, 1 x 4
	DL: 2 x 2, 4 x 2, 4 x 4
Cobertura	5 -100 kilómetros Con degradación después de 30 kilómetros.
QoS	E2E calidad de servicio que permite la priorización de diferente clase de servicio.
Estado Latente	El usuario final Latencia <10 ms

Tabla 1. A: Parámetros Generales de la red LTE [37]

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) Operating band BS receive UE transmit		Downlink (DL) Operating band BS transmit UE receive		Duplex Mode
	FUL low high	- FUL high	FDL low	- FDL high	
1	1920 MHz	- 1980 MHz	2110 MHz	- 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	- 1910 MHz	1930 MHz	- 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	- 1785 MHz	1805 MHz	- 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	- 1755 MHz	2110 MHz	- 2155 MHz	FDD
5	824 MHz	- 849 MHz	869 MHz	- 894 MHz	FDD
6	830 MHz	- 840 MHz	875 MHz	- 885 MHz	FDD
7	2500 MHz	- 2570 MHz	2620 MHz	- 2690 MHz	FDD
8	880 MHz	- 915 MHz	925 MHz	- 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	MHz-1447.9	1844.9 MHz	MHz -1879.9	FDD
10	1710 MHz	- 1770 MHz	2110 MHz	- 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	MHz-1447.9	728 MHz	- 746 MHz	FDD
12	698 MHz	- 716 MHz	746 MHz	- 756 MHz	FDD
13	777 MHz	- 787 MHz	758 MHz	- 768 MHz	FDD
14	788 MHz	- 198 MHz	758 MHz	- 768 MHz	FDD
17	788 MHz	- 198 MHz	758 MHz	- 768 MHz	FDD

33	1900 MHz - 1920 MHz	1900 MHz - 1920 MHz	FDD
34	2010 MHz - 2025 MHz	2010 MHz - 2025 MHz	FDD
35	1850 MHz - 1910 MHz	1850 MHz - 1910 MHz	FDD
36	1930 MHz - 1990 MHz	1930 MHz - 1990 MHz	FDD
37	1910 MHz - 1930 MHz	1910 MHz - 1930 MHz	FDD
38	2570 MHz - 2620 MHz	2570 MHz - 2620 MHz	FDD
39	1880 MHz - 1920 MHz	1880 MHz - 1920 MHz	FDD
40	2300 MHz - 2400 MHz	2300 MHz - 2400 MHz	FDD

Tabla 2: Bandas E -UTRA operativos [37]

Anexo B. Características del Hardware NI USRP 2921

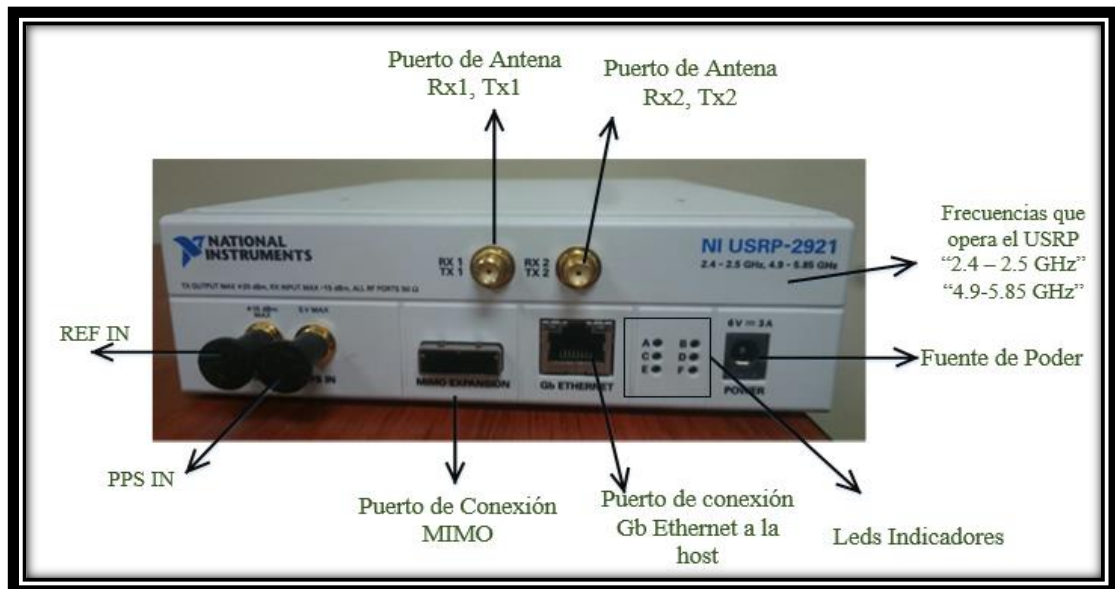


Figura B. 1: Panel Frontal del Hardware NI – USRP 2921

En la Figura 2.3.4 se puede apreciar el panel frontal del NI USRP 2921 a continuación una breve descripción y funcionamiento de cada uno de los terminales que compone al equipo.

Puerto de Antena RX1, TX1, RX2, TX2:

En estos puertos se conecta las antenas respectivas para el equipo, en el proyecto se utilizará la antena VERT2450 y la antena que operan a varias frecuencias, además es recomendable configurar la antena en la interfaz que se usará para transmitir y recibir datos, tiene un terminal SMA hembra con forma de rosca diseñado para un cable coaxial con 50 ohm de impedancia, trabajando en un solo canal de entrada y salida [10].

REF IN Y PPS:

Terminales con impedancia de 50 ohm, y conector SMA hembra tipo rosca. Su funcionamiento es de la recepción de señales de radiofrecuencia además nos permite

conectar otros hardware como osciladores externos que nos permitan efectuarse las aplicaciones que se desean realizar.

Puerto de conexión MIMO

Este terminal utiliza un cable denominado MIMO que cumple la función de un switch ya que se puede conectar dos o más hardware USRP.

Puerto de conexión GB ETHERNET.

En el puerto GigaBit Ethernet se puede utilizar cables que tengan compatibilidad como los cables UTP y conectores RJ-45, y se lo utiliza en la conexión del host con el NI USRP 2921.

Fuente de Poder

El NI USRP 2921 tiene una alimentación de 6V DC y de corriente 3A, con 18 W de potencia.

Leds Indicadores.

En el Hardware se puede apreciar seis leds indicadores cada uno de ellos representado por una letra y mostrando el estado en que se encuentra el USR [11]. La figura 26 Muestra los leds del NI USRP 2921 en donde cada uno de ellos cumple con una función al momento de ser activados con la alimentación a la fuente de poder del hardware.

A continuación, se detallará las funciones de cada Led Indicador.

LED A: Permite observar la transmisión de datos del hardware

- ✓ Apagado: El equipo no transmite información.
- ✓ Encendido: El equipo transmite información.

LED B: Permite apreciar si la conexión del cable MIMO es correcta.

- ✓ Apagado: El cable MIMO no está conectado a los equipos.
- ✓ Encendido: El cable MIMO está conectado a los equipos.

LED C Permite observar la recepción de información.

- ✓ Apagado: El equipo no recibe datos.

✓ Encendido: El equipo recibe datos.

LED D: Permite apreciar el estado de firmware del módulo.

✓ Apagado: El firmware no está cargado.

✓ Encendido: El firmware está cargado.

LED E: Permite ver en que estado se encuentra el oscilador local del módulo.

✓ Apagado: El oscilador local no está acoplado a una señal de referencia o no hay señal de referencia.

✓ Encendido: El oscilador local esta acoplado a una señal de referencia.

✓ Parpadeando: El oscilador local no está acoplado a una señal de referencia.

LED F: Permite observar en qué estado se encuentra el equipo.

✓ Apagado: El equipo está apagado.

✓ Encendido: El equipo no está apagado. [38]

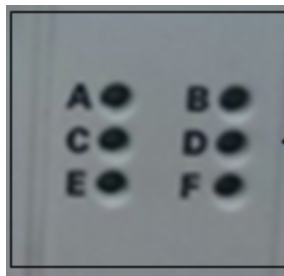


Figura 2.3.5: Leds indicadores Fuente: USRP 2921 [6]

Anexo C. Características Operacionales del NI USRP 2921

TRANSMISOR	
Rango de Frecuencia	2.4GHz a 2.5 GHz y 4.9GHz a 5.9GHz
Paso de Frecuencia	< 1 kHz
POTENCIA DE SALIDA MÁXIMA	
2.4 GHz a 2.5GHz	50Mw A 100Mw (17 dBm a 20 dBm)
4.9GHz a 5.9 GHz	50Mw A 100Mw (17 dBm a 20 dBm)
Rango de Ganancia	0 dB a 35dB
Paso de Ganancia	0.5 dB
Precisión de Frecuencia	2.55 ppm
Ancho de banda máximo instantáneo en tiempo real	
16-bit ancho de muestra	24 MHz
8-bit ancho de muestra	48MHz
Velocidad máxima de muestreo I/Q	
16-bit ancho de muestra	25 MS/s
8-bit ancho de muestra	50 MS/s
Convertidor digital a analógico (DAC)	2 canales, 400 MS/s, 16 bit
Rango Dinamico spurious-free DAC)	80 dB

Tabla 4: Características del Transmisor [34]

RECEPTOR	
Rango de Frecuencia	2.4GHz a 2.5 GHz y 4.9GHz a 5.9GHz
Paso de Frecuencia	< 1 kHz
Rango de Ganancia	0 dB a 92.5 dB
Paso de Ganancia	2 dB
Máxima Potencia de entrada	-15 dBm
Figura de Ruido	5 dB a 7 dB
Precisión de Frecuencia	2.5 ppm
Ancho de banda máximo instantáneo en tiempo real	
16-bit ancho de muestra	19 MHz
8-bit ancho de muestra	36 MHz
Velocidad máxima de muestreo I/Q	
16-bit ancho de muestra	25 MS/s
8-bit ancho de muestra	50 MS/s
Convertidor digital a analógico (DAC)	2 Canales, 100 MS/s, 14 bit
ADC SfdR	88 dB

Tabla 5: Características del Receptor [34]

Anexo D. Vi de transmisión y recepción del escenario de cobertura parcial

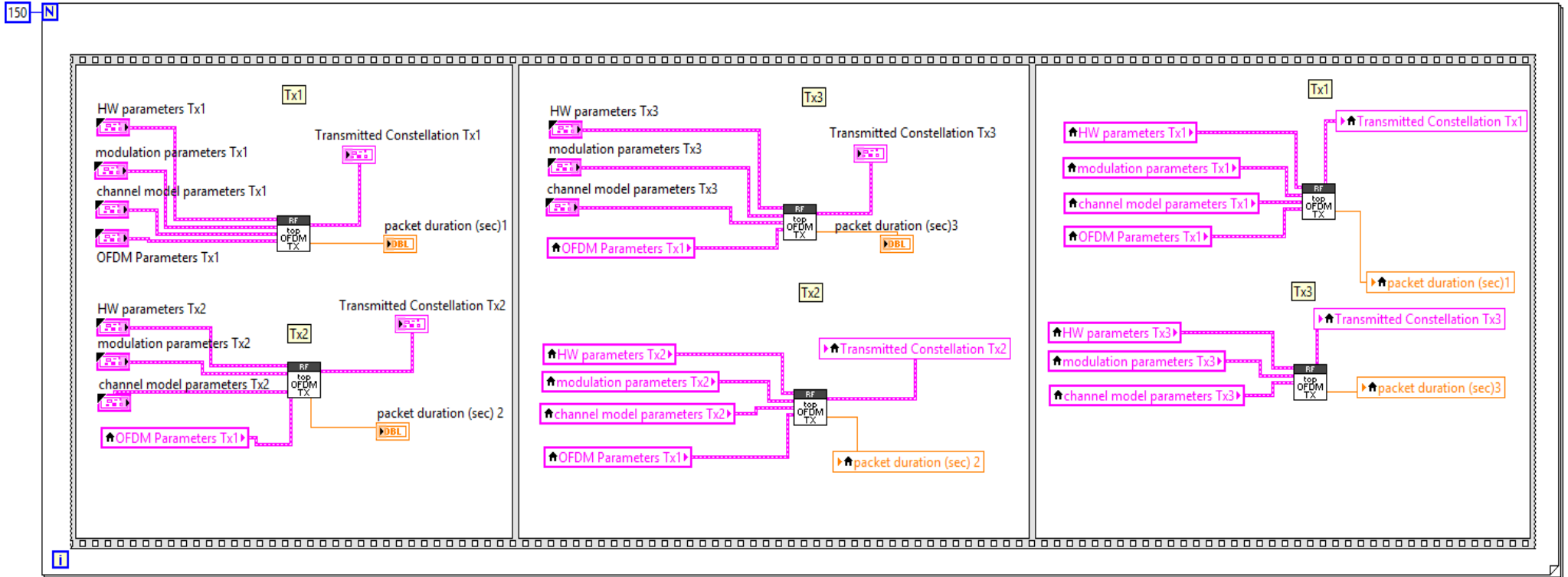


Figura D.1: Diagrama secuencial de transmisión de red D2D con cobertura parcial.

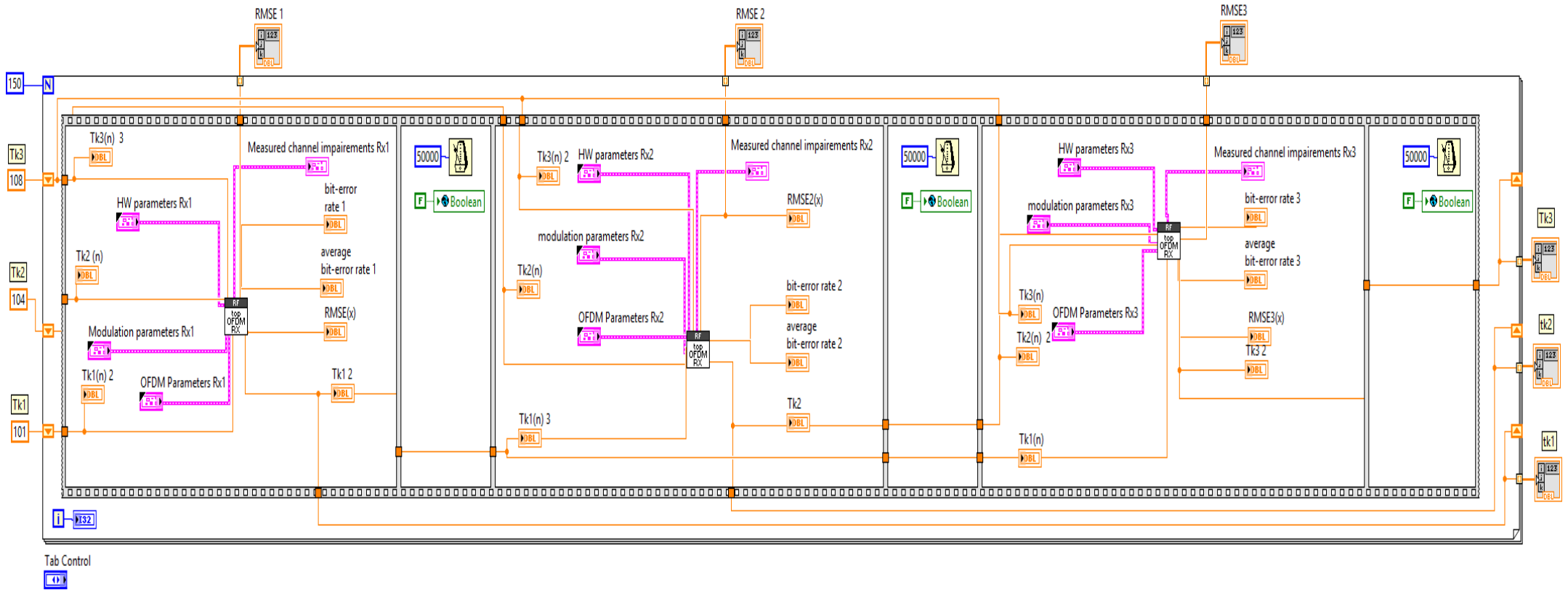


Figura D.2: Diagrama secuencial de la recepción de red D2D con cobertura parcial.

Anexo E. Pruebas con los equipos USRP.

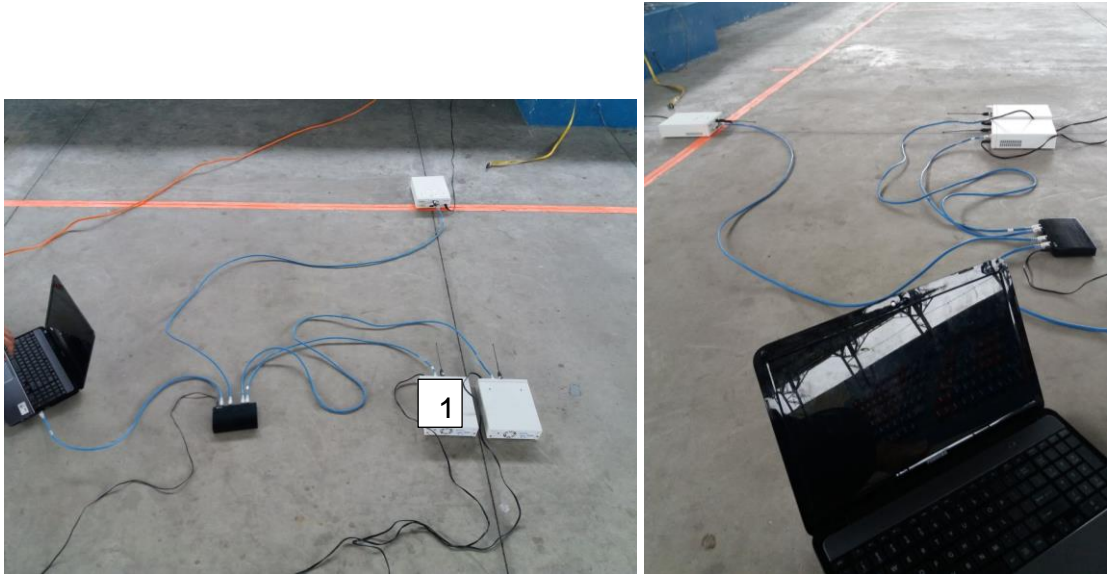


Figura E.1: Pruebas de comunicación con distancia de 3 metros



Figura E.2: Pruebas en laboratorio con distancia de 4 m entre transmisores y receptor