

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN
DE DATOS INALÁMBRICO PUNTO A MULTIPUNTO DE CORTO ALCANCE EN LA
BANDA DE 2,4 GHZ**



**William Fernando Gualteros García
Edgar Alexander Calvache Ramírez**

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e InALámbricas – GRIAL

GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones

Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio

Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de Telecomunicaciones

Popayán, Agosto 2012

**EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN
DE DATOS INALÁMBRICO PUNTO A MULTIPUNTO DE CORTO ALCANCE EN LA
BANDA DE 2,4 GHZ**



Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones

**William Fernando Gualteros García
Edgar Alexander Calvache Ramírez**

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e InALámbricas – GRIAL

GNTT – Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones

Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio

Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de Telecomunicaciones

Popayán, Agosto 2012

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCION..... | 1 |
| Capítulo 1 GENERALIDADES..... | 3 |
| 1.1 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICOS | 3 |
| 1.1.1 Descripción de los Componentes de un Sistema de Comunicaciones Inalámbrico..... | 3 |
| 1.1.2 Modulación de Señales Digitales | 4 |
| 1.1.2.1 Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK) | 6 |
| 1.1.2.2 Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana GFSK | 6 |
| 1.1.2.3 Modulación de mínima separación de frecuencia (MSK) | 9 |
| 1.2 REDES DE ÁREA PERSONAL | 13 |
| Capítulo 2 HERRAMIENTAS DE DESARROLLO..... | 15 |
| 2.1 LA TARJETA EZ430-RF2500T | 16 |
| 2.1.1 Microcontrolador MSP430F2274..... | 16 |
| 2.1.2 Transceptor CC2500..... | 18 |
| 2.1.2.1 Características del CC2500..... | 18 |
| 2.1.2.2 Interfaz SPI del CC2500 [10]..... | 20 |
| 2.1.2.3 Parámetros de Configuración del CC2500..... | 21 |
| 2.1.2.4 Formato del Paquete del Transceptor CC2500 | 23 |
| 2.1.3 Conexión del Microcontrolador MSP430F2274 y el transceptor CC2500..... | 24 |
| 2.1.4 Interfaz USB de Programación y Depuración eZ430-RF | 24 |
| 2.1.4.1 Herramienta para la Emulación de Flash (FET, <i>Flash Emulation Tool</i>) | 25 |
| 2.1.4.2 MSP <i>Application</i> UART..... | 25 |
| 2.2. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SIMPLICITI® | 26 |
| 2.2.1 Características de SimpliciTI®..... | 26 |
| 2.2.2 Topologías de Red y Tipos de Dispositivos Soportados por SimpliciTI® | 27 |
| 2.2.2.2 Dispositivo Final (ED) | 27 |
| 2.2.2.3 Punto de Acceso (AP)..... | 27 |
| 2.2.3. Arquitectura de SimpliciTI® | 29 |
| 2.2.3.1 Nivel de Aplicación..... | 30 |
| 2.2.3.2 Nivel de Red (NWK)..... | 30 |
| 2.2.3.3 Nivel de Interfaz Mínima de RF | 30 |

| | |
|--|----|
| 2.2.4. API del Protocolo SimpliciTI® | 30 |
| 2.2.4. Formato del Paquete SimpliciTI® | 31 |
| 2.3 ENTORNOS INTEGRADOS DE DESARROLLO PARA EL KIT EZ430-RF2500 | 32 |
| 2.3.1 IAR Embedded Workbench Kickstart For MSP430..... | 32 |
| 2.3.2 Code Composer Studio (CCS) | 32 |
| 2.4 OTRAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS | 32 |
| 2.4.1 PostgreSQL©..... | 32 |
| 2.4.2 Eclipse IDE para Desarrolladores Java..... | 33 |
| Capítulo 3 SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALAMBRICO DE CORTO ALCANCE EN LA BANDA DE 2,4 GHZ..... | 34 |
| 3.1 SISTEMA DE COMUNICACIÓN PUNTO A PUNTO | 35 |
| 3.1.1 Diseño de la Base de Datos para el Sistema Punto a Punto | 36 |
| 3.1.2 Protocolo de Comunicaciones entre la Tarjeta EZ430-RF2500T y el <i>Software</i> ACADPP..... | 37 |
| 3.1.3 Diseño del <i>Firmware</i> del Microcontrolador MSP430F2274. | 40 |
| 3.1.4 Diseño del <i>Software</i> ACADPP..... | 40 |
| 3.1.4.1 Descripción de Casos de Uso | 40 |
| 3.1.4.2 Arquitectura del <i>Software</i> | 44 |
| 3.1.4.3 Modelo Estático de la Arquitectura..... | 45 |
| 3.1.4.4 Interfaces de Usuario..... | 49 |
| 3.2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN PUNTO A MULTIPUNTO | 51 |
| 3.2.1 Diseño de la Base de Datos para el Sistema Punto a Multipunto | 52 |
| 3.2.2 Protocolo de Comunicaciones entre la Tarjeta EZ430-RF2500T y el <i>Software</i> ACADPMP..... | 53 |
| 3.2.3 Diseño del <i>Firmware</i> del Microcontrolador MSP430F2274 | 54 |
| 3.2.4 Diseño del <i>Software</i> ACADPMP..... | 54 |
| 3.2.4.1 Descripción de los Casos de Uso..... | 54 |
| 3.2.4.4 Interfaces de Usuario..... | 60 |
| 3.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE PREDICCIÓN DE PROPAGACIÓN WIRELESS INSITE® | 61 |
| 3.3.1 Antenas | 63 |
| 3.3.2 Forma de Onda | 63 |
| 3.3.3 Transmisores y Receptores..... | 63 |
| Capítulo 4 PLAN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 65 |

| | |
|---|----|
| 4.1 Escenarios de Prueba | 65 |
| 4.1.1 Exteriores..... | 66 |
| 4.1.2 Interiores | 70 |
| 4.1.3 Condición de Interferencia..... | 72 |
| 4.1.3.1 Condición de Interferencia en un Enlace Punto a Punto | 72 |
| 4.1.3.2 Condición de Interferencia en un Enlace Punto a Multipunto..... | 73 |
| 4.2 CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LA SEÑAL TRANSMITIDA..... | 74 |
| 4.3 RESULTADOS OBTENIDOS..... | 75 |
| 4.3.1 Resultados Obtenidos Mediante la Simulación en Wireless InSite®..... | 75 |
| 4.3.2 Resultados Obtenidos en el Escenario de Interiores para el Enlace P2P. | 77 |
| 4.3.3 Resultados Obtenidos en el Escenario de Exteriores para el Enlace P2P. | 77 |
| 4.3.4 Resultados Obtenidos Frente a Interferencia para el Enlace P2P. | 77 |
| 4.3.4.1 Sistema de Comunicaciones con Modulación FSK | 77 |
| 4.3.4.2 Sistema de Comunicaciones con Modulación GSK..... | 78 |
| 4.3.4.3 Sistema de Comunicaciones con Modulación MSK | 80 |
| 4.3.5.1 Estabilidad en Frecuencia Frente a Cambios de Temperatura. | 81 |
| 4.3.5.2 Ancho de Banda..... | 83 |
| 4.3.6 Resultados Obtenidos en el Enlace Punto a Multipunto..... | 85 |
| 4.3.6.1 Resultados sin Fuente de Interferencia..... | 85 |
| 4.3.6.2 Resultados sin Fuente de Interferencia..... | 95 |
| Capítulo 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 96 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 96 |
| 5.2 TRABAJOS FUTUROS..... | 97 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 98 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|--------|
| Figura 1.1 Modelo en Bloques de un Sistema de Comunicaciones..... | 4 |
| Figura 1.2 Modulación ASK | 5 |
| Figura 1.3 Espectro de la Modulación ASK | 6 |
| Figura 1.4 Modulación FSK..... | 6 |
| Figura 1.5 Espectro de la Modulación FSK | 7 |
| Figura 1.6 Modulación GFSK..... | 8 |
| Figura 1.7 Comparación de Espectros FSK y GFSK. | 8 |
| Figura 1.8 Densidad Espectral de Potencia de una Señal GFSK para Diferentes Valores de BT..... | 9 |
| Figura 1.9 Diagrama del Ojo de las Componentes en Fase y Cuadratura para GFSK..... | 9 |
| Figura 1.10 Formas de Onda Presentes en la Modulación MSK. | 11 |
| Figura 1.11 Señal modulada MSK. | 12 |
| Figura 1.12 Espectro de la Modulación MSK | 12 |
| Figura 1.13 Red en Estrella | 13 |
| Figura 1.14 Red en Árbol | 14 |
| Figura 2.1 Componentes <i>Hardware</i> del Kit de Desarrollo EZ430-RF2500 | 15 |
| Figura 2.2 Tarjeta de Desarrollo EZ430-RF2500T | 17 |
| Figura 2.3 Diagrama en Bloques Funcionales del Microcontrolador MSP430F2274 | 17 |
| Figura 2.4 Diagrama en Bloques Simplificado del Transceptor CC2500 | 20 |
| Figura 2.5 Byte de Encabezado de una Transferencia SPI..... | 20 |
| Figura 2.6 Byte <i>STATUS</i> del CC2500 | 21 |
| Figura 2.7 Formato de Paquetes del CC2500..... | 24 |
| Figura 2.8 Conexión Física entre el MSP430F2274 y el CC2500 | 25 |
| Figura 2.9 Interfaz USB ez430-RF | 26 |
| Figura 2.10 Topología Punto a Punto Directa. | 28.... |
| Figura 2.11 Topología Punto a Punto a través de un RE. | 28 |
| Figura 2.12 Topología Punto a Punto a través de un AP. | 28 |
| Figura 2.13 Topología Punto a Punto a través de un RE y un AP. | 29 |
| Figura 2.14 Arquitectura de Simpliciti®..... | 29 |
| Figura 2.15 Formato del Paquete Simpliciti®..... | 31 |
| Figura 3.1 Diagrama General del Sistema de Comunicación Punto a Punto Implementado. | 35 |
| Figura 3.2 Componentes <i>Software</i> Presentes en el Sistema de Comunicación Punto a Punto..... | 36 |
| Figura 3.3 Modelo Entidad Relación de la Base de Datos Empleada en el Sistema Punto a Punto..... | 37 |
| Figura 3.4 Diagrama de Casos de Uso del <i>Software</i> ACADPP | 41 |
| Figura 3.5 Arquitectura en Capas del <i>Software</i> ACADPP | 45 |
| Figura 3.6 Diagrama de Clases de la Capa Persistencia del <i>Software</i> ACADPP | 46 |
| Figura 3.7 Diagrama de Clases de la Capa Control del <i>Software</i> ACADPP..... | 46 |
| Figura 3.8 Diagrama de Clases de la Capa Conexión del <i>Software</i> ACADPP..... | 46 |

| | |
|---|---|
| Figura 3.9 Diagrama de Clases de la Capa Modelo del <i>Software</i> ACADPP..... | 47 |
| Figura 3.10 Diagrama de Clases de la Capa Vista del <i>Software</i> ACADPP..... | 47 |
| Figura 3.11 Diagrama de Clases Completo del <i>Software</i> ACADPP..... | 48 |
| Figura 3.12 GUI Mostrar Configuración del <i>Software</i> ACADPP | 49 |
| Figura 3.13 GUI Cargar Configuración del <i>Software</i> ACADPP..... | 49 |
| Figura 3.14 GUI Cargar Configuración del <i>Software</i> ACADPP..... | 50 |
| Figura 3.15 GUI Mostrar Registros del <i>Software</i> ACADPP..... | 50 |
| Figura 3.16 GUI Guardar Resultado del <i>Software</i> ACADPP..... | 50 |
| Figura 3.17 GUI Generar Archivos MATLAB..... | 51 |
| Figura 3.18 Diagrama General del Sistema de Comunicación Punto a Multipunto Implementado. | 52 |
| Figura 3.19 Modelo Entidad Relación de la Base de Datos Empleada en el Sistema Punto a Multipunto..... | 53 |
| Figura 3.20 Diagrama de Casos de Uso del <i>Software</i> ACADPMP. | 55 |
| Figura 3.21 Diagrama de Clases de la Capa Persistencia del <i>Software</i> ACADPMP..... | 56 |
| Figura 3.22 Diagrama de Clases de la Capa Control del <i>Software</i> ACADPMP | 57 |
| Figura 3.23 Diagrama de Clases de la Capa Vista del <i>Software</i> ACADPMP | 57 |
| Figura 3.24 Diagrama de Clases de la Capa Modelo del <i>Software</i> ACADPMP..... | 58 |
| Figura 3.25 Diagrama de Clases Completo del <i>Software</i> ACADPMP | 59 |
| Figura 3.26 GUI Principal del <i>Software</i> ACADPMP..... | 60 |
| Figura 3.27 GUI Resultados, Pestaña de Datos del Dispositivo Originador de Paquetes del <i>Software</i> ACADPMP | 60 |
| Figura 3.28 GUI Resultados, Pestaña de Datos del Dispositivo Receptor de Paquetes del <i>Software</i> ACADPMP | 61 |
| Figura 4.1 Cancha de Fútbol CDU..... | 66 |
| Figura 4.2 Escenario de Exteriores Wireless InSite®. | 67 |
| Figura 4.3 Ubicación del Transmisor y Receptor en el Enlace Punto a Punto | 68 |
| Figura 4.4 Ubicación AP y ED para el Sistema de Comunicaciones Punto a Multipunto ... | 69 |
| Figura 4.5 Escenario de Interiores Wireless InSite®..... | 71 |
| Figura 4.6 Escenario de Interiores | 71 |
| Figura 4.7 Montaje para Evaluar del Sistema Punto a Punto bajo Condiciones de Interferencia. | 73 |
| Figura 4.8 Montaje para Evaluar del Sistema Protocolo SimpliciTI® bajo Condiciones de Interferencia. | 74 |
| Figura 4.9 Montaje Empleado para Determinar la Estabilidad en Frecuencia del Kit eZ430-RF2500 al Variar la Temperatura..... | 75 |
| Figura 4.10 Retardos de Propagación para el Escenario de Interiores | 76 |
| Figura 4.11 Retardos de Propagación para el Escenario de Exteriores..... | 76 |
| Figura 4.12 RSSI para FSK a 2,4 Kbps | Figura 4.13 RSSI para FSK a 10 Kbps |
| Figura 4.14 BER para FSK a 2,4 Kbps | Figura 4.15 BER para FSK a 10 Kbps |
| Figura 4.16 RSSI para GFSK a 2,4Kbps | Figura 4.17 RSSI para GFSK a 10Kbps |
| Figura 4.18 BER para GFSK a 2,4 Kbps | Figura 4.19 BER para GFSK a 10 Kbps |

| | | |
|---|--|----|
| Figura 4.20 RSSI para MSK a 250 Kbps | Figura 4.21 RSSI para MSK a 500 Kbps | 80 |
| Figura 4.22 BER para MSK a 250 Kbps | Figura 4.23 BER para MSK a 500 Kbps | 81 |
| Figura 4.24 Variación de la Frecuencia Central Frente a Cambios de Temperatura..... | | 82 |
| Figura 4.25 Ancho de Banda para FSK a 2,4 Kbps..... | | 84 |
| Figura 4.26 Ancho de Banda para FSK a 10 Kbps..... | | 84 |
| Figura 4.27 Ancho de Banda para GFSK a 2,4 Kbps | | 84 |
| Figura 4.28 Ancho de Banda para GFSK a 10 Kbps..... | | 84 |
| Figura 4.29 Ancho de Banda para MSK a 250 Kbps..... | | 85 |
| Figura 4.30 Ancho de Banda para MSK a 500 Kbps..... | | 85 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 Posibles Estados de la Señal Modulada MSK Durante un Intervalo de Tiempo Correspondiente al Tiempo de un Bit de la señal Moduladora | 12 |
| Tabla 2.1 Rangos de Variación de la Velocidad de Transmisión de Datos Según el Esquema de Modulación Empleado | 22 |
| Tabla 2.2 Sensibilidad del Transceptor CC2500 para Valores Típicos de la Velocidad de Transmisión de Datos | 22 |
| Tabla 2.3 Resumen de las Configuraciones Base Proporcionadas por el Software Smart RF Studio®..... | 23 |
| Tabla 2.4 Requerimientos de Tiempo en la Interfaz SPI para el CC2500..... | 24 |
| Tabla 2.5 descripción de los Campos del Paquete SimplicITI®..... | 31 |
| Tabla 3.1 Descripción del Caso de Uso Conectar | 40 |
| Tabla 3.2 Descripción del Caso de Uso Cargar Configuración..... | 40 |
| Tabla 3.3 Descripción del Caso de Uso Conectar Guardar Configuración | 42 |
| Tabla 3.4 Descripción del Caso de Uso Actualizar Tarjeta | 42 |
| Tabla 3.5 Descripción del Caso de Uso Leer Configuración Tarjeta | 42 |
| Tabla 3.6 Descripción del Caso de Uso Leer Configuración de la tarjeta eZ430-RF2500T | 43 |
| Tabla 3.7 Descripción del Caso de Uso Iniciar Rx..... | 43 |
| Tabla 3.8 Descripción del Caso de Uso Terminar Rx | 43 |
| Tabla 3.9 Descripción del Caso de Uso Guardar Resultado..... | 43 |
| Tabla 3.10 Descripción del Caso de Uso Iniciar Tx..... | 44 |
| Tabla 3.11 Descripción del Caso de Uso Detener Tx | 44 |
| Tabla 3.12 Descripción del Caso de Uso Generar Gráficas..... | 44 |
| Tabla 3.13 Parámetros para el Modelo Full 3D | 62 |
| Tabla 3.14 Configuración Antenas..... | 63 |
| Tabla 3.15 Configuración Forma de Onda..... | 63 |
| Tabla 3.16 Configuración del Transmisor..... | 63 |
| Tabla 3.17 Configuración del Receptor..... | 64 |
| Tabla 4.1 Configuraciones Evaluadas | 68 |
| Tabla 4.2 Configuraciones Evaluadas | 74 |
| Tabla 4.3 Variación de la Frecuencia Central Frente a Cambios de Temperatura | 82 |
| Tabla 4.4 Valor de Ancho de Banda para las Configuraciones Evaluadas | 83 |
| Tabla 4.5 Pruebas Realizadas del Sistema Punto a Multipunto | 85 |
| Tabla 4.6 Resultados Pruebas 1, 2 y 3 | 88 |
| Tabla 4.7 Resultados Prueba 4 | 88 |
| Tabla 4.8 Resultados Prueba 5..... | 89 |
| Tabla 4.9 Resultados Prueba 6 para los Paquetes Originados por el AP | 89 |
| Tabla 4.10 Resultados Prueba 6 para los Paquetes Originados por el ED..... | 90 |
| Tabla 4.11 Resultados Prueba 7 | 90 |
| Tabla 4.12 Resultados Prueba 8 para el ED0 y el ED1 | 91 |
| Tabla 4.13 Resultados Prueba 8 para el ED2..... | 91 |

| | |
|--|----|
| Tabla 4.14 Resultados Prueba 9 para los Paquetes Originados por el AP (ED0 y el ED1) | 92 |
| Tabla 4.15 Resultados Prueba 9 para los Paquetes Originados por el AP (ED2) | 92 |
| Tabla 4.16 Resultados Prueba 9 para los Paquetes Originados por el AP (ED0 y el ED1) | 93 |
| Tabla 4.17 Resultados Prueba 9 para los Paquetes Originados por el AP (ED2) | 93 |
| Tabla 4.18 Resultados Generales para 1ED | 94 |
| Tabla 4.19 Resultados Generales para 2 ED | 94 |
| Tabla 4.20 Resultados Generales para 3 ED | 94 |
| Tabla 4.21 Resultados Prueba de Interferencia..... | 95 |

LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|----------------|---|
| ACADPMP | Aplicación para la Configuración y Adquisición de Datos en el Enlace Punto a Multi Punto. |
| ACADPP | Aplicación para la Configuración y Adquisición de Datos en el Enlace Punto a Punto. |
| ACK | <i>Acknowledge</i> , Acuse de Recibo. |
| ADC | <i>Analog to Digital Converter</i> , Conversor Analógico Digital |
| AM | <i>Amplitude Modulation</i> , Modulación de Amplitud. |
| AP | <i>Acces Point</i> , Punto de Acceso. |
| API | <i>Aplication Programming Interface</i> , Interfaz de Programación de Aplicaciones. |
| ASCII | <i>American Standard Code for Information Interchange</i> , Código Estándar Americano para el Intercambio de Información. |
| ASK | <i>Amplitude Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Amplitud. |
| BER | <i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit. |
| BSD | <i>Berkeley Software Distribution</i> , Distribución de Software de Berkeley |
| BW | <i>Bandwith</i> , Ancho de Banda. |
| CCA | <i>Clear Channel Assessment</i> , Aseguramiento de Canal Libre. |
| CCS | <i>Code Composer Studio</i> . |
| CDU | Centro Deportivo Universitario. |
| CG | <i>Constant Cenerator</i> , Generador de Constantes |
| DIMCU | <i>Digital Interfaz to MicroControlled Unity</i> , Interfaz Digital a la Unidad MicroControlada |
| ED | <i>End Device</i> , Dispositivo Terminal. |
| FET | <i>Flash Emulator Tool</i> , Herramienta para la Emulación de Flash |
| FIFO | <i>First In First Out</i> , Primero en Entrar Primero en Salir. |
| FM | <i>Frequency Modulation</i> , Modulación de Frecuencia. |
| FSK | <i>Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Frecuencia. |
| GFSK | <i>Gaussian Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de |

| | |
|--------------|--|
| | Frecuencia Gaussiana. |
| GNTT | Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones. |
| GRIAL | Grupo de Radio e InALámbricas. |
| GUI | <i>Graphical User Interfaces</i> , Interfaces Gráficas de Usuario. |
| IDE | <i>Integrated Development Environment</i> , Entorno de Desarrollo Integrado. |
| ISI | <i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica. |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros. Eléctricos y Electrónicos. |
| ISM | <i>Industrial, Scientific, and Medical</i> , Industrial, Científica y Médica. |
| JTAG | <i>Join Test Action Group</i> , Grupo de Acción de Prueba Conjunta |
| LNA | <i>Low Noise Amplifier</i> , Amplificador de Bajo Ruido. |
| LED | <i>Ligth Emitting Diode</i> , Diodo Emisor de Luz |
| LQI | <i>Link Quality Inidcator</i> , Indicador de Calidad de Enlace |
| MCU | <i>MicroControlled Unity</i> , Unidad MicroControlada |
| MRFI | <i>Minimal Radio Frequency Interface</i> , Interfaz Mínima de Radio Frecuencia. |
| MSK | <i>Minimum-Shift Keying</i> , Modulación de Mínima Separación de Frecuencia. |
| MVC | <i>Model View Controller</i> , Modelo Vista Controlador. |
| NRZ | <i>Non Return to Zero</i> , No Retorno a Cero. |
| PA | <i>Power Amplifier</i> , Amplificador de Potencia |
| PAN | <i>Personal Area Network</i> , Red de Área Personal. |
| PC | <i>Personal Computer</i> , Personal Computer |
| POO | Programación Orientada a Objetos. |
| P2P | <i>Peer To Peer</i> , Punto a Punto. |
| RISC | <i>Reduced Instruction Set Computer</i> , Computador con Conjunto de Instrucciones Reducido. |
| RF | <i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia. |
| Rx | <i>Receiver</i> , Receptor. |

| | |
|--------------|---|
| RSSI | <i>Received Signal Strength Indicator</i> , Indicador de Intensidad de Señal Recibida. |
| SBR | <i>Shooting and Bouncing Ray</i> , Disparo y Rebote de Rayo . |
| SBW | <i>Spy By Wire</i> , Espía Por Cable |
| TI | <i>Texas Instruments</i> ®. |
| Tx | <i>Transmitter</i> , Transmisor. |
| UART | <i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> , Transmisor Receptor Asíncrono Universal. |
| USB | <i>Universal Serial Bus</i> , Bus Serial Universal |
| USCI | <i>Universal Serial Communication Interface</i> , Interfaz de Comunicación Serial Universal. |
| UTD | <i>Uniform Theory of Diffraction</i> , Teoría Uniforme de Difracción. |
| WPAN. | <i>Wireless Personal Area Network</i> , Red Inalámbrica de Área Personal. |

RESUMEN

En el presente trabajo de grado se describe el desarrollo, implementación, evaluación y análisis, en diferentes escenarios y ante interferencia de un sistema inalámbrico punto a multipunto de comunicación de datos vía radio en la banda para aplicaciones Industriales Científicas y Médicas (ISM *Industrial, Scientific, and Medical*) en 2,4 GHz, el cual incluye la implementación de un protocolo llamado SimplicTI®, propiedad de Texas Instruments® que brinda facilidades de direccionamiento, control de acceso y control de sesión. Inicialmente se presenta la teoría base e introductoria, necesaria para comprender el funcionamiento del sistema de comunicaciones implementado, posteriormente se define y explica el diseño y arquitectura empleada, donde se hace la descripción de los componentes que conforman el sistema junto con su respectiva implementación. Finalmente se mencionan las pruebas funcionales realizadas al sistema, para obtener los resultados y luego sobre estos realizar el análisis, a partir del cual se generan las conclusiones, recomendaciones y sugerencias para trabajos futuros relacionados con el trabajo de grado.

Los resultados obtenidos en presente trabajo de grado sirven como soporte para el trabajo de investigación llamado “Prototipo de Comunicación de Datos Multipropósito Vía Radio de Corto Alcance en 2,4 GHz”, aprobado y financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones, el cual es realizado por el grupo Grupo de Radio e Inalámbricas GRIAL y el grupo GNTT de la Universidad del Cauca

INTRODUCCION

Desde el surgimiento de los sistemas de telecomunicaciones en la primera mitad del siglo XIX, la evolución de los mismos se ha dado a pasos agigantados. Durante el proceso de evolución de estos sistemas, han aparecido diferentes tipos de tecnologías, tales como las tecnologías cableadas y las tecnologías inalámbricas. Entre las tecnologías inalámbricas se encuentran las que hacen uso de ondas electromagnéticas moduladas para transmitir información de un lugar a otro y las que emplean medios ópticos tales como infrarrojos o laser. Las características que brindan ventajas a los sistemas inalámbricos son [1]:

- **Flexibilidad:** capacidad para adaptarse a cambios en las condiciones de diseño o implementación de un sistema de comunicación en particular.
- **Movilidad:** capacidad para seguir operando aún cuando el sistema o parte de él esté en movimiento.
- **Escalabilidad:** capacidad de crecimiento.
- **Fácil instalación:** no requiere mayores adecuaciones de infraestructura para su instalación.
- **Bajo costo:** no necesita mayores adecuaciones físicas, o una infraestructura externa considerable, por lo tanto es relativamente económico.

Debido a estas ventajas los sistemas inalámbricos se han convertido en una de las opciones de comunicación más deseadas por los usuarios a pesar de tener desventajas tales como:

- **Baja velocidad de transmisión de datos:** debido a limitaciones en el ancho de banda y los fenómenos o perturbaciones presentes en el canal.
- **Pérdida de la información:** debido a diversos fenómenos físicos tales como ruido, interferencia, y dispersión.

En el presente trabajo de grado se describe el desarrollo, implementación, evaluación y análisis en diferentes escenarios y ante interferencia de un sistema de comunicación de datos vía radio punto a multipunto en 2,4 GHz el cual incluye la implementación de un protocolo que brinda facilidades direccionamiento¹, control de acceso² y control de sesión³, llamado SimpliciTI[®], protocolo propietario de Texas Instruments[®].

¹ El direccionamiento permite identificar a los distintos dispositivos de una red, asignando a cada uno un identificador único, llamado en forma genérica dirección. Las direcciones permiten el envío de información entre los dispositivos.

² El control de acceso al medio en telecomunicaciones, es el conjunto de mecanismos y protocolos mediante los cuales varios "interlocutores" (dispositivos en una red, como computadores, teléfonos móviles, etc.) son coordinados para compartir un medio de transmisión común (por lo general, un cable eléctrico u óptico, o en comunicaciones inalámbricas el rango de frecuencias asignado al sistema).

El documento final de trabajo de grado incluye 5 capítulos: El capítulo 1, presenta la teoría base e introductoria necesaria para comprender el funcionamiento del sistema de comunicaciones implementado. En el capítulo 2 se describe las herramientas utilizadas para la implementación del sistema de comunicaciones punto a multipunto vía radio en la banda de 2,4 GHz. En el capítulo 3 se define y explica el diseño y arquitectura empleada, donde se hace la descripción de los componentes que conforman el sistema de comunicaciones, junto con su respectiva implementación. En el capítulo 4, se describe el plan de pruebas realizadas para la evaluación del sistema de comunicaciones implementado y los resultados que se obtuvieron para realizar el análisis. En el capítulo 5 se muestran las conclusiones, recomendaciones y sugerencias para trabajos futuros relacionados con el trabajo de grado. Los resultados obtenidos en presente trabajo de grado sirven como soporte para el trabajo de investigación llamado “Prototipo de Comunicación de Datos Multipropósito Vía Radio de Corto Alcance en 2,4 GHz”, aprobado y financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones, el cual es realizado por el grupo Grupo de Radio e Inalámbricas GRIAL y el grupo GNTT de la Universidad del Cauca

³ En este documento, se entiende por control de sesión a establecer una comunicación entre dos actores, definir quién es el transmisor quien el receptor, y supervisar la comunicación durante su realización.

Capítulo 1 GENERALIDADES.

1.1 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICOS

Las comunicaciones inalámbricas permiten la transmisión de información a través del espacio libre empleando ondas electromagnéticas ya sean de tipo óptico como laser e infrarrojos, o de Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*), las cuales viajan por el espacio libre (aire) transportando información desde el Transmisor (Tx, *Transmitter*) hasta el Receptor (Rx, *Receiver*). Los dispositivos que se comunican a través de laser e infrarrojos, son altamente directivos, lo cual hace necesario tener una alineación entre el Transmisor y el Receptor; este hecho limita el campo de aplicación de este tipo de sistemas inalámbricos. Por otra parte, las comunicaciones realizadas por medio de RF, pueden ser tanto unidireccionales como omnidireccionales, en este último caso, los dispositivos involucrados en la comunicación no están restringidos a permanecer en posiciones fijas. Gracias a esto, los sistemas de comunicación inalámbricos basados en RF poseen características deseables tales como la movilidad, flexibilidad y escalabilidad, siendo estas sus principales ventajas en relación con los sistemas de comunicación cableados [1].

1.1.1 Descripción de los Componentes de un Sistema de Comunicaciones Inalámbrico.

Un sistema de comunicaciones se compone de una fuente de información, un transmisor, un canal de comunicaciones un receptor y un destino de la información [2], como se describe en la figura 1.1. Cada uno de sus componentes cumple funciones específicas:

- **Transmisor.**

El transmisor es el encargado de recibir la señal mensaje de la fuente de información y adaptarla al canal para ser enviada. Para realizar esta adaptación, el transmisor ejecuta diferentes procesos dependiendo del sistema de comunicaciones, ya sea analógico o digital. Uno de estos procesos es la modulación. Existen diferentes formas de modular una señal, entre las modulaciones analógicas están: la modulación en amplitud (AM, *Amplitude Modulation*), modulación en frecuencia (FM, *Frequency Modulation*) modulación en frecuencia y modulación en fase (PM, *Phase Modulation*), y entre las modulaciones digitales están : La Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK, *Frequency Shift Keying*), Modulación de Mínima Separación de Frecuencia (MSK, *Minimum-Shift Keying*), etc. Más adelante se describirá de manera más específica las modulaciones que se emplearon en el sistema de comunicaciones implementado [3].

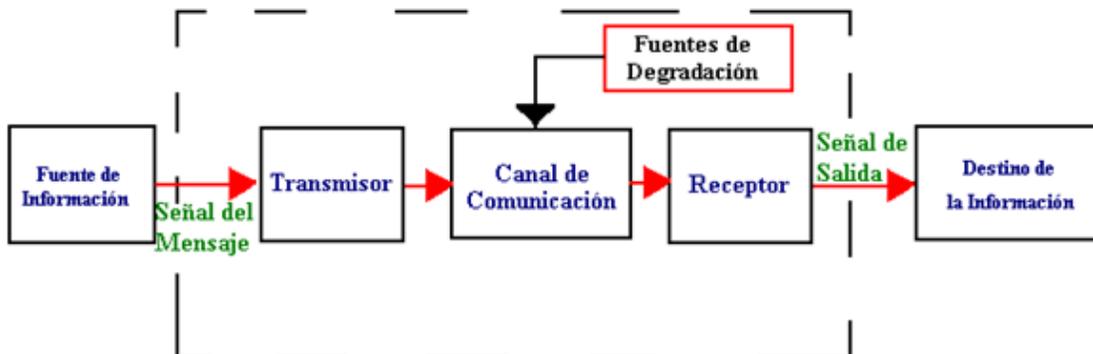
- **Canal.**

El canal es medio por el cual se transmite la señal modulada con la información de intercambio entre el Tx y Rx, en el caso de los sistemas inalámbricos este medio de transmisión es el aire o el vacío.

- **Receptor.**

Al receptor llega la información que fue transportada a través del canal, y este realiza el proceso de demodulación, proceso contrario al que realizó el transmisor permitiendo recuperar la señal de información, lo más parecida posible a la señal entregada por la fuente de información al transmisor

Figura 1.1 Modelo en Bloques de un Sistema de Comunicaciones.



1.1.2 Modulación de Señales Digitales

Se entiende por modulación, al conjunto de técnicas que permiten que una onda electromagnética de tipo sinusoidal, denominada portadora, transporte información de un lugar a otro mediante la modificación sistemática de uno de sus parámetros tales como amplitud, frecuencia o fase, de acuerdo con la variación de la señal de información, denominada moduladora. En sistemas inalámbricos la modulación es necesaria debido a que las señales de información, no poseen características adecuadas para ser radiadas, mientras que las señales de altas frecuencias usadas como portadoras, sí las poseen. Además, la modulación, permite que varias fuentes de información compartan un mismo medio y que se haga un uso eficiente del ancho de banda disponible [3].

La señal moduladora puede ser de naturaleza analógica o digital, sin embargo el objeto de estudio se limita a las comunicaciones de datos, las cuales emplean únicamente modulaciones digitales, por lo tanto en este capítulo solo se considerará este tipo de modulaciones.

Entre las modulaciones digitales se encuentran las modulaciones binarias y las modulaciones multinivel. En las modulaciones binarias se transmite un bit a la vez y la señal modulada presenta únicamente dos estados, que corresponden al 0 binario y al 1 binario. En las modulaciones multinivel, pueden transmitirse mediante un solo estado de la señal modulada, grupos de bits denominados símbolos, lo cual reduce el ancho de banda necesario para transmitir pero aumenta la complejidad del sistema. Debido a que las tecnologías que serán empleadas para el desarrollo del presente trabajo de grado emplean únicamente modulaciones binarias, en este documento solamente se tratará esta clase de modulaciones.

Teniendo en cuenta las limitaciones de la tecnología que se va a utilizar para el desarrollo de este trabajo, se considerarán específicamente las siguientes modulaciones:

- ASK
- FSK
- GFSK
- MSK

1.1.2.1 Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK)

Es una forma de modulación en la cual los datos se representan como variaciones de amplitud de una señal portadora de tipo sinusoidal. En esta modulación la amplitud de la señal modulada varía entre dos valores, los cuales corresponden al 1 binario y al cero binario. La forma más simple y común de ASK funciona como un interruptor de encendido y apagado, de tal forma que la presencia de portadora indica un 1 binario y su ausencia un 0. La expresión de la señal ASK modulada está dada por la ecuación 1.1 [3], [4]:

$$s_{ASK}(t) = s(t)\text{sen}(2\pi f_c t) \quad (1.1)$$

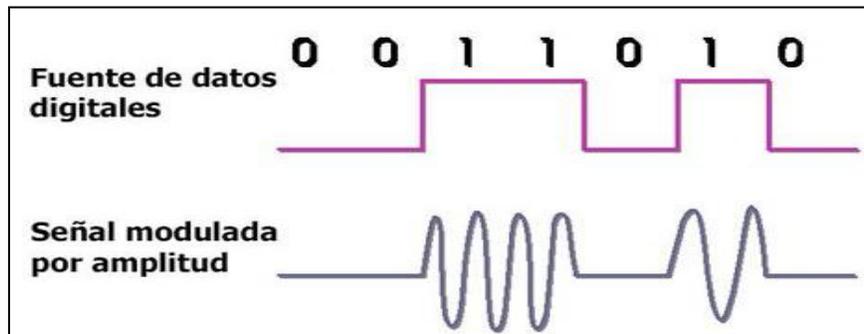
Donde:

$s_{ASK}(t)$: señal modulada con el esquema de modulación ASK.

$s(t)$: señal binaria unipolar No Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*)

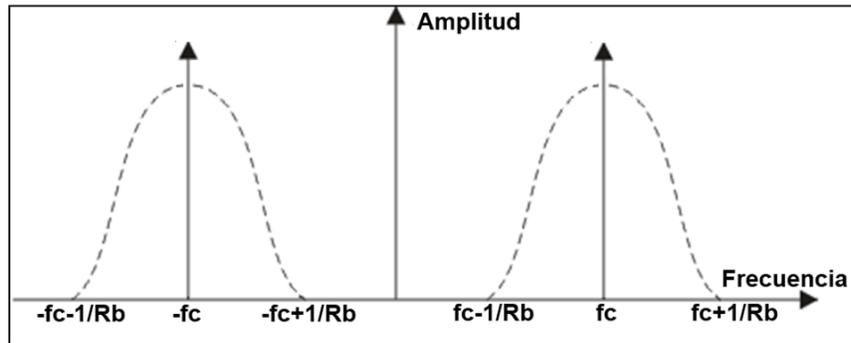
f_c : frecuencia de la señal portadora.

Figura 1.2 Modulación ASK



En el dominio de la frecuencia, la modulación ASK produce un desplazamiento en frecuencia, que traslada la frecuencia central del espectro de banda base hacia la frecuencia de la portadora, como se observa en la figura 1.3. Además, se produce un impulso en la frecuencia de la portadora, el cual representa una componente sinusoidal pura cuya frecuencia es la frecuencia de la portadora. El ancho de banda de la señal modulada es $2/R_b$, donde R_b es la velocidad de transmisión de datos de la señal $s(t)$.

Figura 1.3 Espectro de la Modulación ASK



Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK)

Es una forma de modulación en la cual los datos se representan como variaciones de frecuencia de la onda portadora. En esta modulación la frecuencia de la señal modulada varía entre dos valores, los cuales corresponden al 1 binario y al 0 binario respectivamente. La expresión de la señal FSK modulada está dada por la ecuación 1.2 [4], [5]:

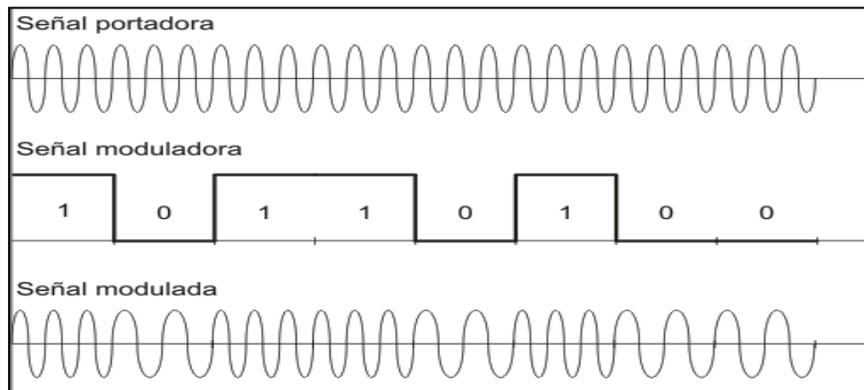
$$s_{FSK}(t) = s(t)\sin(2\pi f_1 t) + [1 - s(t)]\sin(2\pi f_0 t) \tag{1.2}$$

Donde:

- $s_{FSK}(t)$: señal modulada con el esquema de modulación FSK.
- $s(t)$: señal binaria codificada en forma unipolar NRZ.
- f_0 : frecuencia correspondiente al 0 binario de la señal $s(t)$.
- f_1 : frecuencia correspondiente al 1 binario de la señal $s(t)$.

La figura 1.4 muestra un ejemplo de modulación FSK.

Figura 1.4 Modulación FSK



En la modulación FSK, se tiene que un 1 lógico se representa mediante una desviación positiva o incremento de la frecuencia de la señal portadora, mientras que un 0 lógico se representa mediante una desviación negativa o decremento de la frecuencia de la misma. De esta manera, las frecuencias que representan un 1 y un 0 se denominan frecuencias

de marca (f_1) y espacio (f_0) respectivamente, y se encuentran separadas entre sí $2\Delta f$, en donde Δf se denomina desviación de frecuencia [6]. Las ecuaciones 1.3 muestran la relación entre las frecuencias de marca y espacio y la desviación de frecuencia

$$\begin{aligned} f_0 &= f_c - \Delta f \\ f_1 &= f_c + \Delta f \end{aligned} \quad (1.3)$$

f_0 : frecuencia correspondiente al 0 binario de la señal de información [seg^{-1}].

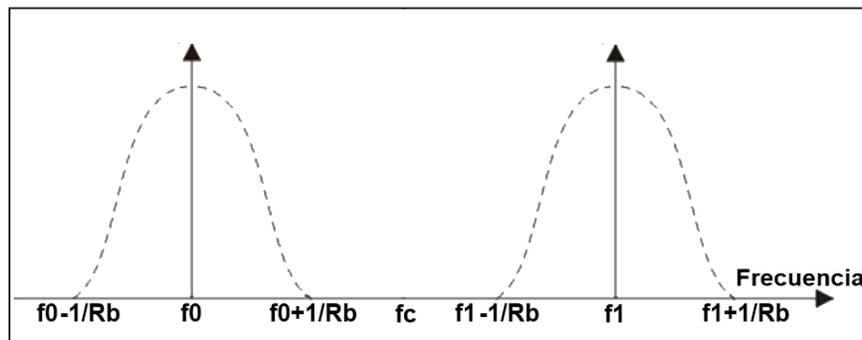
f_1 : frecuencia correspondiente al 1 binario de la señal de información [seg^{-1}].

f_c : frecuencia de la señal portadora [seg^{-1}].

Δf : desviación de frecuencia [seg^{-1}].

La ecuación 1.2 permite representar a la señal FSK como la suma de dos señales ASK; la primera es modulada directamente por la señal $s(t)$ con una frecuencia de portadora f_1 y la segunda es modulada por el complemento de la señal $s(t)$ con una frecuencia de portadora f_0 , por lo tanto el espectro de la señal modulada con el esquema de modulación FSK, se forma por la superposición de los espectros de las dos señales ASK, como se muestra en la figura 1.5.

Figura 1.5 Espectro de la Modulación FSK



Se observa que para evitar el traslape entre los dos espectros ASK, la separación de frecuencias debe cumplir la restricción mostrada en la ecuación 1.3 de modo que la mínima separación entre las frecuencias f_0 y f_1 sea el doble de la velocidad de transmisión de la señal $s(t)$

$$\Delta f \geq R_b \quad (1.3)$$

Donde

Δf : Desviación de frecuencia pico de la portadora [seg^{-1}].

R_b : Velocidad de transmisión de datos. [seg^{-1}]

En la figura 1.5 también se observa que en las frecuencias f_1 y f_2 existen impulsos que representan las componentes sinusoidales puras correspondientes a estas frecuencias. Además, se puede deducir fácilmente que el ancho de banda de la señal FM está dado por la ecuación 1.4

$$BW = 2(\Delta f + R_b) \quad (1.4)$$

Donde

BW : Ancho de Banda (BW , *Band Width*) [seg^{-1}].

Δf : Desviación de frecuencia [seg^{-1}].

R_b : Velocidad de transmisión de datos. [seg^{-1}]

1.1.2.2 Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana GFSK

La Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana (GFSK, *Gaussian Frequency Shift Keying*) es una variante de la modulación FSK en la cual la señal moduladora binaria es filtrada por medio de un filtro gaussiano, como se observa en la figura 1.6. El propósito de este filtrado es hacer un uso más eficiente del ancho de banda de la modulación FSK. La figura 1.7 muestra una comparación entre el espectro de una modulación FSK y el de una modulación GFSK. En dicha figura puede observarse que el espectro correspondiente a la modulación GFSK es más estrecho que el espectro de la modulación FSK [5].

Figura 1.6 Modulación GFSK

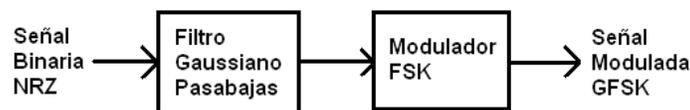
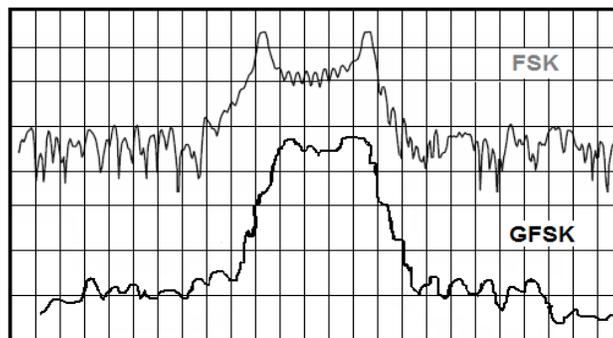


Figura 1.7 Comparación de Espectros FSK y GFSK.



Un parámetro importante en la modulación GFSK es el producto Ancho de Banda por Tiempo (BT , *Bandwidth Time product*) La figura 1.8 [5] muestra la variación del espectro de una señal modulada GFSK en el dominio de la frecuencia para diferentes valores de BT . Se observa que a medida que BT disminuye, los niveles de los lóbulos se atenúan lateralmente considerablemente.

La disminución del ancho de banda del filtro, disminuye el ancho de banda requerido (mayor eficiencia espectral), pero incrementa la Interferencia Intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*), como se observa en la figura 1.9, donde el diagrama de ojo se encuentra perfectamente abierto para $BT=0.6$ y a medida que este valor disminuye el diagrama va cerrando su apertura paulatinamente [5].

Figura 1.8 Densidad Espectral de Potencia de una Señal GFSK para Diferentes Valores de BT.

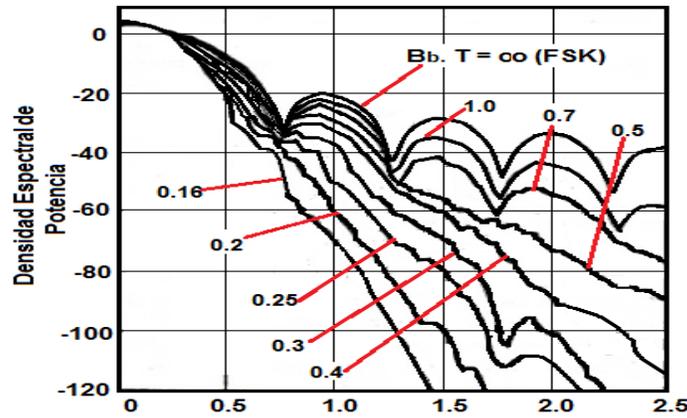
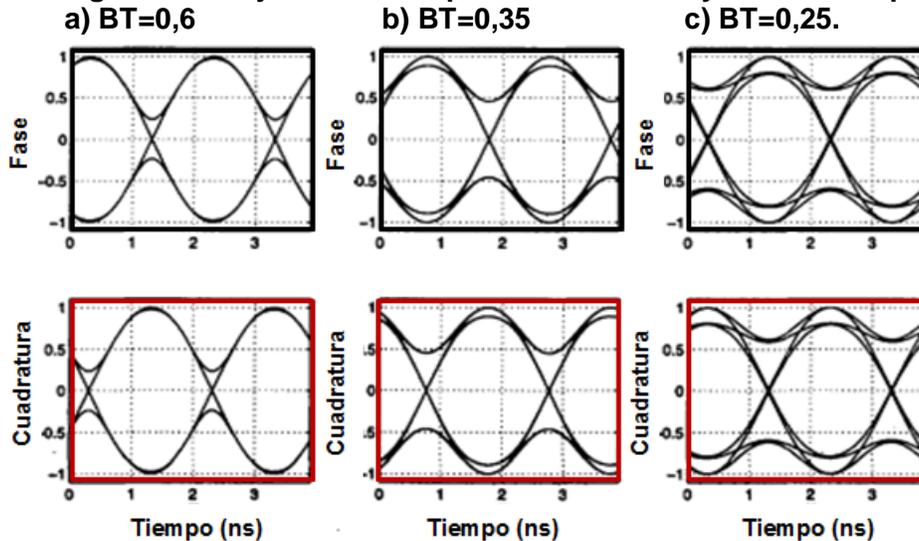


Figura 1.9 Diagrama del Ojo de las Componentes en Fase y Cuadratura para GFSK.



El filtro gaussiano pasa bajo utilizado en la modulación GFSK limita las componentes de frecuencia de acuerdo al valor del parámetro BT indicado.

1.1.2.3 Modulación de Mínima Separación de Frecuencia (MSK)

La modulación MSK puede interpretarse como un caso especial de la modulación FSK denominado FSK de fase continua. En esta modulación los cambios de estado de la señal moduladora, la señal modulada no producen discontinuidades en la fase. La expresión para la señal modulada MSK se muestra en la ecuación 1.5 [6].

$$s_{MSK}(t) = \cos \left\{ 2\pi \left[f_c + \frac{R_b}{2} \left(\frac{1}{2} - s(t) \right) \right] t + \phi(t) \right\} \quad (1.5)$$

Donde:

f_c : frecuencia de la portadora [seg^{-1}].

$s(t)$: señal binaria codificada en forma unipolar NRZ.

R_b : Velocidad de transmisión de datos. [seg^{-1}]

$\phi(t)$: fase de la señal durante la transmisión. Esta toma los valores 0 o 180° y permanece constante durante el intervalo de tiempo correspondiente a cada bit de la señal $s(t)$.

A partir de la ecuación 1.5 se observa que la frecuencia correspondiente a un cero binario es $f_c - R_b/4$ mientras que la frecuencia correspondiente a un uno binario es $f_c + R_b/4$. Como resultado de esto, la separación entre las frecuencias f_0 y f_1 es $R_b/2$ [6].

Es posible demostrar que la señal modulada MSK puede expresarse como lo muestra la ecuación 1.6, en la cual se expresa en términos de las componentes en fase y en cuadratura de la señal moduladora $s(t)$ ⁴. En esta expresión puede verse, además, que cada bit de la componente en fase es multiplicado por la señal $\cos(\pi R_b t/2)$ mientras que cada bit de la componente en cuadratura se multiplica por $\text{sen}(\pi R_b t/2)$. Estas señales transforman los pulsos rectangulares en pulsos de forma sinusoidal, lo cual permite la continuidad en fase propia de MSK [6].

$$s_{MSK}(t) = b_I(t)\cos\left(\frac{\pi R_b t}{2}\right)\cos(2\pi f_c t) + b_Q(t)\text{sen}\left(\frac{\pi R_b t}{2}\right)\text{sen}(2\pi f_c t) \quad (1.6)$$

Donde:

f_c : frecuencia de la portadora [seg^{-1}].

$b_I(t)$: componente en fase de la señal moduladora, expresada en forma bipolar NRZ.

$b_Q(t)$: componente en cuadratura de la señal moduladora en forma bipolar NRZ.

R_b : velocidad de Transmisión de Datos [seg^{-1}].

En la figura 1.10 se muestran las formas de onda de las señales relacionadas con una modulación MSK. En este caso la componente en fase y la componente en cuadratura, transportan 3 bits de información cada una. Los bits de la componente en fase son 1,0 y 0 mientras que los bits de la componente en cuadratura son 1, 1 y 0. La figura 1.9 a) muestra la forma de onda de los pulsos sinusoidales correspondientes a los bits de la componente en fase mientras que la figura 1.9 c) muestra la forma de onda de los pulsos sinusoidales correspondientes a los bits de la componente en cuadratura. Puede observarse que entre ellas existe un desfase igual a T_b que corresponde al tiempo de un bit de la señal moduladora y que el tiempo de duración de un bit en cada componente es $2T_b$, es decir, el doble del tiempo de un bit en la señal moduladora original. En la figura 1.9 b) y d) se muestra el resultado de modular las señales $\cos(2\pi f_c t)$ y $\text{sen}(2\pi f_c t)$ con los

⁴ Las componentes en fase y en cuadratura se obtienen dividiendo el flujo de bits original de la señal $s(t)$ en dos subflujos de bits, cada uno con una velocidad de transmisión de bits igual a la mitad de la velocidad del flujo original. El primer subflujo corresponde a la componente en fase y el segundo a la componente en cuadratura. Los dos subflujos tienen un desfase temporal igual al tiempo de duración de un bit del flujo original. Esta división se realiza para cada par de bits del flujo original, asignando el primer bit al subflujo de la componente en fase y el segundo bit al subflujo de la componente en cuadratura.

pulsos sinusoidales de la figuras 1.10 a) y c) respectivamente. La señal resultante para la modulación MSK es la suma de las señales mostradas en la figura 1.10 b) y d) y es mostrada en la figura 1.11 [6].

Figura 1.10 Formas de Onda Presentes en la Modulación MSK.

- a) Pulsos Coseno de la Componente en Fase b) Portadora Coseno Modulada por los Pulsos Coseno de la Componente en Fase c) Pulsos Seno de la Componente en Cuadratura d) Portadora Seno Modulada por los Pulsos de la Seno de la Componente en Cuadratura

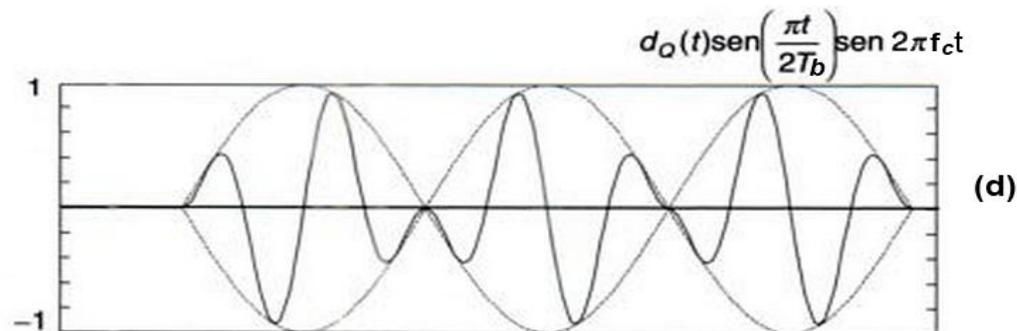
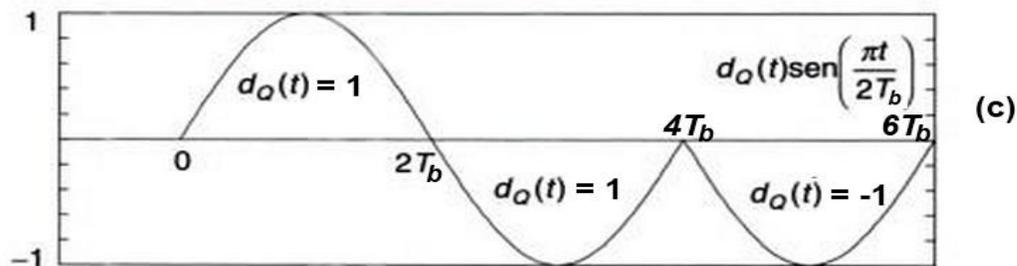
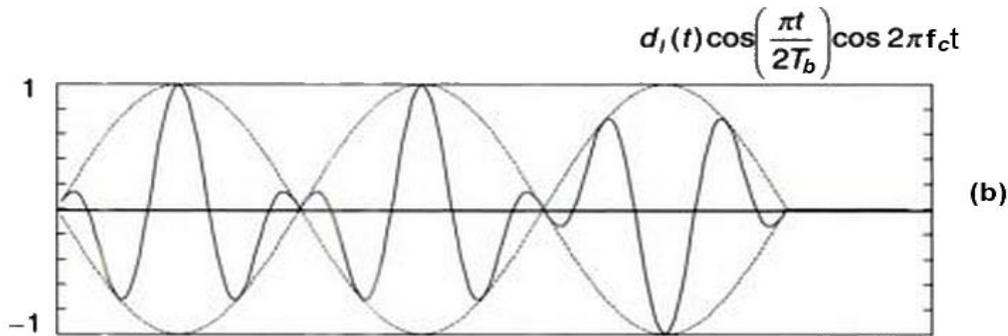
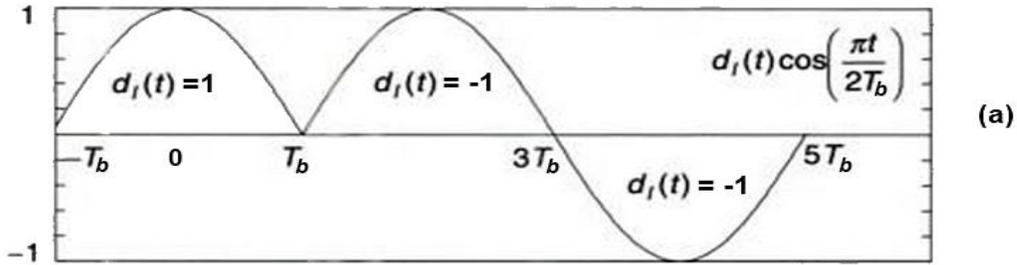
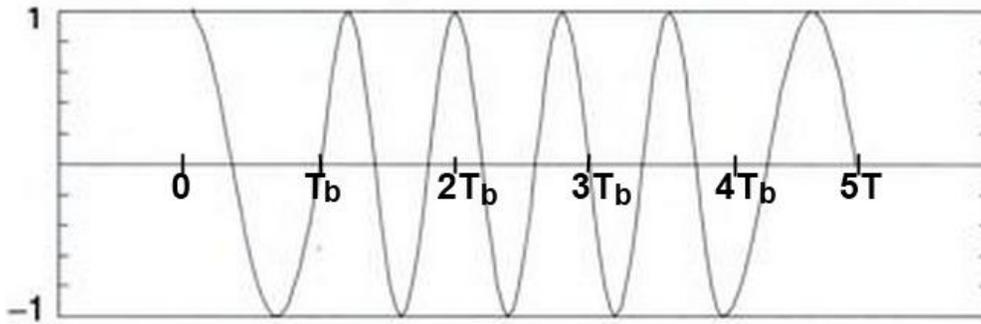


Figura 1.11 Señal modulada MSK.



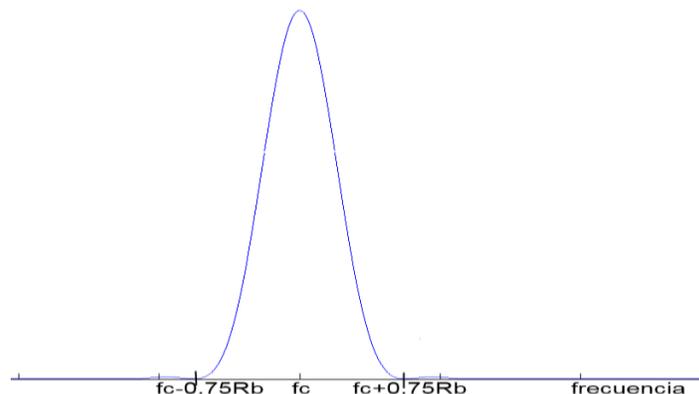
La señal modulada MSK se divide en intervalos de tiempo de duración igual al tiempo de un bit de la señal moduladora $s(t)$. En cada intervalo, puede cambiar la frecuencia y la fase de la señal modulada, de acuerdo con los valores de los bits correspondientes a la componente en fase y en cuadratura durante dicho intervalo de tiempo. Debido al desfase de T_b que existe entre la componente en fase y la componente en cuadratura, solamente es posible que cambie máximo un bit entre un intervalo y otro. Esto garantiza la continuidad de fase en la señal modulada. La tabla 1.1 muestra los cuatro posibles estados de la señal modulada [6].

Tabla 1.1 Posibles Estados de la Señal Modulada MSK Durante un Intervalo de Tiempo Correspondiente al Tiempo de un Bit de la señal Moduladora.

| Señal modulada | $d_i(t)$ | $d_q(t)$ |
|-------------------------------|----------|----------|
| $sen[2\pi(f + R_b/4)t + \pi]$ | 0 | 0 |
| $sen[2\pi(f - R_b/4)t]$ | 1 | 0 |
| $sen[2\pi(f - R_b/4)t + \pi]$ | 0 | 1 |
| $sen[2\pi(f + R_b/4)t]$ | 1 | 1 |

Desde el punto de vista espectral el uso de pulsos sinusoidales reduce los lóbulos laterales, sin embargo, aumenta el ancho de banda en banda base de los pulsos. La figura 1.12 muestra el espectro de la modulación MSK. En ella puede observarse que los nulos del espectro están separados $0.75R_b$ de la frecuencia de la portadora; como consecuencia, el ancho de banda es aproximadamente $1.5R_b$ [6].

Figura 1.12 Espectro de la Modulación MSK



1.2 REDES DE ÁREA PERSONAL

Una red es una interconexión de varios nodos (Dispositivos), en el caso de las redes inalámbricas la interconexión para la transmisión de información entre estos dispositivos no se hace por un medio un medio guiado, en lugar de esto, emplean ondas electromagnéticas ya sean de tipo óptico como laser e infrarrojos, o de radio frecuencia.

Una Red de Área Personal (PAN, *Personal Area Network*) se define para un alcance reducido de máximo 30m, donde se interconectan dispositivos electrónicos de corto alcance. La tecnología más comúnmente utilizada en este tipo de redes es Bluetooth, la cual opera en la banda de frecuencias de 2,4 GHz, pero existen diversas tecnologías que funcionan en esta misma banda [7].

1.2.1 Topologías de Red

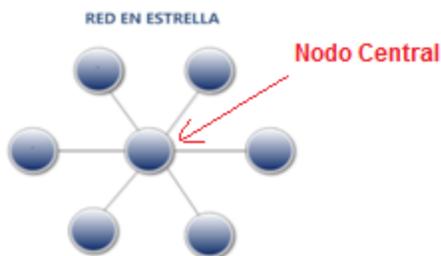
Las redes se clasifican según su topología en:

- **Redes en Estrella (Star).**

La topología en estrella define una conexión física de los nodos de forma que los nodos periféricos estén conectados a un nodo central, para establecer una comunicación entre nodos toda la información debe pasar por el nodo central, como se puede observar en la figura 1.13 [8].

Una de las principales desventajas de este tipo de redes que la carga recae sobre el nodo central, la cantidad de tráfico que este nodo debe soportar es muy grande, y aumenta conforme crece el número de periféricos en la red, además de esto la red es vulnerable a fallos de comunicación, ya que si el nodo central es afectado, se interrumpe la comunicación entre todos los perdedores, fallando todos los envíos de mensajes [8].

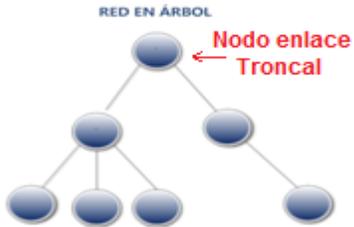
Figura 1.13 Red en Estrella



- **Redes en Árbol.**

La topología de árbol define una forma de conexión en la cual los nodos se conectan en forma de árbol, una conexión semejante a conectar en serie varias redes en estrella, pero a diferencia de las redes en estrella, este tipo de redes no posee un nodo central, sino un nodo de enlace troncal como se muestra en la figura 1.14.

Figura 1.14 Red en Árbol



- **Redes Punto a Punto.**

En la topología punto-a-punto (P2P, *peer-to-peer*) conecta dos dispositivos o nodos directamente. En un enlace P2P, dos dispositivos monopolizan un medio o canal de comunicación. Debido a que no se comparte el canal, no es necesaria la identificación de los dispositivos, y por lo tanto, no hay necesidad de protocolos de direccionamiento.

- **Redes Punto a Multipunto.**

La topología punto a multipunto interconecta varios nodos a un nodo formando un sistema de comunicación y debido a que en este tipo de topología se comparte un canal común, es necesario identificar los nodos e implementar protocolos de direccionamiento, para una correcta comunicación entre nodos.

La topología de red muestra como los diferentes nodos o dispositivos están conectados entre sí, y determina la forma en la que estos se comunican.

Capítulo 2 HERRAMIENTAS DE DESARROLLO

En el presente capítulo, se realiza una descripción del kit de desarrollo eZ430-RF2500 de Texas Instruments® (TI) y de las herramientas *software* necesarias para el desarrollo de aplicaciones que empleen dicho kit.

El eZ430-RF2500 es una herramienta de desarrollo inalámbrico completa, que provee todo el *hardware* y *software* para la evaluación del microcontrolador MSP430F2274 y del transceptor inalámbrico en la banda de 2,4GHz CC2500 [9].

A nivel *hardware* el kit se compone de dos tarjetas de desarrollo eZ430-RF2500T, una interfaz de programación y depuración eZ430-RF para el Bus Serial Universal (USB, *Universal Serial Bus*) y un soporte para baterías AAA con tarjeta de conexión, lo cual puede observarse en la figura 2.1.

Figura 2.1 Componentes *Hardware* del Kit de Desarrollo EZ430-RF2500



A nivel *software* el kit eZ430-RF2500 incluye los Entornos de Desarrollo Integrados (IDE, *Integrated Development Environment*) *IAR Embedded Workbench Kick Start for MSP430* versión 4.21 y *Code Composer Studio* (CCS) versión 4.02. Las dos herramientas tienen una licencia limitada, la cual restringe el tamaño del código desarrollado a un máximo de 4KB en el caso de *IAR Embedded Workbench*® y de 16KB para el CCS. También incluye el *software* eZ430-RF2500 Sensor Monitor, el cual es una aplicación de ejemplo que emplea el protocolo SimpliciTI® en una red de sensores de temperatura. Este *software*

incluye tanto el código fuente del *firmware* de las tarjetas eZ430-RF2500T como la aplicación *Wireless Sensor Monitor*, la cual es una aplicación de escritorio que permite visualizar desde un computador los datos enviados por los dispositivos presentes en la red de sensores.

Adicionalmente, el kit incluye las hojas de especificaciones del kit de desarrollo eZ430-RF2500, del microcontrolador MSP430F2274 y del transceptor CC2500, así como la documentación del eZ430-RF2500 Sensor Monitor.

2.1 LA TARJETA EZ430-RF2500T

La tarjeta eZ430-RF2500T es un sistema inalámbrico “*Out of the Box*”⁵, que puede ser usado como sistema independiente o en comunicación con un sistema de cómputo conectado a ella por medio de la interfaz USB de depuración [9].

La figura 2.2 muestra los componentes más importantes de la tarjeta eZ430-RF2500T. El control principal de la tarjeta lo realiza el microcontrolador MSP430F2274, cuya descripción detallada se realizará en la sección 2.1.1 La tarjeta de desarrollo proporciona puntos de conexión para acceder externamente a 18 de los pines del microcontrolador brindando la posibilidad de integrar la tarjeta con diversos tipos de sistemas electrónicos. La mayoría de estos pines no son usados dentro de la tarjeta y por lo tanto son pines de propósito general cuyo comportamiento debe ser programado en el *firmware* del microcontrolador, sin embargo algunos de los pines son usados en la comunicación entre el microcontrolador y el transceptor inalámbrico, permitiendo el acceso exterior a ellos solamente con propósitos de depuración.

Otro componente esencial de la tarjeta es el transceptor inalámbrico CC2500, el cual opera en la banda de 2,4 GHz y que será detallado en la sección 2.1.1.2. Otros componentes adicionales de la tarjeta son: la antena, un cristal de 16 MHz que controla la frecuencia de operación el microcontrolador y del transceptor, dos Diodos Emisores de Luz (LED, *Ligth Emmiting Diode*) indicadores y un botón con capacidad para generar interrupciones, el cual puede ser usado para permitir al usuario el inicio de algunas tareas.

2.1.1. Microcontrolador MSP430F2274

Es un microcontrolador de ultra bajo consumo de energía, desarrollado por TI, cuyo diseño se realizó especialmente para lograr una larga duración de baterías en aplicaciones de medición portables. Este microcontrolador se caracteriza por tener un procesador RISC⁶ de 16 bits, registros de 16 bits y Generadores de Constantes⁷ (CG, *Constant Generator*), lo cual contribuye a la máxima eficiencia del código [10]. La figura 2.3 muestra el diagrama en bloques funcionales de este microcontrolador. La figura A.1 del anexo A muestra la configuración de pines del microcontrolador MSP430F2274.

⁵ Un sistema “Out of The Box”, es un sistema que está listo para ser usado, es decir que no requiere armar ni instalar componentes adicionales para ser utilizado.

⁶ Computador con Conjunto de Instrucciones Reducido (RISC, *Reduced Instruction Set Computer*)

⁷ Los generadores de constantes son una característica propia de los microcontroladores de TI®. Son registros que permiten reducir el tiempo de ejecución de instrucciones que emplean constantes.

Figura 2.2 Tarjeta de Desarrollo EZ430-RF2500T

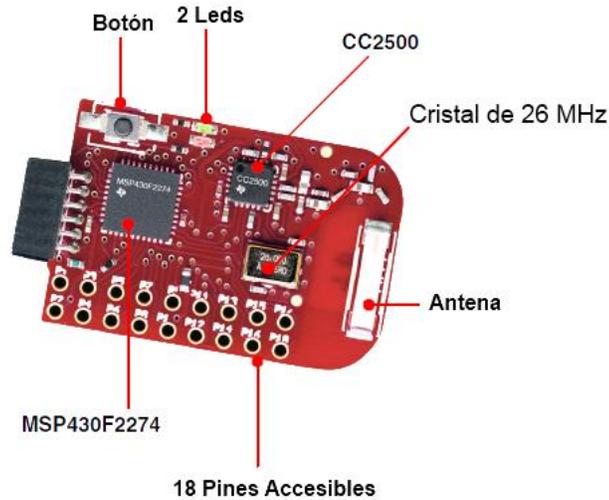
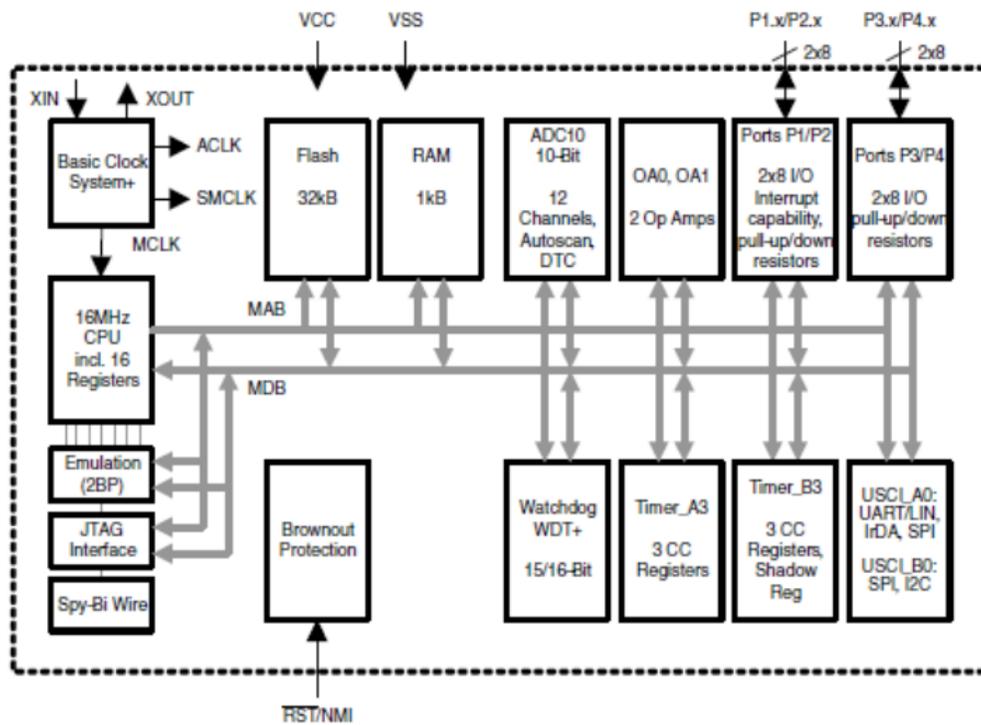


Figura 2.3 Diagrama en Bloques Funcionales del Microcontrolador MSP430F2274



Las principales características del microcontrolador MSP430F2274 son [10]:

- Voltaje de alimentación entre 1,8 y 3,6
- Oscilador interno o externo hasta de 16 MHz, con 7 posibles configuraciones.
- Ultra bajo consumo de energía
- Despertar ultra rápido desde el modo de espera en menos de 1 μ s
- Memoria Flash de programa de 32KB
- Memoria RAM de 1KB

- Dos temporizadores de 16 bits (timerA, timerB), cada uno con tres registros de captura/comparación
- Dos Interfaces de Comunicación Serial Universal (USCI, *Universal Serial Communication Interface*): USCI_A0 y USCI_B0. La primera soporta los estándares UART⁸, IrDa⁹ SPI¹⁰ e I²C¹¹, mientras que la segunda sólo soporta SPI e I²C.
- Programación serial sobre la tarjeta
- Conversor analógico digital de 10 bits, 200000 muestras por segundo, con referencia interna, muestreo y retención y controlador de transferencia de datos.
- Manejo de interrupciones.
- Conjunto de 51 instrucciones con tres formatos de instrucción y siete modos de direccionamiento.

2.1.2. Transceptor CC2500

El CC2500 es un transceptor de radio frecuencia integrado de bajo costo, que opera en la banda de 2,4GHz, diseñado para aplicaciones inalámbricas de bajo consumo de energía. El transceptor está integrado con un modem banda base altamente configurable. El modem soporta varios formatos de modulación y soporta una velocidad de transmisión de datos de hasta 500 Kbps [11].

El transceptor tiene integrado el *hardware* necesario para el manejo de paquetes, además. Posee además, buffer de datos, transmisiones en ráfaga, verificación de canal libre, Indicación de Calidad del Enlace (LQI, *Link Quality Indicator*) y Aseguramiento de Canal Libre (CCA, *Clear Channel Assesment*) [11].

Los principales parámetros de operación y las FIFO (*First In, First Out*) de 64 bytes del CC2500 pueden ser controladas por medio de una interfaz SPI.

2.1.2.1. Características del CC2500

Las principales características del transceptor CC2500 son [11]:

- Rango de frecuencias: 2400-2483,5 MHz
- Velocidad de transmisión de datos programable desde 1.2 Kbps hasta 500 Kbps.
- Potencia de salida programable hasta 0dBm
- Manejo de paquetes configurable en *hardware*
- FIFO de transmisión y de recepción separadas, de 64 bytes cada una.
- Interfaz SPI para comunicación con la Unidad MicroControlada (MCU, *MicroControlled Unity*).
- Medida del Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*)

⁸ UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*): es un circuito integrado diseñado para implementar la interface para comunicación serial asíncronas.

⁹ IrDA (*Infrared Data Association*): define un estándar físico para la transmisión y recepción de datos por medio de infrarrojos. En él, se define una conexión bidireccional cuya velocidad de transmisión oscila entre los 9600 bps y los 4 Mbps

¹⁰ SPI (*Serial Peripheral Interface*): es un estándar de comunicación serial síncrona de cuatro hilos usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos.

¹¹ I²C (*Inter Integrated Circuits*): de manera similar a SPI, I²C es un protocolo de comunicación serial síncrono de dos hilos, empleado para comunicar circuitos integrados que pertenecen a una misma placa base. Este protocolo alcanza velocidades más altas que SPI a distancias menores.

- Soporta modulaciones FSK, GFSK y MSK
- Ancho de banda del filtro de canal programable
- Funcionalidad *wake on radio*¹²
- Blanqueamiento¹³ y des blanqueamiento automático, opcional.
- Soporte para LQI por paquete.
- Soporte para CCA.

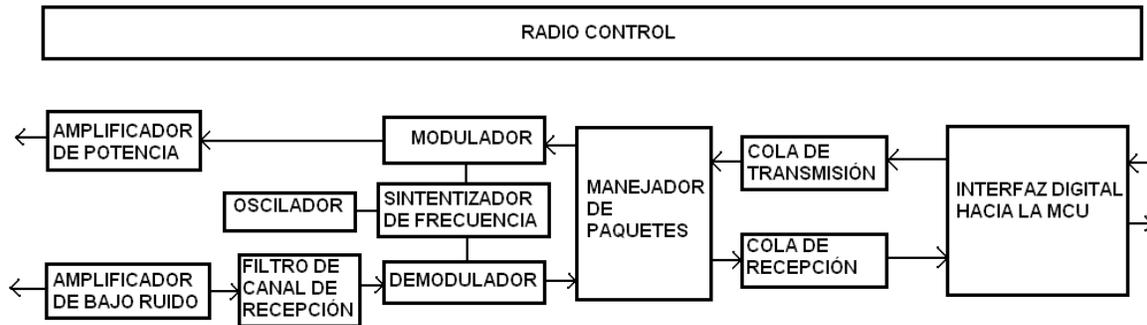
La figura 2,4 muestra el diagrama en bloques del transceptor CC2500. Los bloques observados son los siguientes [11]:

- **Interfaz Digital hacia la MCU (DIMCU, *Digital Interface to MCU*):** este bloque se encarga de controlar la comunicación a través del puerto SPI con el microcontrolador. Además, controla la función de los pines GDO0, GDO1 y GDO2, los cuales son pines de propósito general empleados para notificar diferentes clases de eventos al microcontrolador.
- **Cola de Recepción:** espacio de memoria tipo FIFO (*First In First Out*), cuyo tamaño es de 64 bytes, que almacena los datos recibidos vía RF por el transceptor. Esta cola solamente tiene un acceso de lectura desde la interfaz SPI.
- **Cola de Transmisión:** espacio de memoria tipo FIFO, cuyo tamaño es de 64 bytes, que almacena los datos que el transceptor debe enviar vía RF. Esta cola solamente tiene un acceso de escritura desde la interfaz SPI.
- **Manejador de Paquetes:** este bloque incluye el *hardware* encargado del manejo de paquetes
- **Modulador:** modulador en banda base.
- **Demodulador:** demodulador en banda base.
- **Sintetizador de Frecuencia:** Se conforma con un VCO totalmente integrado.
- **Amplificador de Potencia (PA, *Power Amplifier*):** este amplificador de potencia de ganancia ajustable amplifica la señal a transmitir permitiendo controlar el nivel de potencia de transmisión, por medio del ajuste de su ganancia.
- **Amplificador de Bajo Ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*):** amplifica la señal recibida.
- **Filtro de recepción:** es un filtro pasa banda de ancho de banda ajustable que opera en una frecuencia intermedia la cual es también configurable. Este filtro permite limitar el ancho de banda de la señal recibida.
- **Oscilador (XOSC):** este bloque genera la frecuencia de referencia del sintetizador de frecuencia y las señales de reloj DE la parte digital del transceptor. Requiere la conexión externa de un cristal en los pines XOSC_Q1 y XOSC_Q2.
- **Radio Control:** este bloque es una máquina de estados que controla el estado de todo el transceptor.

¹² *Wake on radio* es una funcionalidad cuyo propósito es reducir el consumo de energía por parte del transceptor manteniéndolo, la mayor parte del tiempo, en modo de bajo consumo. El transceptor sale periódicamente de este modo y verifica si se están transmitiendo paquetes, sin interactuar con el microcontrolador.

¹³ El blanqueamiento (*whitening*), es un proceso de aleatorización de bits en el que la secuencia de bits que se transmite es combinada, mediante una operación XOR bit a bit, con una secuencia pseudo aleatoria. De este modo, se reducen los efectos adversos que las cadenas largas de unos o de ceros pueden tener sobre la transmisión.

Figura 2.4 Diagrama en Bloques Simplificado del Transceptor CC2500



2.1.2.2. Interfaz SPI del CC2500 [11]

Como se mencionó anteriormente, la configuración del transceptor se realiza por medio de la interfaz SPI, en la cual el CC2500 es el esclavo. Esta interfaz consta de 4 hilos (SI, SO, SCLK, y CSn). Esta interfaz también se usa para leer y escribir los datos en los buffer.

Toda operación en la interfaz SPI comienza con un byte de encabezado. Este contiene un bit de lectura/escritura, un bit que indica si el acceso será o no de tipo ráfaga y 6 bits de dirección. La figura 2.5 muestra la estructura del byte de encabezado, en ella puede observarse que el MSB corresponde al bit que indica si la operación a realizar es de lectura ($R/W=1$) o de escritura ($R/W=0$). El siguiente bit ($BURST$) indica si la operación accederá a un solo byte ($BURST=0$) o si accederá a varios bytes consecutivos, sin necesidad de emplear un nuevo byte de encabezado para cada uno de los bytes accedidos ($BURST=1$). Los siguientes seis bits ($A5:A0$), corresponden a la dirección del registro. Durante la transferencia de la dirección y los datos, el pin CSn (*Chip Selection*) activo en bajo, cuyo estado es controlado por el MCU debe permanecer en estado bajo. Si el pin CSn pasa al estado alto durante el acceso, la transferencia será cancelada.

Figura 2.5 Byte de Encabezado de una Transferencia SPI

| R/W bit 7 | BURST bit 6 | A5 bit 5 | A4 bit 4 | A3 bit 3 | A2 bit 2 | A1 bit 1 | A0 bit 0 |
|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|

El rango de direcciones alcanzado por los 6 bits de dirección ($A5:A0$) va nominalmente desde $0x00$ hasta $0x3F$. Sin embargo solo las direcciones en el rango de $0x00$ a $0x2F$ corresponden a registros del transceptor. La tabla A.1 del anexo A muestra la lista de registros de configuración del CC2500.

Los accesos de tipo escritura a las direcciones entre $0x30$ y $0x3D$ son denominados *command strobes* y en realidad no representan accesos a registros sino instrucciones dadas al transceptor y que influyen en el estado del mismo, tales como iniciar transmisión, iniciar recepción o pasar al estado de espera o al modo de bajo consumo. La tabla A.2 del anexo A especifica la función de cada uno de los *command strobes*.

Por otra parte, los accesos en el modo de lectura a las direcciones del rango entre $0x30$ y $0x3D$ permite el acceso a un conjunto de registros denominados registros de estado, los

cuales proporcionan información acerca del estado del transceptor. La tabla A.3 del anexo A muestra el conjunto de registros de estado del transceptor CC2500.

La dirección 0x3E está reservada para el control del amplificador de potencia. Para esto existe una tabla en el transceptor denominada PATABLE, la cual controla el valor de la ganancia del amplificador. La sección A.2.5 del anexo A especifica detalladamente la manera en que se realiza el control de potencia.

Finalmente la dirección 0x3F se reserva para la lectura de las FIFO. Si la operación es de lectura (R/W=0), se accede a la RxFIFO. Si la operación es de escritura (R/W=1), se accede a la TxFIFO. El acceso puede ser de un solo byte o de varios bytes en ráfaga, lo cual, al igual que en un acceso normal es controlado por el bit BURST.

Cada vez que se envía al transceptor un byte de encabezado o un byte de datos en un acceso de escritura, este envía simultáneamente hacia la Unidad MicroControlada (MCU, *MicroControlled Unity*), un byte de estado (*STATUS*). La figura 2.6 muestra el contenido del byte de estatus, donde *STATE* representa el estado del transceptor y *FIFO_BYTES_AVAILABLE* representa el número de bytes disponibles en la FIFO de recepción, en caso de que la operación sea de lectura o el número de bytes libres en la FIFO de recepción si la operación es de escritura. Si este valor es igual a 15, significa que hay 15 o más bytes disponibles en la FIFO de recepción o que hay 15 o más bytes libres en la FIFO de transmisión. La tabla A.2 del anexo A muestra los posibles valores de *STATE* y su significado. Adicionalmente el anexo A.2.6 muestra los requerimientos de tiempo que deben cumplirse en la interfaz SPI del transceptor CC2500

Figura 2.6 Byte *STATUS* del CC2500

| | | | | |
|--------------------|--------------------|------|-----------------------------------|------|
| CHIP_RDYn bit 7 | STATE[2:0] bit6 | bit4 | FIFO_BYTES_AVAILABLE[3:0] bit3 | bit0 |
|--------------------|--------------------|------|-----------------------------------|------|

2.1.2.3. Parámetros de Configuración del CC2500

El acceso a registros proporcionado mediante la interfaz SPI, permite modificar los parámetros de configuración del transceptor. Los principales parámetros que pueden ser modificados en el transceptor son [12]:

- Esquema de modulación.
- Frecuencia de portadora.
- Separación entre canales.
- Separación entre las frecuencias correspondientes al 0 y al 1 en FSK o en GFSK.
- Frecuencia intermedia.
- Velocidad de transmisión de datos.
- Potencia de transmisión.
- Ancho de banda del filtro en recepción.
- Habilitar/Deshabilitar Blanqueamiento.
- Longitud de paquetes.
- Longitud del preámbulo.
- Palabra de sincronización.
- Verificación de dirección en recepción.

Las secciones A.2.7 hasta A.2.11 del anexo A muestran la manera de configurar los parámetros más importantes del transceptor CC2500..

Los límites de variación de la velocidad de transmisión dependen del esquema de modulación. La tabla 2.1 muestra los límites de variación de la velocidad de transmisión de datos para cada uno de los esquemas de modulación [11].

Tabla 2.1 Rangos de Variación de la Velocidad de Transmisión de Datos Según el Esquema de Modulación Empleado

| Esquema de Modulación | Mínimo [Kbps] | Máximo [Kbps] |
|-----------------------|---------------|---------------|
| OOK | 1.2 | 250 |
| FSK | 1.2 | 500 |
| GFSK | 1.2 | 250 |
| MSK | 26 | 500 |

Por otra parte, el umbral de sensibilidad del transceptor aumenta al aumentar la velocidad de transmisión de datos. La tabla 2.2 muestra los valores de sensibilidad proporcionados por el fabricante para valores típicos de velocidad de transmisión de datos [11].

Tabla 2.2 Sensibilidad del Transceptor CC2500 para Valores Típicos de la Velocidad de Transmisión de Datos

| Velocidad de Transmisión de Datos [Kbps] | Sensibilidad [dBm] |
|--|--------------------|
| 2,4 | -104 |
| 10 | -99 |
| 250 | -89 |
| 500 | -87 |

Para obtener una comunicación óptima, es necesario configurar adecuadamente parámetros como el ancho de banda del filtro del canal de recepción, así como el valor de la frecuencia intermedia del receptor y la separación entre las frecuencias correspondientes al uno y al cero para el caso de las modulaciones FSK y GFSK. Estos valores dependen tanto de la velocidad de transmisión de datos como del esquema de modulación. Sin embargo, el fabricante del transceptor CC2500 no proporciona información detallada que permita configurar estos parámetros de manera óptima para cualquier velocidad de transmisión o esquema de modulación. La herramienta Smart RF Studio®¹⁴ de Texas Instruments® proporciona un conjunto de cuatro configuraciones óptimas predefinidas para el transceptor CC2500, las cuales fueron empleadas como base para realizar las configuraciones del transceptor CC2500 empleadas durante el desarrollo del presente trabajo de grado. La tabla 2.3 muestra un resumen de las configuración de base obtenidas por medio de la herramienta Smart RF Studio® y sus parámetros de configuración más importantes. A partir de estas configuraciones se derivaron otras configuraciones al variar parámetros como la potencia de transmisión y la activación del blanqueamiento.

¹⁴ Aunque el software Smart RF Studio® no tiene soporte para la tarjeta eZ430-RF2500T, este permite visualizar los valores que deben ser almacenados en los registros de configuración del transceptor CC2500 para obtener cada una de las configuraciones predefinidas.

Tabla 2.3 Resumen de las Configuraciones Base Proporcionadas por el Software Smart RF Studio®

| Parámetro | Configuración1 | Configuración2 | Configuración3 | Configuración4 |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Velocidad de transmisión de datos [Kbps] | 2.4 | 10 | 250 | 500 |
| Frecuencia intermedia [Hz] | 203125 | 152343 | 253906 | 304867 |
| Desviación de Frecuencia [Hz] | 50000 | 50000 | No aplica | No aplica |
| Ancho de banda del filtro de canal de recepción [Hz] | 203125 | 232142 | 541666 | 812500 |
| Esquema de Modulación | FSK | FSK | MSK | MSK |

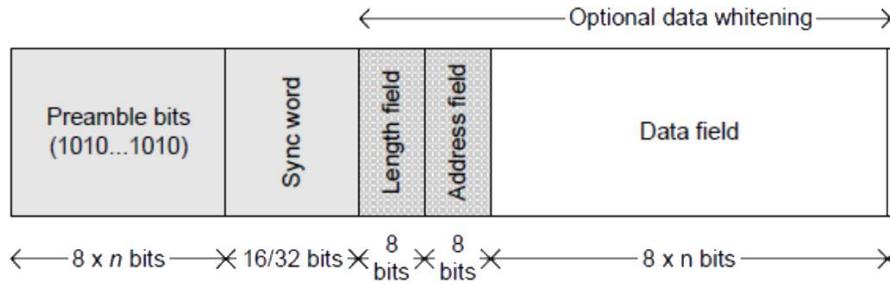
2.1.2.4. Formato del Paquete del Transceptor CC2500

El formato del paquete es el mostrado en la figura 2.7. En él pueden verse los siguientes campos [11]:

- **Preámbulo:** es una secuencia de unos y ceros alternados de longitud configurable, la cual puede ser de 2,3,4,6,8,12, 16 y 24 bytes.
- **Palabra de sincronización:** la palabra de sincronización se forma por un patrón de dos bytes que puede ser configurado mediante los registros SYNC1 y SYNC0. La longitud de la palabra de configuración puede ser de 16 o 32 bits. En caso de ser de 32 bits, el patrón base se repite dos veces.
- **Longitud de datos:** campo de 1 byte indica el número de bytes que contiene la porción de datos del paquete incluyendo el byte de dirección.
- **Dirección:** campo de 1 byte con la dirección del dispositivo al que el paquete va dirigido
- **Datos:** este campo contiene la información útil del paquete.

La sección A.2.10 del anexo A detalla la forma en que se deben configurar los parámetros del paquete.

Figura 2.7 Formato de Paquetes del CC2500



2.1.3. Antena

La tarjeta eZ430-RF2500T tiene incorporada una antena cerámica tipo dipolo, de montaje superficial. Las características de esta antena, se muestran en la tabla 2.4

Tabla 2.4 Características de la Antena

| PARÁMETRO | VALOR |
|-------------------|-------|
| VSWR | 2 |
| Ganancia pico | 3dBi |
| Ganancia promedio | 1dBi |

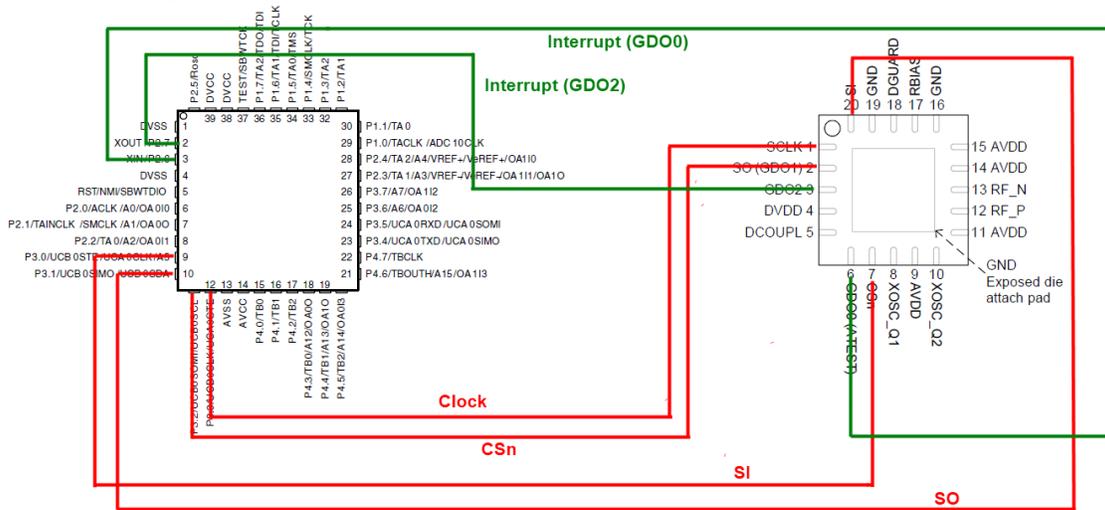
2.1.4. Conexión del Microcontrolador MSP430F2274 y el transceptor CC2500

Como se observa en la figura 2.8, la conexión física entre el microcontrolador MSP430F2274 y el transceptor CC2500 se realiza conectando la interfaz SPI del transceptor y del módulo USCI_B0 del microcontrolador; estas conexiones se representan por las líneas rojas en la figura. Adicionalmente, se conectan los pines generadores de eventos del transceptor GDO0 y GDO2 a dos pines de interrupción del microcontrolador; estas conexiones se muestran en la figura mediante las líneas de color verde. Estas dos líneas son llevadas a los puntos de conexión externos de modo que los dispositivos externos puedan recibir notificaciones de los eventos generados por el transceptor por medio de estos dos pines [11].

2.1.5. Interfaz USB de Programación y Depuración eZ430-RF

Este dispositivo permite la conexión del microcontrolador MSP430F2274, a través de su interfaz serial USCI_A0, con un Computador Personal (PC, *Personal Computer*) por medio de uno de sus puertos USB. La figura 2.9 muestra la interfaz eZ430-RF

Figura 2.8 Conexión Física entre el MSP430F2274 y el CC2500



2.1.5.1. Herramienta para la Emulación de Flash (FET, *Flash Emulation Tool*)

La interfaz eZ430-RF puede ser empleada como una Herramienta para la Emulación de Flash (FET, *Flahs Emulation Tool*) estándar. Una FET es una herramienta que se usa para sustituir temporalmente la memoria de programa de un dispositivo embebido con el propósito de realizar la depuración del firmware embebido de dicho dispositivo. El FET contiene Memoria de Acceso Aleatorio (RAM, *Random Access Memory*) de doble puerto, uno de los cuales se conecta al sistema embebido y el otro a un PC, el cual ejecuta la herramienta de depuración. Esto permite al programador cambiar el código ejecutable mientras se encuentra en ejecución, así como fijar puntos de parada, realizar ejecución paso a paso del programa y usar otras técnicas avanzadas de depuración sobre un sistema embebido, las cuales no sería posibles de otra manera. La interfaz eZ430-RF permite a las herramientas de depuración transferir el programa a la memoria del microcontrolador y realizar depuración del firmware. Esta interfaz se conecta con el microcontrolador MSP430F2274 por medio de una interfaz denominada Espía Por Cable (SBW, *Spy By Wire*) [9], [12].

2.1.5.2. MSP Application UART

Al conectar la interfaz eZ430-RF a un PC, se crea en este un puerto COM¹⁵ virtual llamado MSP430 *Application UART*, el cual puede ser accedido desde una aplicación con soporte para comunicaciones seriales a través de puertos COM tal como un emulador de terminal o una aplicación desarrollada a la medida, y constituye un medio de conexión entre las aplicaciones existentes en el PC (exceptuando las herramientas de depuración de código para el MSP430F2274) y la tarjeta eZ430-RF2500T. El puerto MSP430 *Application UART* puede funcionar normalmente, incluso mientras hay una depuración en curso.

¹⁵ Puerto COM es un puerto de comunicación serial que implementa el estándar RS232 (*Recommended Standar 232*).

Figura 2.9 Interfaz USB ez430-RF



2.2. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SIMPLICITI®

SimpliciTI® es un protocolo de red inalámbrica de RF de baja potencia, propietario de Texas Instruments®, que sirve de soporte para el desarrollo de dispositivos de múltiple propósito y recursos limitados, que requieran la capacidad de establecer comunicaciones en red vía RF. Por esta razón el soporte de red debe ser simple y requerir el mínimo de recursos posible así como proporcionar al desarrollador una forma sencilla de enviar mensajes a través del aire. Por las razones anteriores, simpliciTI® proporciona una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) que permite el intercambio de mensajes entre los dispositivos de la red de una forma simple [13], [14].

Desde el punto de vista del desarrollador, simpliciTI® es considerado una librería y no un sistema operativo embebido, debido a que no posee un gestor de tareas [13]. El código fuente es simpliciTI® es de uso libre y es proporcionado por Texas Instruments® al desarrollador como una librería desarrollada en lenguaje C. La implementación de simpliciTI® la realiza el desarrollador, al incluir la librería en las aplicaciones que desarrolle, dotándolas así de la capacidad de realizar comunicaciones en red mediante el protocolo simpliciTI®.

2.2.1. Características de SimpliciTI®

Las principales características de simpliciTI® son [13], [14], [15]:

- **Baja potencia:** soporta dispositivos que funcionan en modo de bajo consumo de energía.
- **Bajo costo:** usa menos de 8KB de memoria de programa y menos de 1KB de memoria RAM, dependiendo de la configuración.
- **Simple:** emplea una API básica.
- **Versátil:** posee soporte para microcontroladores de la familia MSP430 o para el microcontrolador 8051. También posee soporte para transceptores RF en bandas por debajo de 1 GHz, tales como el CC1100, CC1110 y en la banda de 2.4GHz, tales como el CC2500 y el CC2510
- **Manejo de seguridad:** incluye funcionalidades para realizar encriptación de datos.
- **Agilidad de frecuencia:** posee la capacidad de realizar un cambio frecuencia, por medio de un salto de canal cuando se detecta que el canal por el que se transmite está sometido a interferencia o ruido demasiado altos.
- **Interoperabilidad:** permite la comunicación entre dispositivos con distintos tipos de *hardware*, siempre que simpliciTI® pueda ser implementado sobre dicho *hardware*.

2.2.2. Topologías de Red y Tipos de Dispositivos Soportados por SimpliciTI®

En una red que implementa SimpliciTI® solo existe una topología lógica: punto a punto. Sin embargo, a nivel físico, existen dos topologías básicas: la topología estrictamente punto a punto y la topología en estrella. En esta última existe un dispositivo que actúa como concentrador (hub) a través del cual pasan todos los paquetes. En la topología en estrella, todas las conexiones lógicas son punto a punto, sin embargo, todos los paquetes que son enviados desde un punto a otro son enviados primero al concentrador y este los reenvía a su destino [13,14].

En una red que utiliza el protocolo SimpliciTI® pueden existir tres tipos de dispositivos: Dispositivo Final (ED, *End Device*), Extensor de Rango (RE, *Range Extender*) y Punto de Acceso (Access Point) [13], [14].

2.2.2.2. Dispositivo Final (ED)

Es el dispositivo base de una red basada en SimpliciTI®. Generalmente estos dispositivos están asociados con algún sensor o actuador. Es el único tipo de dispositivo que es estrictamente necesario para formar una red basada en SimpliciTI®; Puede operar en modo siempre encendido o en modo dormir y consultar (*sleep and polling*); en este último, el ED permanece la mayor parte del tiempo en modo de bajo consumo y periódicamente regresa al modo activo y consulta al AP para determinar si éste ha recibido paquetes destinados a él, en caso afirmativo, el AP, que ha almacenado dichos paquetes, los envía al ED el cual, después de recibir y procesar el paquete, regresa al modo de bajo consumo. Una red estrictamente punto a punto está exclusivamente formada por ED y, eventualmente, RE [13].

2.2.2.2. Extensor de Rango (RE)

Actúa como repetidor, permitiendo mediante el reenvío de paquetes que dos dispositivos que no pueden comunicarse directamente puedan intercambiar paquetes. Debido a su naturaleza, estos dispositivos deben permanecer siempre encendidos y no pueden operar en el modo dormir y consultar. Un RE puede tener un sensor o actuador e implementar la funcionalidad de un ED [13], [14].

2.2.2.3. Punto de Acceso (AP)

Este dispositivo es empleado como concentrador en la topología en estrella y es el encargado de realizar las funciones de red tales como permitir el ingreso de los ED a la red, gestionar permisos de conexión, claves de seguridad, etc. Este dispositivo también debe tener soporte para almacenar y retransmitir los paquetes a los ED que operan en el modo dormir y verificar, almacenándolos hasta que el ED salga del modo de bajo consumo y consulte al AP para determinar si este ha recibido paquetes destinados a él. Esta característica permite el diseño de ED de bajo consumo de energía. Debido a su naturaleza, el AP siempre debe estar encendido y no puede operar en modo dormir y consultar. El AP puede tener un sensor o actuador e implementar la función de un ED o de un RE [13], [14].

Aunque en SimpliciTI® únicamente existen, desde el punto de vista lógico, las conexiones punto a punto, la existencia de los AP y RE, permiten establecer diversos tipos de

configuraciones físicas. Las figuras 2.10 a 2.13 muestran 4 formas distintas de establecer una conexión punto a punto lógica entre dos ED [13].

Figura 2.10 Topología Punto a Punto Directa.

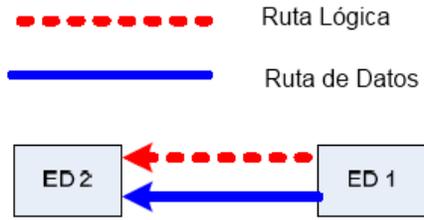


Figura 2.11 Topología Punto a Punto a través de un RE.

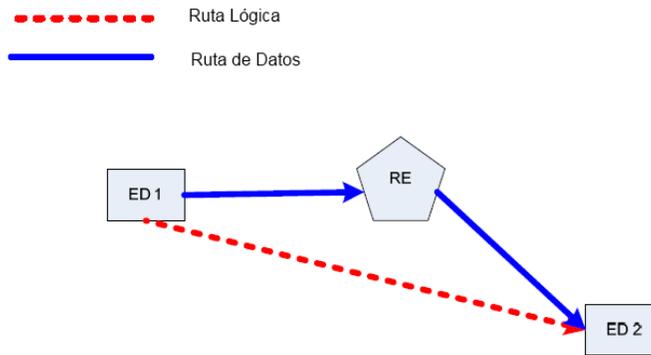


Figura 2.12 Topología Punto a Punto a través de un AP.

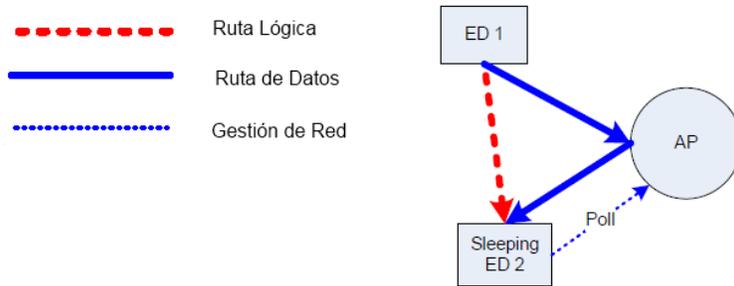
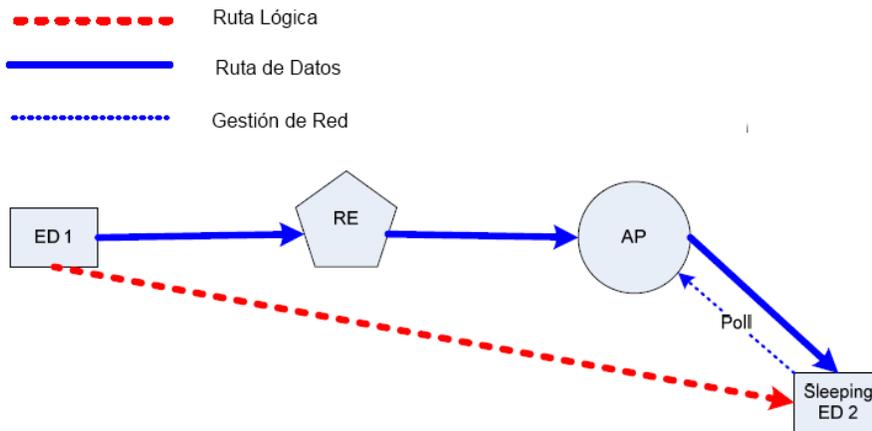


Figura 2.13 Topología Punto a Punto a través de un RE y un AP.



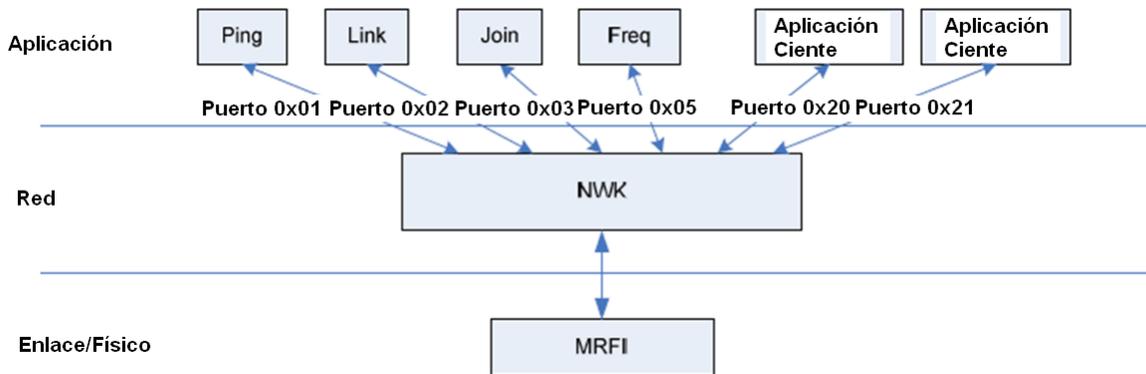
2.2.3. Arquitectura de SimpliciTI®

SimpliciTI® puede dividirse conceptualmente en 3 niveles, como se muestra en la figura 2.14. El nivel de aplicación proporciona la API que permite al desarrollador hacer uso de las funcionalidades de SimpliciTI®. El soporte para las comunicaciones es provisto por un conjunto simple de símbolos de la API usados para inicializar y configurar la red, y enviar y recibir mensajes por el canal de RF.

Los niveles del protocolo SimpliciTI® no siguen estrictamente el modelo de referencia para la Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*).

- No existe formalmente un nivel físico ni una capa de enlace. Los datos son recibidos directamente desde el radio ya empaquetados

Figura 2.14 Arquitectura de SimpliciTI®



2.2.3.1. Nivel de Aplicación

Este es el único nivel que un desarrollador necesita implementar. Es en este nivel donde éste desarrolla su aplicación e implementa la comunicación en red, usando la API de SimlpiciTI® [14].

2.2.3.2. Nivel de Red (NWK)

Este nivel gestiona las colas de transmisión y recepción y despacha los paquetes a su destino. El destino es siempre una aplicación designada por un número de puerto.

Las aplicaciones de red son objetos internos punto a punto cuyo propósito es gestionar la red. Ellas trabajan en un puerto predefinido, el cual no debe ser usado por el desarrollador (a excepción de ping, con propósitos de depuración). Su uso depende del tipo de dispositivo SimlpiciTI®. En la parte superior figura 2.14 pueden observarse algunas aplicaciones de red con sus respectivos puertos predefinidos. A continuación se presentará una lista de las aplicaciones de red:

- **Ping (puerto 0x01):** se emplea para detectar la presencia de un dispositivo específico.
- **Link (puerto 0x02):** soporta la gestión del enlace entre dos puntos.
- **Join (puerto 0x03):** controla el ingreso de dispositivos a la red en topologías con AP.
- **Security (puerto 0x04):** cambia la información de seguridad tal como claves de encriptación y contextos de encriptación.
- **Freq (puerto 0x05):** permite realizar un cambio de canal, solicitud de cambio de canal o eco a una solicitud de cambio de canal.
- **Mgmt (puerto 0x06):** puerto de gestión general usado para administrar el dispositivo.

2.2.3.3. Nivel de Interfaz Mínima de RF

- **Interfaz Mínima de RF (MRFI, *Minimal RF Interface*):** este nivel abstrae las funciones básicas de lectura de paquetes desde el radio o la escritura de paquetes hacia este. Los distintos radios soportados por SimlpiciTI® requieren diferentes implementaciones de este nivel, sin embargo, la interfaz de este nivel hacia los niveles superiores, es la misma para todos los radios. Los distintos radios ofrecen distintos niveles de soporte para las responsabilidades típicas de los niveles físico y de enlace. El nivel MRFI encapsula estas diferencias y proporciona una API que permite la comunicación de los niveles superiores con el transceptor de radio. La sección A.3.1 del anexo A muestra una lista de las funciones proporcionadas por la API MRFI.

2.2.4. API del Protocolo SimlpiciTI®

La API de SimlpiciTI® se enfoca en encapsular la funcionalidad de la red de una manera que permita que una red funcional y segura pueda ser formada con poco esfuerzo por parte de la aplicación, por medio del llamado a un conjunto de funciones de interfaz simple. El principal efecto de este enfoque es que la red resultante sacrifica flexibilidad por simplicidad [13] [14].

Las siguientes funcionalidades son soportadas por la API de SimpliciTI®:

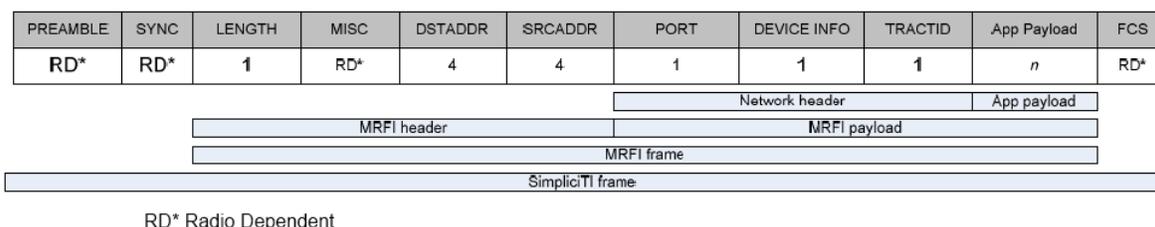
- Inicialización
- Enlace
- Intercambio de mensajes punto a punto entre aplicaciones
- Gestión de dispositivos.

La sección A.3.2 del anexo A muestra una lista de las funciones proporcionadas por la API de nivel de aplicación en el protocolo SimpliciTI®

2.2.4. Formato del Paquete SimpliciTI®

La figura 2.15 muestra la estructura de un paquete SimpliciTI®. Los campos marcados como Dependientes del Radio (RD, *Radio Dependent*) son manejados directamente por el *hardware* del transceptor RF. La sección 2.1.4 muestra el formato de paquetes manejado por el transceptor CC2500 que fue empleado en este trabajo de grado. Para los campos que no son dependientes del *hardware*, se indica la cantidad de bytes requeridos para cada campo.

Figura 2.15 Formato del Paquete SimpliciTI®



A continuación se realiza una breve descripción de los campos no dependientes del *hardware* de RF.

Tabla 2.5 descripción de los Campos del Paquete SimpliciTI®

| Campo | Definición | Comentarios |
|-------------|---|--|
| PREAMBLE | Sincronización de radio | Insertado por HW |
| SYNC | Sincronización de radio | Insertado por HW |
| LENGTH | Longitud de los bytes restantes del paquete | Insertado por FW en Tx |
| MISC | Campo misceláneo | Difiere para distintos radios. Puede estar ausente. |
| DSTADDR | Dirección de destino | Insertado por FW |
| SRCADDR | Dirección de origen | Insertado por FW |
| PORT | Trama reenviada (7) Contexto de encriptación (6) Número de puerto de aplicación (5-0) | Insertado por FW. Los puertos en 0x20-0x3F se reservan para aplicaciones de usuario Del 0-1F a la capa NWK |
| DEVICE INFO | Transmisor/receptor y capacidades de la plataforma | Insertado por FW |

| | | |
|-------------|---------------------------------|--|
| TRACTID | Id de transacción | Insertado por FW |
| APP PAYLOAD | Datos de aplicación | $0 \leq n \leq 50$ para radios no 802.15.4 |
| FCS | Secuencia de Chequeo de Paquete | Usualmente inerte por el HW |

2.3. ENTORNOS INTEGRADOS DE DESARROLLO PARA EL KIT EZ430-RF2500

2.3.1. IAR Embedded Workbench Kickstart For MSP430

IAR Embedded Workbench Kickstart for MSP430 es un IDE para compilación, descarga y depuración de aplicaciones embebidas para microcontroladores de la familia MSP430. El IDE incluye un compilador de C/C++ de tamaño de código limitado y un compilador de lenguaje ensamblador de tamaño de código ilimitado, así como un depurador/simulador Herramienta para Simulación de Flash (FET, *Flash Emulation Tool*). La limitación de código del compilador de C/C++ es de 4KB para dispositivos MSP430 tradicionales y 8KB para dispositivos MSP430X con más de 60KB de memoria Flash. El depurador está totalmente integrado al IDE [16].

2.3.2. Code Composer Studio (CCS)

CCS es un IDE para las familias de procesadores embebidos de TI. Contiene un conjunto de herramientas para el desarrollo y depuración de aplicaciones embebidas. Incluye un compilador para cada una de las familias de dispositivos TI, un editor de código fuente, un entorno de creación de proyectos y un depurador, entre otras características. CCS está basado en el *software* de código abierto Eclipse, el cual fue desarrollado originalmente como un framework abierto para crear herramientas de desarrollo [17].

2.4. OTRAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS

2.4.1. PostgreSQL®

PostgreSQL® es un sistema de gestión de base de datos relacional orientado a objetos, de libre distribución y de código abierto, publicado bajo la licencia de Distribución de Software de Berkeley¹⁶ (BSD, *Berkeley Software Distribution*) [18].

Cuenta con más de 15 años de desarrollo activo y una arquitectura probada que se ha ganado una sólida reputación de fiabilidad e integridad de datos. Se ejecuta en los principales sistemas operativos que existen en la actualidad [18]. Para el acceso al motor de la base de datos se hizo uso del cliente gráfico de postgres llamado PgAdmin3.

¹⁶ Es una licencia de software libre y de código abierto, que permite el uso del código fuente en software no libre

2.4.2. Eclipse IDE para Desarrolladores Java

Eclipse es un IDE que incluye todas las herramientas y funciones necesarias para desarrollar, compilar y depurar programas en diversos lenguajes de programación, entre ellos el lenguaje de programación java.

Aunque las funciones de Eclipse son de carácter general, las características del IDE se pueden ampliar y mejorar mediante el uso de plug-ins.

Capítulo 3 SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO DE CORTO ALCANCE EN LA BANDA DE 2,4 GHZ

En el presente capítulo, se presenta el diseño e implementación de dos sistemas de comunicaciones inalámbricos en la banda de 2,4 GHz, así como del *software* de apoyo necesario para la configuración y recolección de datos de los dispositivos que forman parte del sistema. Estos sistemas fueron creados empleando las tarjetas de desarrollo EZ430-RF2500T, con el fin de realizar la evaluación y el análisis de desempeño de un sistema de comunicación de datos inalámbrico punto a multipunto de corto alcance en la banda de 2,4 GHz. El primer sistema consiste en un sistema de comunicaciones punto a punto el cual permitió evaluar las características físicas del canal de radio frecuencia empleado como soporte. El segundo sistema es un sistema de comunicaciones punto a multipunto con una topología en estrella que consta de un AP y de hasta tres ED; por medio de este sistema fue posible la evaluación del desempeño del protocolo de comunicaciones punto a multipunto SimpliciTI®.

El diseño e implementación de estos sistemas, se realizó teniendo en cuenta los siguientes hechos:

- Las tarjetas de desarrollo eZ430-RF2500T basan su funcionamiento en el microcontrolador MSP430F2274, cuyo *firmware* debe ser desarrollado en lenguaje C mediante un IDE adecuado tal como IAR Embedded Workbench® o Code Composer Studio®, los cuales también permiten transferir el *firmware* a la tarjeta mediante la interfaz USB eZ430-RF. Esto implica que para que la tarjeta sea funcional, es necesario desarrollar el *firmware* de esta [10], [12], [16], [17].
- No existía una aplicación que permitiera la configuración ni la obtención de resultados del kit eZ430.RF2500 desde un computador. Las aplicaciones desarrolladas con propósitos similares por Texas Instruments® tales como Smart RF Studio® o Packet Sniffer® no incluyen soporte para este kit.
- Las versiones de las herramientas IAR Embedded Workbench® y Code Composer Studio® proporcionadas junto con los kits de desarrollo tienen una licencia limitada que limita el tamaño del *firmware* generado a 4KB y 16KB respectivamente para cada herramienta. Por esta razón es necesario que los protocolos de comunicación entre la tarjeta y el computador sean muy simples y, a la vez permitan transferir toda la información necesaria para tener resultados confiables [16], [17].
- El transceptor CC2500 incluido en la tarjeta permite la variación de varios parámetros de transmisión tales como modulación, velocidad de transmisión de datos, potencia de transmisión, entre otros. Esta variación incrementa sustancialmente la cantidad de configuraciones con las que se realizarían las pruebas y la cantidad de parámetros de cada una de ellas, de manera que se consideró necesario diseñar un mecanismo que permitiera la gestión automatizada de la información empleando una base de datos [11].

Por las razones anteriores, el desarrollo de los dos sistemas anteriores implicó el desarrollo de tres componentes fundamentales para cada sistema:

- El *firmware* para el microcontrolador MSP430F2274 de cada tarjeta de desarrollo.
- Una base de datos que permitiera almacenar, de manera organizada, tanto los datos de configuración de los dispositivos como la gran cantidad de resultados obtenidos.
- Una herramienta *software* que permitiera la configuración de los dispositivos y el fácil almacenamiento y recuperación de la información desde la base de datos.

3.1 SISTEMA DE COMUNICACIÓN PUNTO A PUNTO

Para implementar el sistema de comunicación punto a punto se emplearon dos computadores portátiles, cada uno conectado a una tarjeta eZ430-RF2500T por medio de la interfaz USB MSP430 Application UART incluida en el kit de desarrollo eZ430-RF2500, la cual permite la comunicación de las aplicaciones que se ejecutan en el computador con el microcontrolador central de la tarjeta. De este modo, es posible desde los computadores, configurar las tarjetas y obtener los datos de los resultados de las pruebas que ellas proporcionan. La figura 3.1 muestra el diagrama general de este sistema de comunicación.

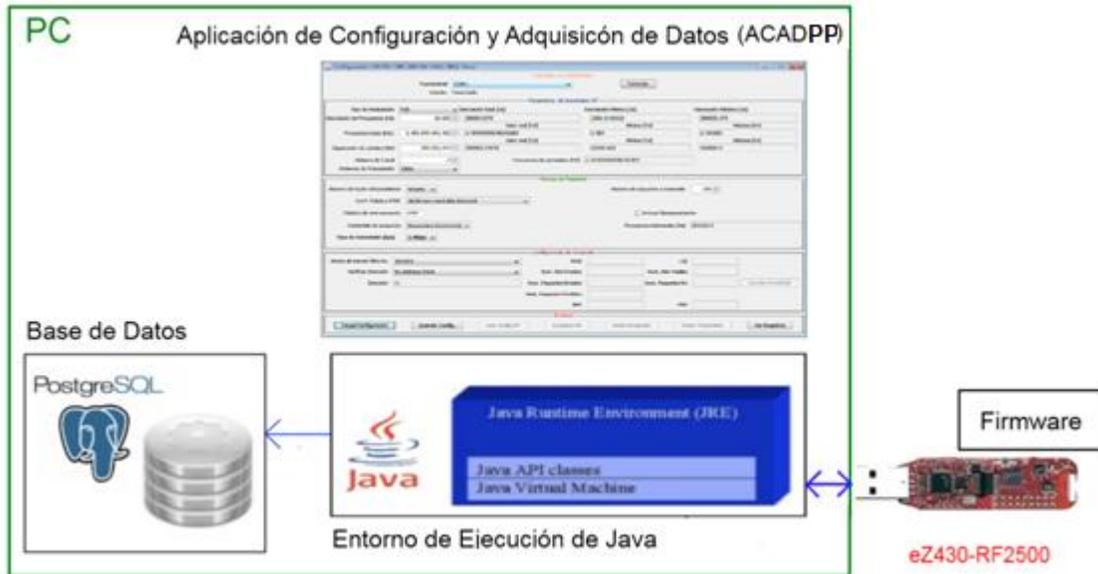
Figura 3.1 Diagrama General del Sistema de Comunicación Punto a Punto Implementado.



La figura 3.2 muestra los componentes *software* presentes en el sistema. Cada uno de los computadores tiene una base de datos desarrollada en postgresSQL© y una aplicación desarrollada en lenguaje java la cual en adelante será denominada como Aplicación de Configuración y Adquisición de Datos (ACADPP) la cual es ejecutada sobre el entorno de ejecución de java dentro del computador. Esta aplicación permite la configuración de las tarjetas mediante la interfaz USB eZ430-RF. Del mismo modo, la tarjeta eZ430-RF2500T incluye un *firmware*, el cual permite al microcontrolador comunicarse con la aplicación

java e intercambiar los datos de configuración y los resultados de manera adecuada. Los dos computadores ejecutan el mismo *software* y las dos tarjetas se programan con el mismo *firmware* de manera que ambos puntos de la comunicación pueden asumir tanto el papel de transmisor como el de receptor, sin embargo no pueden asumir ambos papeles de manera simultánea de modo que para una prueba determinada, uno de ellos debe ser transmisor y el otro debe ser receptor. Por otra parte, para que los resultados sean fiables es necesario que la información de las configuraciones sea idéntica en los dos equipos.

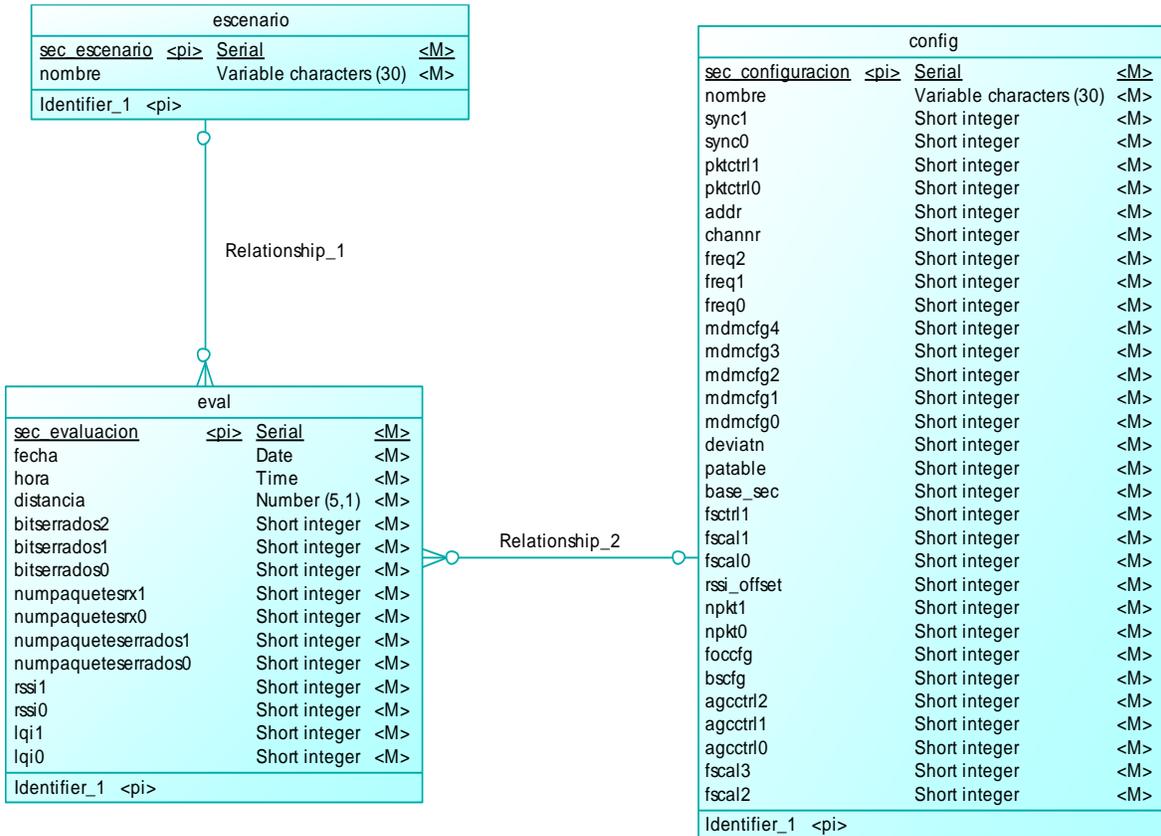
Figura 3.2 Componentes Software Presentes en el Sistema de Comunicación Punto a Punto



3.1.1 Diseño de la Base de Datos para el Sistema Punto a Punto

La base de datos empleada para el sistema punto a punto, como se observa en la figura 3.3, consta de tres tablas: la tabla **escenario**, la cual sirve para registrar si la prueba fue realizada en exteriores, interiores o con interferencia; la tabla **config**, en la que se almacenan los valores de los registros del transceptor CC2500 necesarios para obtener una configuración deseada, así como los de algunos registros adicionales definidos por los desarrolladores del *firmware* y que proporcionan información adicional requerida para la correcta obtención de los resultados; y la tabla **eval** en la que se almacenarán los resultados asociados a una configuración dada, a un escenario dado y a una distancia especificada.

Figura 3.3 Modelo Entidad Relación de la Base de Datos Empleada en el Sistema Punto a Punto



3.1.2 Protocolo de Comunicaciones entre la Tarjeta EZ430-RF2500T y el Software ACADPP.

Para que fuese posible configurar el kit de desarrollo desde la aplicación ACADPP, fue necesario establecer un mecanismo de interacción entre dicho *software* y las tarjetas EZ430-RF2500T. Debido a las restricciones impuestas en el tamaño del código por la licencia limitada de la herramienta IAR Embedded Workbench®, resultó necesario crear un protocolo de comunicaciones que fuese simple y a la vez permitiera una configuración completa de los parámetros del transceptor y de la prueba en general. Como se indicó en el capítulo 2, la configuración del transceptor CC2500 se efectúa mediante registros de configuración, cuyos valores son leídos o modificados mediante una interfaz SPI existente entre el transceptor y el microcontrolador MSP430F2274. Cada registro tiene un identificador de 7 bits cuyo valor se encuentra en el rango entre 0x00 y 0x3E. Además, el valor de cada registro es un número de un byte. Este modelo de registros sirvió como base para el diseño del protocolo de comunicaciones, el cual también fue basado en registros de configuración de 1 byte. Sin embargo, este protocolo no se limitó a permitir el acceso a los registros de configuración del transceptor CC2500 sino que además creó un conjunto extendido de registros, en el cual se incluye, además de los registros de configuración del transceptor, toda la información del estado del microcontrolador y de los resultados de las pruebas. En este conjunto extendido de registros algunos registros son de lectura y otros de lectura y escritura. La sección B.1.1. del anexo B muestra los

registros que fueron agregados al conjunto de registros propio del transceptor para obtener el conjunto de registros extendido.

El protocolo consta de dos comandos, los cuales serán denominados en este documento: **GET** y **SET**, cada uno de los cuales actúa sobre un registro a la vez. Además, el protocolo cuenta con un mecanismo simple de notificación de eventos por parte del microcontrolador. Cada comando estará limitado por un carácter de inicio, el cual será el carácter <TAB> cuyo valor numérico es 0x09 y un carácter de finalización que es el carácter <CR> cuyo valor es 0x0D. Estos caracteres evitarán que la memoria de datos del microcontrolador se llene de información basura cuando no haya un envío real de comandos.

- **Comando GET:** se usa para obtener el valor de un registro y su sintaxis es la siguiente:

<TAB>[id_registro]?<CR>

Donde [id_registro] es el identificador del registro del que se desea obtener el valor expresado como dos caracteres en el formato definido por el Código Estándar Americano para el Intercambio de Información (ASCII, *American Standard Code for Information Interchange*) en el que cada carácter es una cifra hexadecimal (0 a 9 o A a F). Este tipo de representación con caracteres ASCII permite la opción de enviar el comando al microcontrolador a través de un emulador de terminal tal como Hyperterminal o Hércules.

La respuesta del microcontrolador al comando GET, tiene la siguiente forma:

<TAB>[id_registro]=[valor_registro]<CR>

Donde el campo [valor_registro] tiene el mismo formato que el campo [id_registro], como dos cifras hexadecimales expresadas en caracteres ASCII.

Como ejemplo, si se desea leer el valor del registro CHANR, cuyo identificador hexadecimal es 0x0A (ver Anexo B), el comando es;

<TAB>0A?<CR>

Suponiendo que el registro tiene el valor 0xA3 la respuesta es la siguiente:

<TAB>0A=A3<CR>

- **Comando SET:** se emplea para modificar el valor de un registro. Sólo puede efectuarse sobre registros que permitan accesos de escritura. Su sintaxis es la siguiente:

<TAB>[id_registro]=[valor_registro]<CR>

Donde el campo [id_registro] tiene el mismo formato y significado que el expuesto para el comando GET mientras que el campo [valor_registro] contiene el valor del registro tiene el valor en el mismo formato que el identificador del registro. La respuesta del microcontrolador al comando SET, tiene la siguiente forma:

<TAB>[resultado]<CR>

Donde [resultado] es un indicador del resultado de la operación. Si la operación se realizó correctamente su valor será OK. En caso de que el campo [id_registro] contenga referencie a un registro que no permite escritura, el campo [resultado] toma el valor ER, indicando un error.

Como ejemplo: si se desea modificar el valor del registro RSSI0 cuyo identificador es 0x99 (ver Anexo B) al valor de 0x7C, el comando es el siguiente:

<TAB>99=7C<CR>

Sin embargo, puesto que este es un registro de sólo lectura (ver Anexo B) la respuesta es la siguiente:

<TAB>ER<CR>

- **Registros de Estado de Transmisión y Recepción:** para permitir al *software* ACADPP enviar al microcontrolador las órdenes de iniciar o detener una transmisión o una recepción sin añadir complejidad al protocolo de comunicaciones, se crearon dos registros especiales de lectura y escritura en el microcontrolador con los identificadores 0xA0 y 0xA1, los cuales representarán el estado de la transmisión y la recepción, respectivamente. Para iniciar una transmisión basta con enviar un comando SET que cambie el valor del registro 0xA0 a 0x01. Esto iniciará una transmisión con la última configuración que haya en los registros del transceptor. De forma similar, para detener una transmisión en curso, se procede a enviar un comando SET que establezca el valor del registro 0xA0 a 0x00. Del mismo modo para la recepción, se envía un comando SET al registro 0xA1 estableciendo su valor en 0x01 para iniciar recepción y en 0x00 para detener una que ya esté en curso.
- **Notificaciones:** Son avisos enviados de manera autónoma por el microcontrolador, informando que ha ocurrido un evento especial. En este protocolo el único evento de este tipo lo genera el transmisor en el momento en que finaliza una transmisión. Puesto que el fin de una transmisión representa un cambio de estado en el registro de estado 0xA0, la notificación de este evento es idéntica a la de un comando SET que establece el valor de este registro en cero, es decir:

<TAB>A0=00<CR>

Este protocolo es suficiente para que la aplicación ACADPP tenga un control completo sobre la configuración de la tarjeta eZ430-RF2500T y pueda obtener todos los datos de los resultados de cada prueba. Para que el *software* ACADPP realice un cambio de configuración, debe enviar el comando SET a cada uno de los registros que correspondan en dicha configuración. De forma similar, cuando una prueba finaliza, el *software* envía un comando GET solicitando el valor de cada uno de los registros que contienen la información del resultado de la prueba y de esta forma obtiene la información completa.

3.1.3 Diseño del *Firmware* del Microcontrolador MSP430F2274.

Como se mencionó en el capítulo 2, la implementación del protocolo SipliciTI[®] consta de 3 niveles: MRFI, NWK y APP. El nivel MRFI proporciona la interfaz mínima para el acceso al transceptor CC2500, tanto para su configuración como para el envío y recepción de paquetes. El *firmware* desarrollado para el sistema punto a punto, hace uso del código fuente del nivel MRFI de la API del protocolo SimpliciTI[®]. Sobre esta se implementó el conjunto extendido de registros y el protocolo de comunicaciones con el *software* ACADPP.

3.1.4 Diseño del *Software* ACADPP

Teniendo en cuenta los objetivos que se buscaba cumplir en el sistema de comunicación punto a punto, se determinaron los requerimientos que la aplicación ACADPP debía cumplir. Estos requerimientos llevaron a los casos de uso mostrados en la figura 3.4.

3.1.4.1 Descripción de Casos de Uso

En las tablas 3.1 a 3.12 se presenta la descripción general de cada uno de los doce casos del sistema ACADPP de uso mostrados en la figura 3.4.

Tabla 3.1 Descripción del Caso de Uso Conectar

| Caso de Uso 1 | Conectar |
|----------------------|---|
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Establecer conexión entre la aplicación ACADPP y la tarjeta eZ430-RF2500T |
| Resumen | El usuario verifica el puerto COM asignado a la tarjeta eZ430-RF2500 y procede a seleccionarlo entre la lista de puertos COM disponibles que muestra la aplicación. Una vez seleccionado procede a dar la orden de conexión y el sistema mostrará un mensaje indicando el resultado de la operación |

Tabla 3.2 Descripción del Caso de Uso Cargar Configuración

| Caso de Uso 2 | Cargar Configuración |
|----------------------|--|
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Recuperar una configuración de la base de datos y almacenarla en la memoria de trabajo de la aplicación |
| Resumen | El sistema presenta una lista de las configuraciones almacenadas en la base de datos, el usuario selecciona una de ellas e indica al sistema que desea cargarla. Como respuesta, el sistema recupera la configuración de la base de datos y muestra sus parámetros al usuario. |

Figura 3.4 Diagrama de Casos de Uso del Software ACADPP

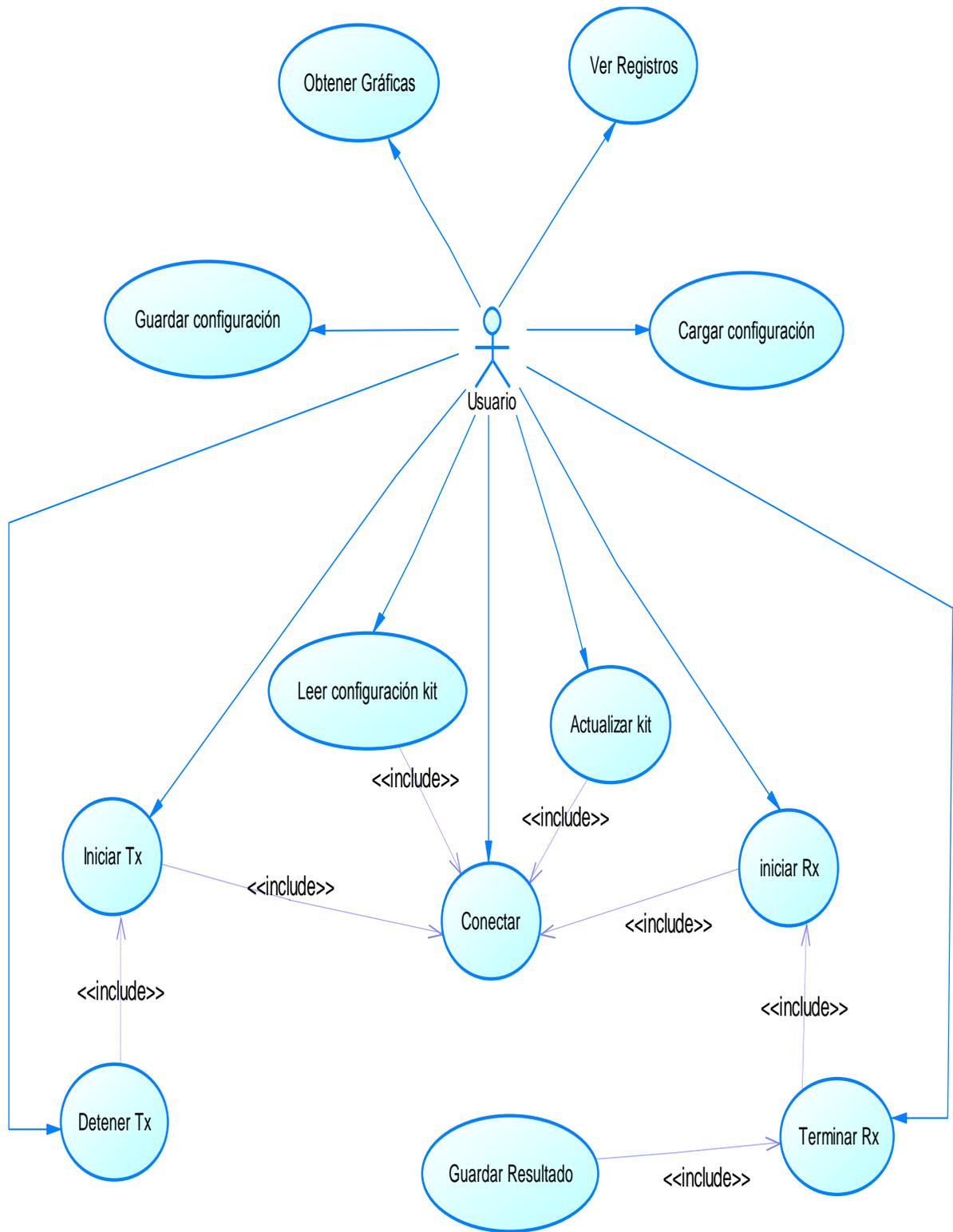


Tabla 3.3 Descripción del Caso de Uso Conectar Guardar Configuración

| | |
|----------------------|--|
| Caso de Uso 3 | Guardar Configuración |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Almacenar en la base de datos una configuración creada por el usuario. |
| Resumen | Mediante la interfaz principal del sistema, el usuario ajusta los valores de los parámetros de configuración deseados e indica al sistema su deseo de guardar la configuración en la base de datos. A continuación el usuario ingresa el nombre de la nueva configuración y confirma al sistema su deseo de guardar la configuración. Como resultado el sistema, procede a guardar la nueva configuración en la base de datos y a mostrar un mensaje indicando si la operación fue exitosa o no. |

Tabla 3.4 Descripción del Caso de Uso Actualizar Tarjeta

| | |
|----------------------|---|
| Caso de Uso 4 | Actualizar Tarjeta |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Descargar los datos presentes en la interfaz de configuración hacia la tarjeta eZ430-RF2500T. |
| Resumen | Una vez han sido ajustados los parámetros de configuración, o han sido cargados desde la base de datos, el usuario da la orden de actualizar la tarjeta eZ430-RF2500T. Como resultado el sistema envía uno a uno los registros de configuración hacia la tarjeta eZ430-RF2500T. Al finalizar el proceso, se muestra un mensaje indicando que la operación ha sido exitosa |

Tabla 3.5 Descripción del Caso de Uso Leer Configuración Tarjeta

| | |
|----------------------|---|
| Caso de Uso 5 | Leer Configuración Tarjeta |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Leer el valor de los registros de configuración de la tarjeta eZ430-RF2500T, cargarlos en la memoria de trabajo y mostrarlos en la interfaz de configuración |
| Resumen | El usuario solicita al sistema la lectura de la configuración de la tarjeta eZ430-RF2500T. El sistema solicita uno a uno el estado de todos los registros correspondientes y finalmente mostrará los parámetros de configuración en la interfaz de configuración, junto con un mensaje indicando que la operación ha sido exitosa |

Tabla 3.6 Descripción del Caso de Uso Leer Configuración de la tarjeta eZ430-RF2500T

| | |
|----------------------|---|
| Caso de Uso 6 | Ver Registros |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Ver los valores de cada uno de los registros de configuración |
| Resumen | El usuario solicita al sistema ver la lista de registros y el sistema procede a mostrar dicha lista en la que se observan el nombre de cada registro y su valor expresado en hexadecimal. |

Tabla 3.7 Descripción del Caso de Uso Iniciar Rx

| | |
|----------------------|--|
| Caso de Uso 7 | Iniciar Rx |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Colocar a la tarjeta en modo de recepción de paquetes. |
| Resumen | Una vez que los parámetros de configuración tienen los valores deseados para la prueba a realizar y han sido transferidos a la tarjeta eZ430-RF2500T, el usuario da la orden al sistema para iniciar recepción. Entonces el sistema envía a la tarjeta la orden de iniciar recepción, ante lo cual ella inicia el modo de recepción y queda a la espera de paquetes. |

Tabla 3.8 Descripción del Caso de Uso Terminar Rx

| | |
|----------------------|---|
| Caso de Uso 8 | Terminar Rx |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Terminar la recepción de paquetes y recolectar la información de los resultados de la prueba |
| Resumen | Una vez termine el envío de paquetes por parte del transmisor, el usuario da al sistema la orden de terminar la transmisión. Este, a su vez, se encarga de recolectar los datos de los resultados de la prueba y mostrarlos en la sección de resultados de la interfaz de configuración |

Tabla 3.9 Descripción del Caso de Uso Guardar Resultado

| | |
|----------------------|--|
| Caso de Uso 9 | Guardar Resultado |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Almacenar en la base de datos los resultados obtenidos en el receptor después de una prueba. |
| Resumen | Una vez terminada una prueba y recolectados los resultados de la misma en la aplicación del dispositivo receptor, el usuario procede a solicitar al sistema que guarde el resultado. El sistema solicita al usuario elegir el escenario e ingresar la distancia entre el transmisor y el receptor. Una vez hecho esto, el usuario confirma la operación, el sistema registra el resultado en la base de datos e informa al usuario que la operación fue exitosa. |

Tabla 3.10 Descripción del Caso de Uso Iniciar Tx

| | |
|-----------------------|--|
| Caso de Uso 10 | Iniciar Tx |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Inicia la transmisión de paquetes. |
| Resumen | Una vez que los parámetros de configuración tienen los valores deseados para la prueba a realizar y han sido transferidos a la tarjeta eZ430-RF2500T, el usuario ordena al sistema iniciar la transmisión. Entonces la tarjeta inicia el envío de paquetes hasta completar la cantidad de paquetes definida en los parámetros de configuración. Entonces procede a mostrar un mensaje al usuario indicando que la transmisión ha sido exitosa. |

Tabla 3.11 Descripción del Caso de Uso Detener Tx

| | |
|-----------------------|--|
| Caso de Uso 11 | Detener Tx |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | Interrumpir una transmisión de paquetes que se encuentra en curso. |
| Resumen | Si una transmisión de paquetes se encuentra en curso, el usuario puede dar una orden al sistema para interrumpir la transmisión. En tal caso el sistema envía a la tarjeta eZ430-RF2500T la orden de detener la transmisión y una vez ha recibido confirmación de esta, presenta un aviso al usuario indicando que la operación ha sido exitosa. |

Tabla 3.12 Descripción del Caso de Uso Generar Gráficas

| | |
|-----------------------|---|
| Caso de Uso 12 | Generar Gráficas |
| Iniciador | Usuario |
| Propósito | A partir de los datos en la base de datos genera un conjunto de archivos de MATLAB® cada uno con el código necesario para generar las gráficas de los resultados |
| Resumen | Una vez completadas todas las pruebas y recolectados todos los datos de ellas en la base de datos, el usuario da al sistema la orden de generar gráficas. En respuesta, el sistema realiza la lectura de la información y crea un conjunto de archivos de extensión .m en los cuales los promedios de los resultados son convertidos en vectores de datos y son graficados. |

3.1.4.2 Arquitectura del Software

El diseño del *software* ACADPP se realizó siguiendo el Paradigma Orientado a Objetos (POO). Además se diseñó una arquitectura multicapas la cual se muestra en la figura 3.5. Esta arquitectura se basó en las tres capas propuestas por el patrón de diseño Modelo Vista Controlador (MVC, *Model View Controller*) agregando dos capas adicionales: la de persistencia y la de conexión. Este modelo arquitectural tiene como propósito lograr un *software* con alta cohesión y bajo acoplamiento, lo cual es uno de los objetivos principales del POO. A continuación se describe las funciones realizadas por cada capa:

Figura 3.5 Arquitectura en Capas del Software ACADPP



- **Capa Vista:** está conformada por las interfaces gráficas de usuario, que son el principal medio e interacción entre el usuario y la aplicación.
- **Capa Control:** contiene la lógica de la aplicación. Se encarga de coordinar el funcionamiento de todas las demás capas.
- **Capa Modelo:** está formada por las representaciones en forma de objetos, de los datos manejados por la aplicación.
- **Capa Persistencia:** se encarga de guardar y recuperar de la base de datos los objetos de la capa modelo, ocultando los detalles de la conexión y acceso a la base de datos.
- **Capa Conexión:** proporciona una abstracción de la conexión con el *hardware* de la tarjeta eZ430-RF2500T, que permite el envío y recepción de datos ocultando los detalles de implementación de dicha conexión.

Con el fin de reducir el acoplamiento entre la capa de control y las capas de persistencia y conexión, la comunicación entre estas capas y la capa de control se ha realizado por medio de interfaces, cuyas instancias son creadas empleando el patrón *Factory*¹⁷. De esta manera, la capa de control puede usar las funcionalidades de estas dos capas, sin depender de los detalles de implementación de las mismas.

3.1.4.3 Modelo Estático de la Arquitectura.

Una vez definidos los casos de uso del sistema y las capas de la arquitectura, se procedió a elaborar el diseño de clases para cada capa de esta. Las figuras desde la 3.6 hasta la 3.10 muestran el diagrama de clases de cada una de las cinco capas. Mientras que en la figura 3.11 se observa el diagrama de clases completo de la aplicación ACADPP. En el anexo B se encuentra la descripción de cada una de las clases del sistema.

¹⁷ El patrón *Factory* es una forma de diseño en la que las instancias de algunas clases son creadas por una clase especial denominada *Factory* o *Fábrica*. Esto se realiza con el fin de ocultar la implementación de las clases de unas capas a las clases que utilizan las funcionalidades de dichas capas, de manera que el funcionamiento de una capa no dependa directamente de la forma en que está implementada la otra.

Figura 3.6 Diagrama de Clases de la Capa Persistencia del Software ACADPP

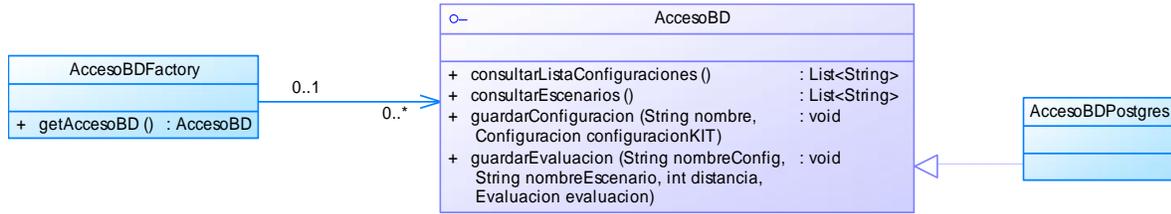


Figura 3.7 Diagrama de Clases de la Capa Control del Software ACADPP

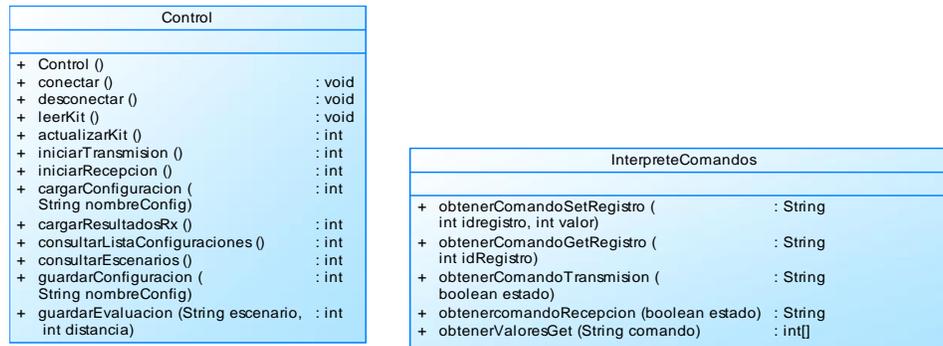


Figura 3.8 Diagrama de Clases de la Capa Conexión del Software ACADPP

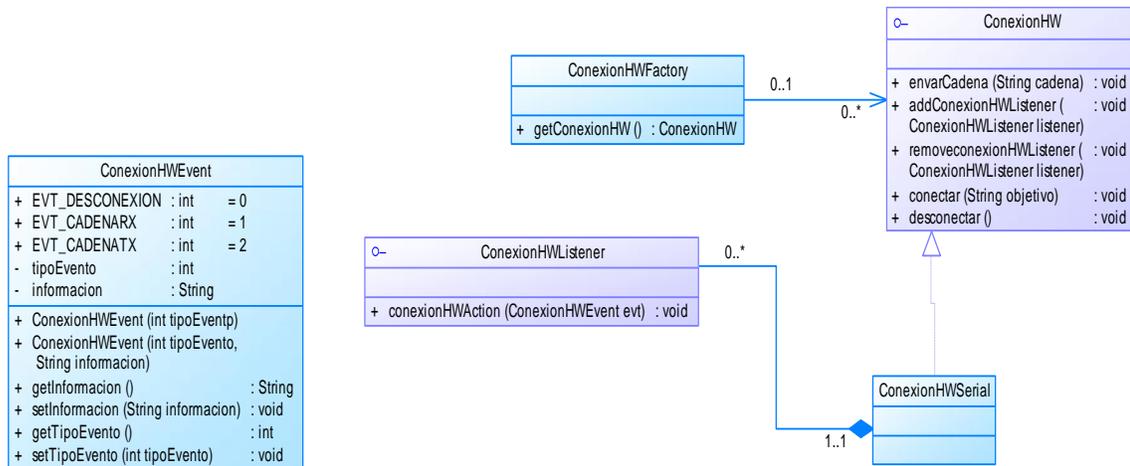


Figura 3.9 Diagrama de Clases de la Capa Modelo del Software ACADPP

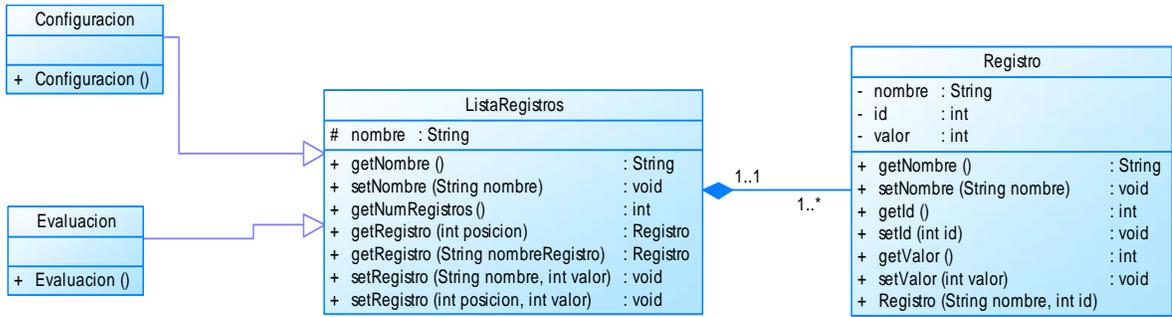


Figura 3.10 Diagrama de Clases de la Capa Vista del Software ACADPP

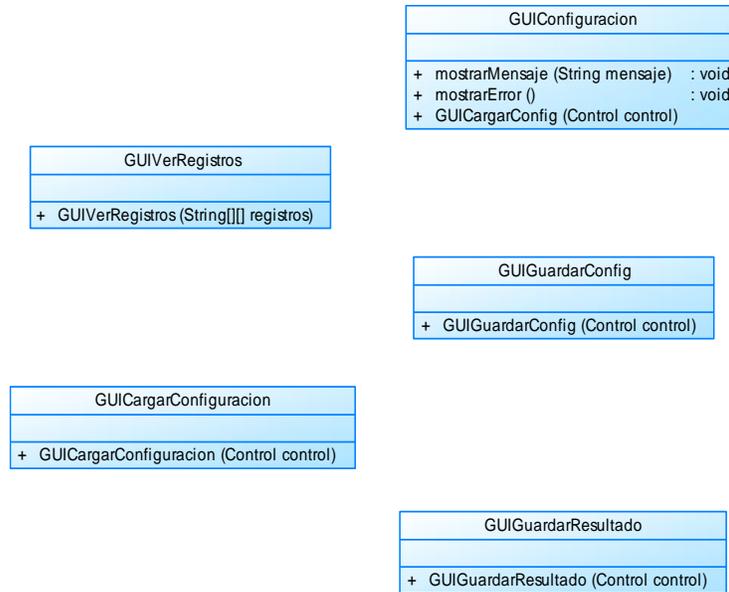
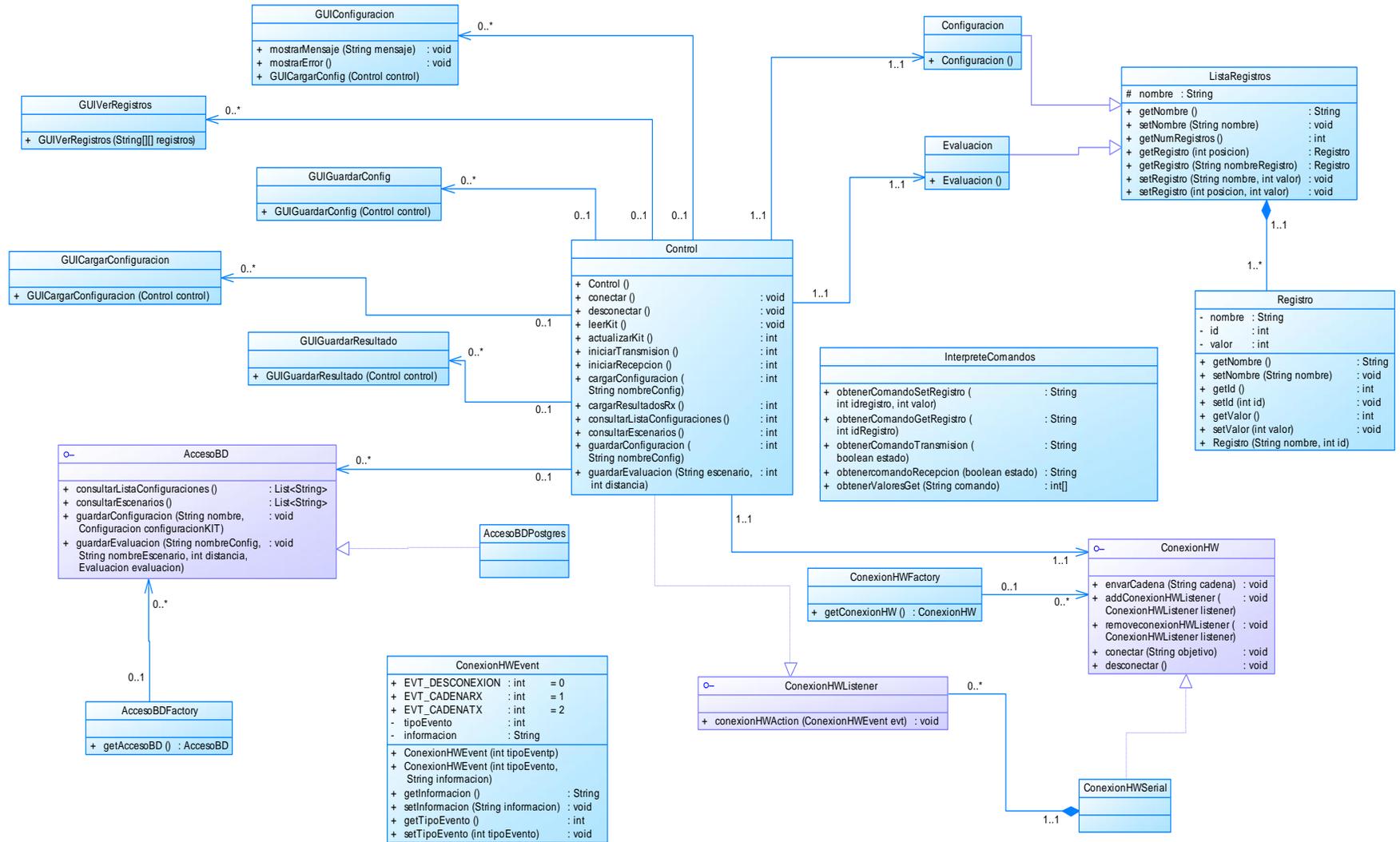


Figura 3.11 Diagrama de Clases Completo del Software ACADPP



3.1.4.4 Interfaces de Usuario.

En las figuras 3.12 a 3.17 se muestran las principales Interfaces Gráficas de Usuario (GUI, *Graphical User Interfaces*) que permiten la realización de todos los casos de uso del software ACADPP.

Figura 3.12 GUI Mostrar Configuración del Software ACADPP

The screenshot displays the 'Configuración: 001:FSK-CH0-2400-No White-SEQ1-Pmax' window. It is divided into several sections:

- Conexion con el hardware:** PuertoSerial: COM1, Estado: Conectado, Conectar button.
- Parametros de transmision RF:** Includes fields for Tipo de Modulación (FSK), Desviación Real [Hz] (38.085), Desviación Mínima [Hz] (1586.9140625), Desviación Máxima [Hz] (380859.375), Frecuencia base [Hz] (2.409.999.969,482), Separación de canales [Hz] (399.902,344), Número de Canal (0), and Potencia de Transmisión (0dBm).
- Manejo de Paquetes:** Includes Número de bytes del preámbulo (4 bytes), Conf. Palabra SYNC (16/16 sync word bits detected), Palabra de sincronización (D391), Contenido de paquetes (Secuencia1 (11111111)), Tasa de transmisión [bps] (2.4Kbps), and Numero de paquetes a transmitir (250).
- Configuración de recepción:** Includes Ancho de banda Filtro Rx (203 KHz), Verificar Dirección (No address check), Dirección (00), RSSI, LQI, Num. Bits Errados, Num. Bits Totales, Num. Paquetes Errados, Num. Paquetes Rx, Num. Paquetes Perdidos, BER, and PER.
- Acciones:** Cargar Configuración, Guardar Config., Leer config KIT, Actualizar KIT, Iniciar Recepción, Iniciar Transmisión, Ver Registros.

Figura 3.13 GUI Cargar Configuración del Software ACADPP

The screenshot shows a dialog box titled 'Configuraciones disponibles' with a dropdown menu containing '001:FSK-CH0-2400-No White-SEQ1-Pmax'. Below the dropdown are two buttons: 'Cargar' and 'Cancelar'.

Figura 3.14 GUI Cargar Configuración del Software ACADPP

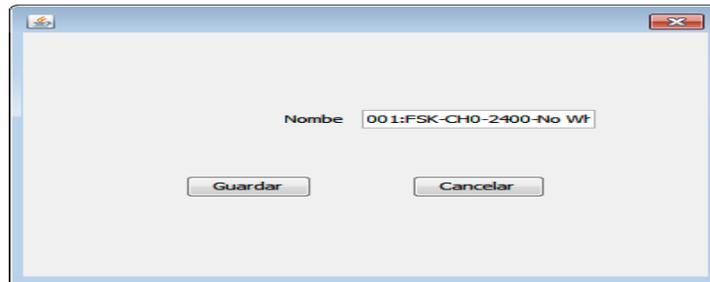


Figura 3.15 GUI Mostrar Registros del Software ACADPP

| Nombre Registro | ID Registro | Valor Registro |
|-----------------|-------------|----------------|
| SYNC1 | 04 | D3 |
| SYNC0 | 05 | 91 |
| PKTCTRL1 | 07 | 04 |
| PKTCTRL0 | 08 | 01 |
| ADDR | 09 | 00 |
| CHANNR | 0A | 00 |
| FSCTRL1 | 0B | 08 |
| FREQ2 | 0D | 5C |
| FREQ1 | 0E | B1 |
| FREQ0 | 0F | 3B |
| MDMCFG4 | 10 | 86 |
| MDMCFG3 | 11 | 83 |
| MDMCFG2 | 12 | 02 |
| MDMCFG1 | 13 | 23 |
| MDMCFG0 | 14 | F8 |
| DEVIATN | 15 | 44 |
| FOCCFG | 19 | 16 |
| BSCFG | 1A | 6C |
| AGCCTRL2 | 1B | 03 |
| AGCCTRL1 | 1C | 40 |
| AGCCTRL0 | 1D | 91 |

Figura 3.16 GUI Guardar Resultado del Software ACADPP

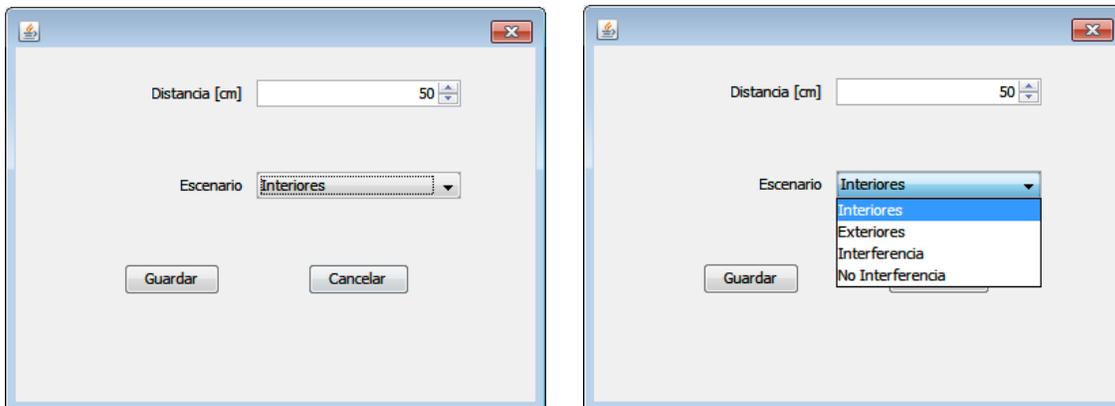
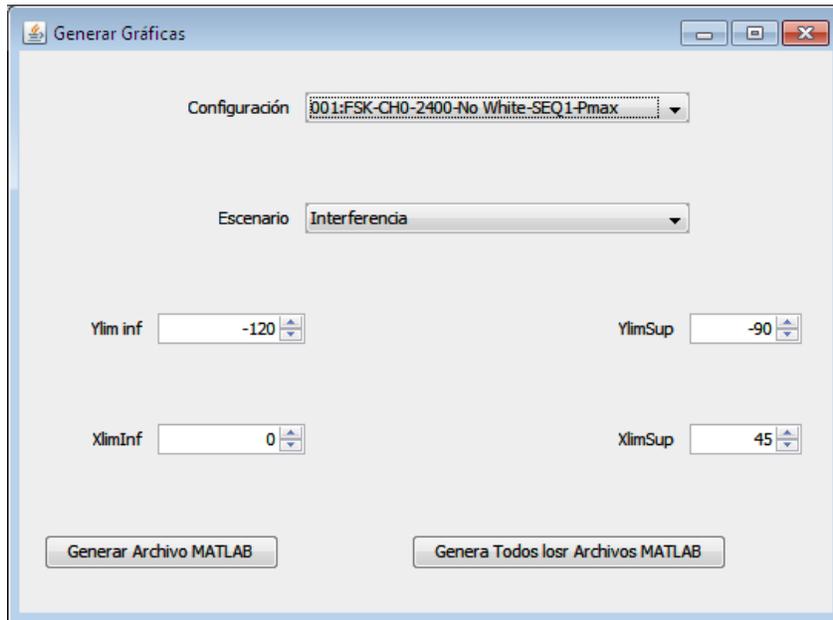


Figura 3.17 GUI Generar Archivos MATLAB



3.2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN PUNTO A MULTIPUNTO

El sistema de comunicación punto a multipunto se implementó empleando el código fuente del protocolo de comunicaciones simplicITI, creado por Texas Instruments. El sistema consta de una tarjeta eZ430-RF2500T programada como AP, la cual se conecta con un computador portátil por medio de la interfaz USB eZ430-RF, y de entre una y tres tarjetas más, cada una programada como ED. La figura 3.18 Muestra la estructura física del sistema implementado. El sistema emplea una topología en estrella, en la que el AP coordina el funcionamiento completo de la red, siendo el encargado de autorizar el ingreso de los ED y de recibir todos los paquetes procedentes de los ED y hacerlos llegar a sus respectivos destinos. A pesar de que la topología física es punto a multipunto, a nivel lógico las conexiones entre los dispositivos son punto a punto.

En este sistema, todos los ED establecen enlaces punto a punto bidireccionales con el AP. A nivel general, el funcionamiento del sistema es el siguiente: el sistema tiene tres modos de funcionamiento dependiendo de cuál dispositivo es el originador de los paquetes que se transmiten.

El primer modo es el modo **Solamente el AP Origina Paquetes (SAOP)** en el cual el AP es el que inicia el envío de paquetes enviando una cantidad de paquetes fija a cada uno de los ED. Los ED, por su parte, devuelven al AP cada uno de los paquetes que reciben y el AP, a su vez, espera la llegada del eco de cada paquete. En caso de no recibir el eco, el AP realiza hasta dos retransmisiones y si, no recibe el eco hasta la segunda retransmisión, el paquete enviado se contará como un paquete perdido. El ED, realiza un registro local de los paquetes recibidos y de los errores contados en cada paquete, el cual se catalogará. Por su parte, el AP notifica al PC a la aplicación ACADPP, instalada en el PC, la llegada de cada paquete junto con la información del origen del paquete, los bits errados, el RSSI y el LQI. Una vez que el AP termina el envío de paquetes, envía a cada

ED un paquete especial solicitando el informe de resultados registrados por el ED, el cual es enviado por el ED en un conjunto de varios paquetes en los que se encuentra su propio registro de errores. Cuando el AP recibe estos paquetes, transfiere la información hacia el software ACADPMP.

El segundo modo es el modo **Solamente ED Origin Paquetes (SEOP)**. En este modo los ED envían paquetes hacia el AP. El AP, por su parte, reenvía los paquetes de regreso al ED y los dos dispositivos realizan sus registros de errores y de paquetes recibidos. De la misma manera que en el modo solamente AP transmite, los ED esperan el eco de los paquetes que envían hacia el AP y en caso de no recibirlo hacen hasta dos retransmisiones y si después de las dos retransmisiones no recibe el eco, registran el paquete como paquete perdido. Cuando el AP recibe un paquete, envía la notificación hacia el software ACADPMP con la información sobre el paquete recibido. Una vez que un ED termina de efectuar su transmisión, envía un conjunto de paquetes que contiene los resultados de su registro de medidas.

El tercer modo es el modo **AP y ED Originan Paquetes (AEOP)** y es una superposición de los dos modos anteriores, es decir, tanto el AP como los ED originan paquetes y esperan ecos de ellos. En este modo se produce la mayor congestión de la red y es cuando se espera observar un mayor número de pérdidas de paquetes debido a colisiones.

Figura 3.18 Diagrama General del Sistema de Comunicación Punto a Multipunto Implementado.



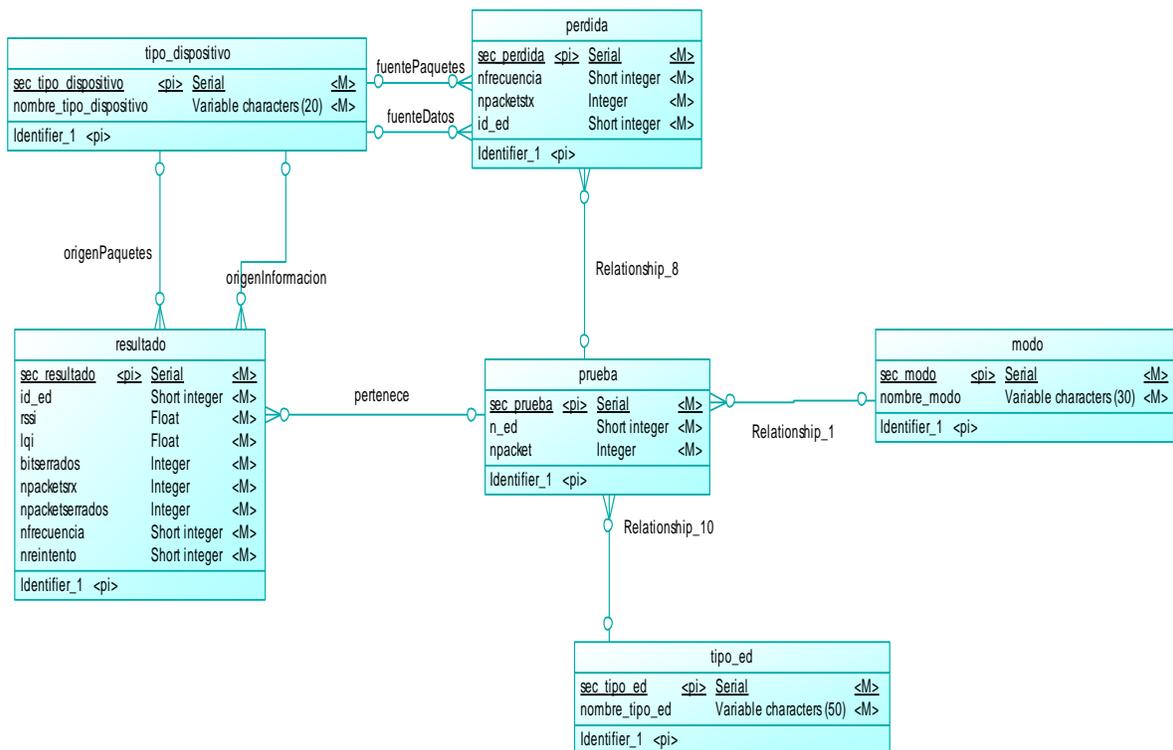
3.2.1 Diseño de la Base de Datos para el Sistema Punto a Multipunto

La base de datos empleada para el sistema punto a multipunto consta de 6 tablas, como se observa en la figura 3.19. A continuación se hace una lista de dichas tablas.

- **modo**: contiene una lista de los modos de funcionamiento del sistema.

- **tipo_ed:** contiene una lista de los tipos de ED existentes (Sleep/Polling o No Sleeping/Polling)
- **tipo_dispositivo:** contiene una lista de los tipos de dispositivos existentes (AP o ED)
- **prueba:** realiza un registro de las pruebas realizadas.
- **resultado:** guarda los resultados parciales de cada prueba, asociando cada uno con la prueba correspondiente
- **pérdida:** registra las pérdidas de paquetes reportadas por los dispositivos generadores de paquetes en cada prueba.

Figura 3.19 Modelo Entidad Relación de la Base de Datos Empleada en el Sistema Punto a Multipunto



3.2.2 Protocolo de Comunicaciones entre la Tarjeta EZ430-RF2500T y el Software ACADPMP

En el diseño del sistema punto a punto, el dispositivo receptor almacenaba en su memoria interna los resultados de la prueba mediante un conjunto de registros definidos como extensión de los registros de configuración del transceptor CC2500 y posteriormente el software ACADPP realizaba una lectura de estos registros. Sin embargo, en el sistema punto a multipunto, el AP tiene conexión con diferentes ED y la memoria interna de este dispositivo no resulta suficiente para almacenar todos los resultados de la prueba. Por lo tanto resultó necesario diseñar un nuevo protocolo de comunicación entre el AP y el software ACADPMP. En este nuevo protocolo, el AP notifica al software ACCADPMP por cada paquete que recibe, enviando junto con la notificación la información relacionada con

el paquete tal como el RSSI, LQI, bits errados, origen del paquete, frecuencia de recepción y el número de retransmisiones realizadas antes de la recepción exitosa del paquete. Del mismo modo, cuando el AP es el origen de los paquetes y no recibe eco después de dos retransmisiones, el AP notifica al software ACADPMP acerca de un paquete perdido. De esta manera, es el propio software ACADPMP el encargado de llevar el registro completo de la prueba. De manera similar, cuando el AP recibe información sobre los registros de resultados realizados por los ED, los datos son enviados al software ACADPMP. De este modo, el software ACADPMP recibe una información completa sobre lo que sucede tanto en el AP como en los ED durante el desarrollo de la prueba.

El protocolo de comunicaciones entre el AP y el software ACADPMP, define un conjunto de mensajes, los cuales se identifican mediante dos caracteres ascii. Los siguientes definidos en el protocolo son los siguientes:

- **Mensaje AP:** este mensaje es una notificación de paquete perdido realizada por el AP. Incluye información sobre el ED al que iba dirigido el paquete perdido y sobre el canal en el que se realizaba la transmisión.
- **Mensaje AR:** este mensaje indica que el AP ha recibido un paquete de un ED, ya sea que este sea eco de un paquete previamente enviado por el AP) o que sea un paquete enviado originalmente por el ED. Este mensaje incluye información sobre el ED del que procede el paquete, el número de retransmisiones que fueron necesarias para que el paquete llegara a su destino, si este paquete fue originalmente enviado por el AP o el ED y las métricas relacionadas con el paquete tales con RSSI, LLQI, bits errados
- **Mensaje TE:** este mensaje se envía cuando un ED, originador de paquetes ha terminado de transmitir y está enviando su registro de resultados.
- **Mensaje RE:** este mensaje se envía cuando un ED, receptor de paquetes está enviando su registro de resultados.
- **Mensaje NE:** Este mensaje indica que un nuevo ED ha ingresado a la red.
- **Mensaje AT:** Este mensaje lo envía el AP cuando está en un modo en el que él es originador de paquetes y ha terminado de transmitir.

3.2.3 Diseño del *Firmware* del Microcontrolador MSP430F2274

Como se mencionó en el capítulo 1, la implementación de las aplicaciones del protocolo simpliciTI® deben realizarse empleando la API de la capa de aplicación descrita en la sección 1.3.3. Por lo tanto, el *firmware* para el sistema punto a multipunto se ha realizado empleando dicha API programando a uno de los dispositivos como AP y a los demás como ED e implementando en ellos el protocolo descrito en la sección anterior.

3.2.4 Diseño del *Software* ACADPMP

3.2.4.1 Descripción de los Casos de Uso

En las tablas 3.13 a 3.16 se presenta la descripción general de cada uno de los casos de uso del sistema ACADPMP.

Figura 3.20 Diagrama de Casos de Uso del Software ACADPMP.

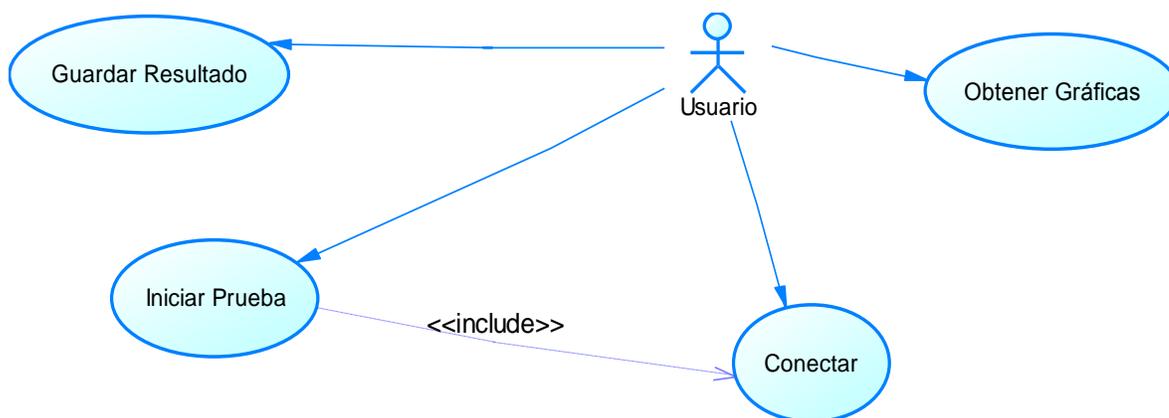


Tabla 3.13. Descripción del Caso de Uso Conectar

| Caso de Uso 1 | Conectar |
|------------------|--|
| Iniciador | Usuario. |
| Propósito | Establecer conexión entre la aplicación ACADS y el AP.. |
| Resumen | El usuario verifica el puerto COM asignado a la tarjeta eZ430-RF2500 y procede a seleccionarlo entre la lista de puertos COM disponibles que muestra la aplicación. Una vez seleccionado procede a dar la orden de conexión y el sistema mostrará un mensaje indicando el resultado de la operación. |

Tabla 3.14. Descripción del Caso de Uso Iniciar Prueba

| Caso de Uso 2 | Iniciar Prueba |
|------------------|---|
| Iniciador | Usuario. |
| Propósito | Iniciar la ejecución de una prueba. |
| Resumen | El usuario elige los parámetros de configuración de la prueba y da la orden al sistema de iniciar la prueba. Entonces el sistema inicia el intercambio de paquetes entre el AP y los ED y envía los datos acerca de los paquetes recibidos. Al finalizar el intercambio de paquetes, el AP informa a la aplicación que la prueba ha terminado y este da aviso al usuario y muestra los resultados de la prueba. |

Tabla 3.15. Descripción del Caso de Uso Guardar Resultado

| Caso de Uso 3 | Guardar Resultado |
|------------------|--|
| Iniciador | Usuario. |
| Propósito | Guardar en la base de datos el resultado de la prueba. |
| Resumen | Una vez finalizada una prueba el usuario puede dar la orden de guardar el resultado de esta en la base de datos. Una vez realizada esta operación, el sistema presenta un mensaje de aviso indicando que la operación fue exitosa. |

Tabla 3.16. Descripción del Caso de Uso Obtener Gráficas

| | |
|----------------------|---|
| Caso de Uso 4 | Obtener Gráficas |
| Iniciador | Usuario. |
| Propósito | Obtener las gráficas que muestran los resultados de todas las pruebas de desempeño. |
| Resumen | Una vez todas las pruebas han sido ejecutadas y guardadas en la base de datos, el usuario puede dar la orden de generar los archivos de MATLAB que permiten obtener las gráficas de los resultados. El sistema genera los archivos .m en los que la información recolectada en la base de datos es representada como vectores y graficada. Al finalizar el proceso, el sistema muestra un mensaje indicando que la operación se realizó satisfactoriamente. |

3.2.4.2 Arquitectura del Software

El diseño del software ACADPMP se realizó siguiendo el mismo modelo de arquitectura en capas que se empleó en el diseño del software ACADPP, el cual es descrito en la sección 3.1.4.2.

3.2.4.3 Modelo Estático de la Arquitectura

Una vez definidos los casos de uso del sistema y las capas de la arquitectura, se procedió a elaborar el diseño de clases para cada capa de esta. Las figuras 3.21 a 3.24 muestran el diagrama de clases de cada una de las capas. La capa conexión de este software es idéntica a la empleada en el software ACADPP. En la figura 3.25 se observa el diagrama de clases completo de la aplicación ACADPMP.

Figura 3.21 Diagrama de Clases de la Capa Persistencia del Software ACADPMP

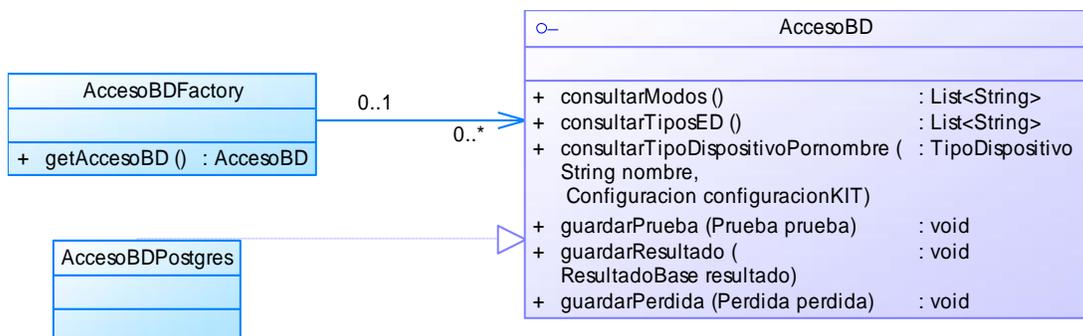


Figura 3.22 Diagrama de Clases de la Capa Control del Software ACADPMP

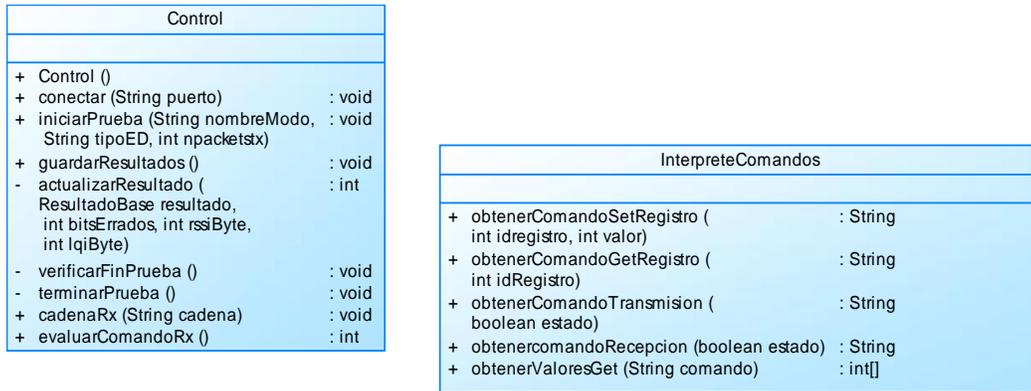


Figura 3.23 Diagrama de Clases de la Capa Vista del Software ACADPMP

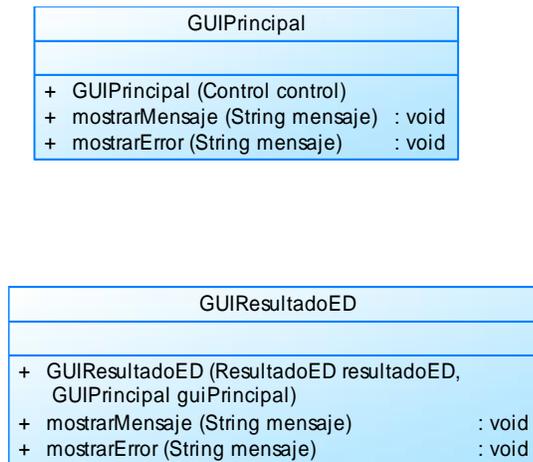


Figura 3.24 Diagrama de Clases de la Capa Modelo del Software ACADPMP

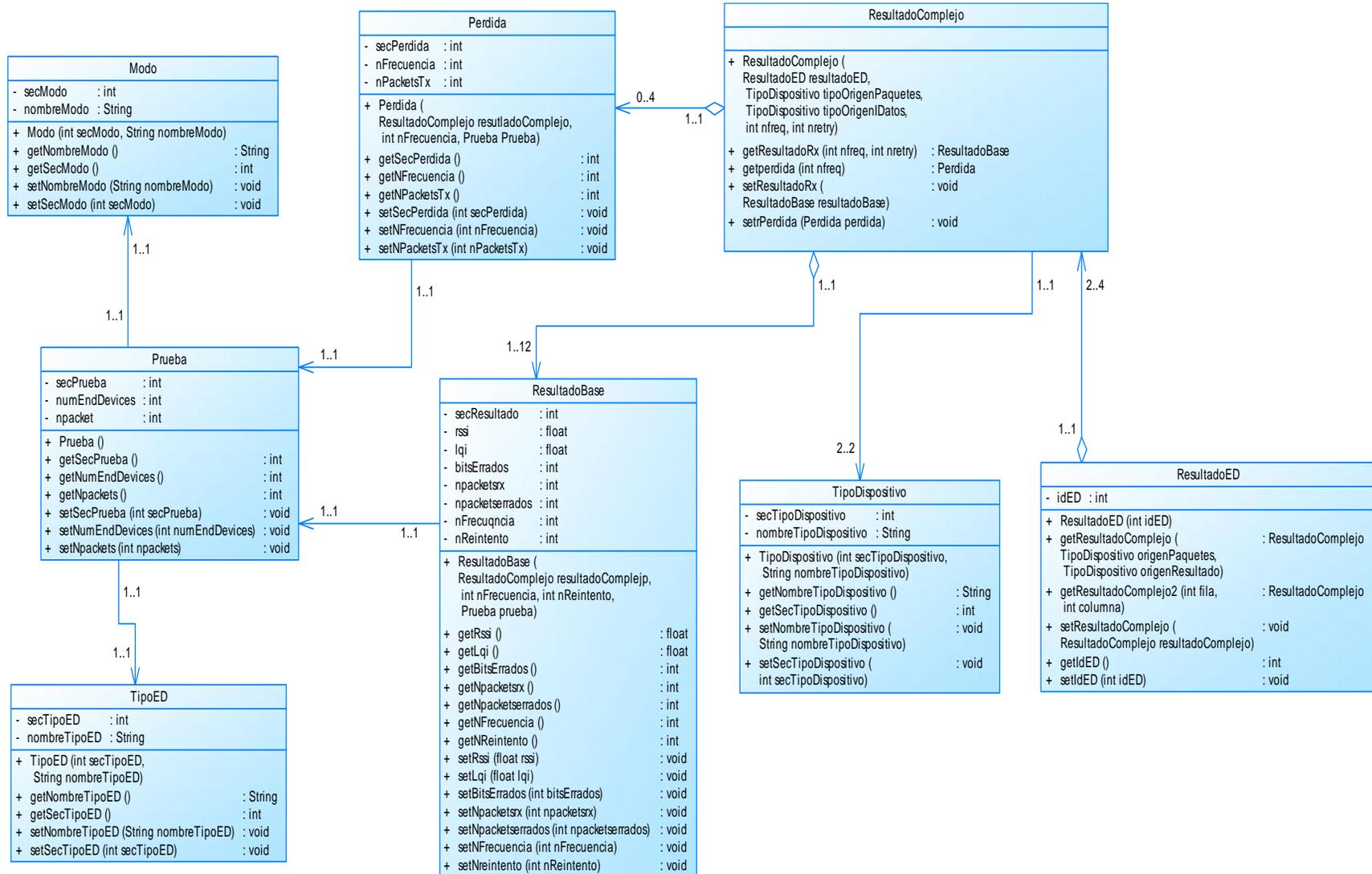
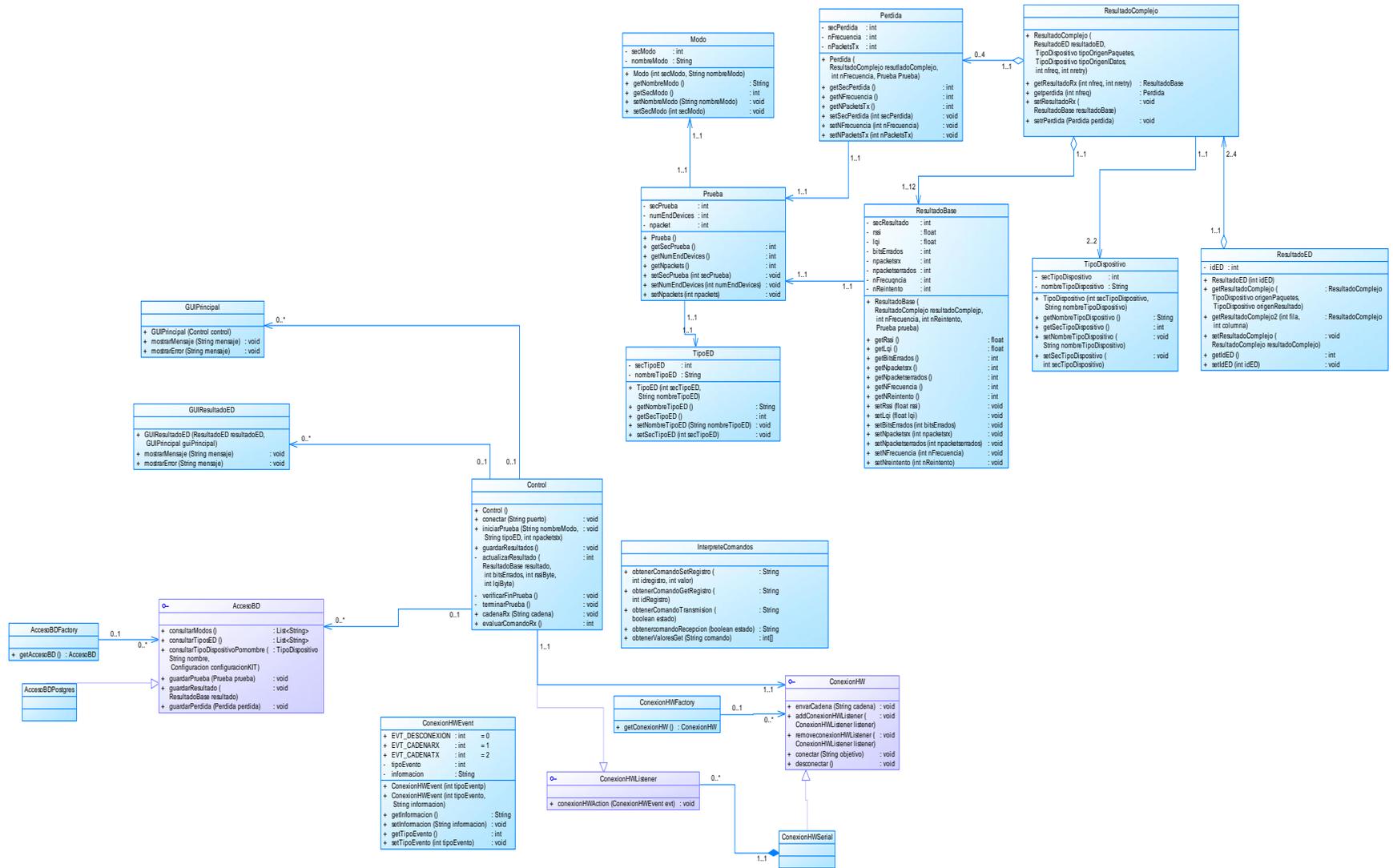


Figura 3.25 Diagrama de Clases Completo del Software ACADPMP



3.2.4.4 Interfaces de Usuario

En las figuras 3.26, 3.27 y 3.28 se muestran las GUI que permiten la realización de todos los casos de uso del software ACADPMP.

Figura 3.26 GUI Principal del Software ACADPMP

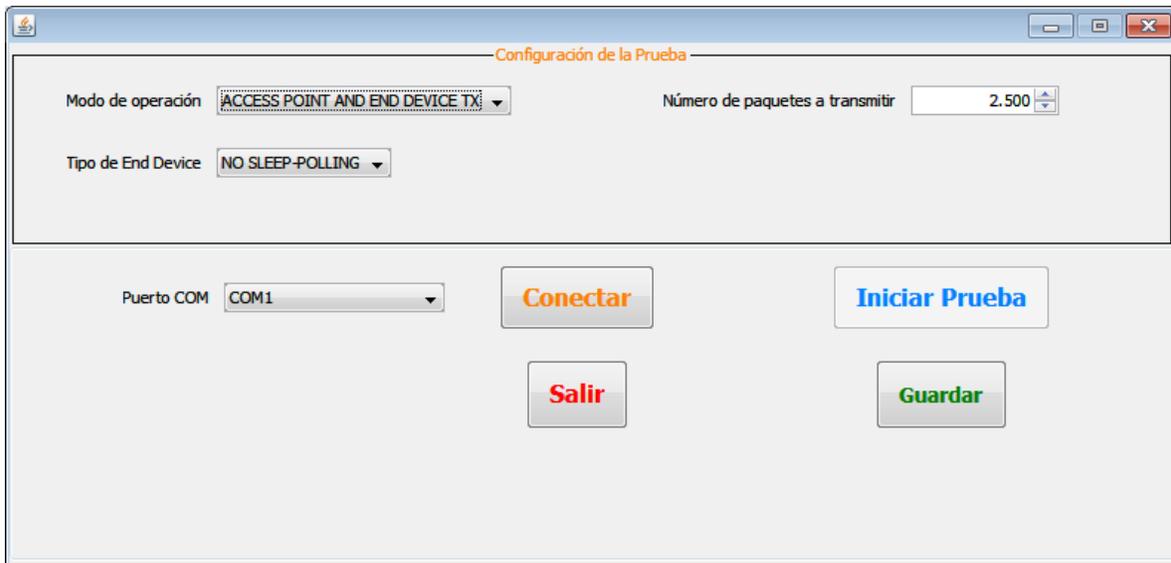


Figura 3.27 GUI Resultados, Pestaña de Datos del Dispositivo Originador de Paquetes del Software ACADPMP

| Frecuencias | 0 Reintentos | | 1 Reintento | | 2 Reintentos | | Paquetes Perdidos |
|--------------|------------------|-------|------------------|-----|------------------|-----|----------------------|
| Frecuencia 0 | Rssi | -51,5 | Rssi | -50 | Rssi | -50 | Paquetes Perdidos 53 |
| | Lqi | 5 | Lqi | 5 | Lqi | 5 | |
| | Paquetes Rx | 2.201 | Paquetes Rx | 125 | Paquetes Rx | 121 | |
| | Paquetes Errados | 57 | Paquetes Errados | 17 | Paquetes Errados | 7 | |
| | Bits Errados | 1.503 | Bits Errados | 308 | Bits Errados | 19 | |
| Frecuencia 1 | Rssi | | Rssi | | Rssi | | Paquetes Perdidos |
| | Lqi | | Lqi | | Lqi | | |
| | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | | |
| | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | | |
| | Bits Errados | | Bits Errados | | Bits Errados | | |
| Frecuencia 2 | Rssi | | Rssi | | Rssi | | Paquetes Perdidos |
| | Lqi | | Lqi | | Lqi | | |
| | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | | |
| | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | | |
| | Bits Errados | | Bits Errados | | Bits Errados | | |
| Frecuencia 3 | Rssi | | Rssi | | Rssi | | Paquetes Perdidos |
| | Lqi | | Lqi | | Lqi | | |
| | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | | |
| | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | | |
| | Bits Errados | | Bits Errados | | Bits Errados | | |

Figura 3.28 GUI Resultados, Pestaña de Datos del Dispositivo Receptor de Paquetes del Software ACADPMP

| Frecuencias | 0 Reintentos | | 1 Reintento | | 2 Reintentos | |
|--------------|------------------|-------|------------------|-----|------------------|-----|
| Frecuencia 0 | Rssi | -50,5 | Rssi | -53 | Rssi | -53 |
| | Lqi | 6 | Lqi | 5 | Lqi | 5 |
| | Paquetes Rx | 2.211 | Paquetes Rx | 127 | Paquetes Rx | 121 |
| | Paquetes Errados | 56 | Paquetes Errados | 15 | Paquetes Errados | 7 |
| | Bits Errados | 1.483 | Bits Errados | 273 | Bits Errados | 19 |
| Frecuencia 1 | Rssi | | Rssi | | Rssi | |
| | Lqi | | Lqi | | Lqi | |
| | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | |
| | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | |
| | Bits Errados | | Bits Errados | | Bits Errados | |
| Frecuencia 2 | Rssi | | Rssi | | Rssi | |
| | Lqi | | Lqi | | Lqi | |
| | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | |
| | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | |
| | Bits Errados | | Bits Errados | | Bits Errados | |
| Frecuencia 3 | Rssi | | Rssi | | Rssi | |
| | Lqi | | Lqi | | Lqi | |
| | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | | Paquetes Rx | |
| | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | | Paquetes Errados | |
| | Bits Errados | | Bits Errados | | Bits Errados | |

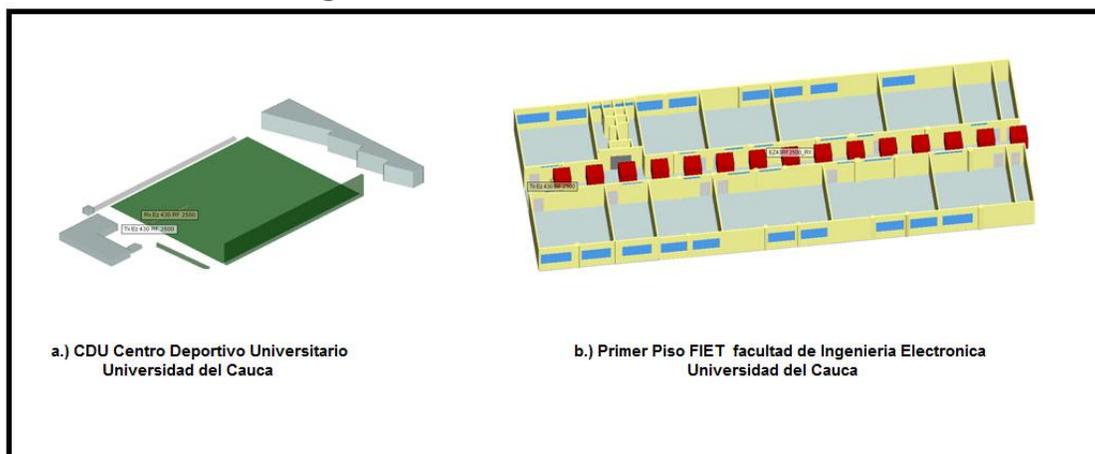
3.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE PREDICCIÓN DE PROPAGACIÓN WIRELESS INSITE®

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos de algunas de las pruebas experimentales fue necesario hacer uso la herramienta de simulación Wireless InSite®, la cual es una herramienta de predicción de propagación de ondas electromagnéticas. Por medio de Wireless InSite®, se logra modelar los escenarios de evaluación del sistema y simular el sistema de comunicaciones de datos inalámbrico tanto en interiores como en exteriores, dichos escenarios se muestran en la figura 3.29.

Esta herramienta hace uso de modelos de propagación empleados en la predicción de cobertura de sistemas inalámbricos, estos modelos permiten predecir la pérdida de potencia que sufre la señal a una determinada distancia del transmisor [19]. Dentro de los modelos de propagación que ofrece esta herramienta de simulación se encuentran cuatro modelos basados en la técnica de trazado de rayos: cañón urbano (*urban canyon*), urbano rápido 3D (*fast urban 3D*), plano vertical (*vertical plane*), y completo 3D (*full 3D*) los cuales combinan algoritmos de trazado de rayos con la Teoría Uniforme de Difracción (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*)¹⁸ [19].

¹⁸ Disparo y Rebote de Rayo (SBR, *Shooting and Bouncing Ray*).

Figura 3.29 Escenarios de Simulación



Para el desarrollo del presente trabajo de grado se escogió el modelo *full 3D* ya que este se puede aplicar cualquier tipo de escenario, ya sea un escenario de interiores o uno exteriores, además el modelo *full 3D* no presenta limitaciones sobre la forma del objeto, es decir soporta estructuras planas e inclinadas [19], y tiene en cuenta transmisiones a través de las superficies de los objetos y reflexiones en pisos, paredes y techos, convirtiéndose en uno de los modelos más completos para este tipo de análisis.

En la tabla 3.13 se pueden observar los parámetros necesarios para la aplicación del modelo *full 3D* [13].

Tabla 3.13 Parámetros para el Modelo Full 3D

| PARAMETRO | VALOR |
|-----------------------|---|
| Máximas Reflexiones | 30, asumiendo que no hay traspaso de señal en la superficie |
| Máximas Difracciones | 4 (SBR ¹⁹) |
| Transmisiones Máximas | 30, asumiendo que no hay reflexiones |
| Ambiente | Todos |
| Terreno | Todos |
| Interiores | Todos |
| Objetos | Todos |
| Alcance | Varía de acuerdo a la aplicación |
| Altura de las Antenas | Todas |
| Tipo de Antenas | Todos |
| Trazado de Rayos | SBR |
| Frecuencia Mínima | 100 MHz. |
| Frecuencia Máxima | Depende de la aplicación. |

Para modelar el sistema de comunicaciones implementado se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

3.3.1 Antenas

Las antenas son configuradas con los parámetros que se muestran en la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Configuración Antenas.

| PARÁMETRO | VALOR |
|---------------|---------------|
| Tipo | Dipolo Simple |
| Ganancia | 1dBi |
| Perdidas | 0 dB |
| Forma de Onda | Sinusoidal |
| Temperatura | 293°K |

3.3.2 Forma de Onda

Esta opción permite configurar parámetros que describen la señal radiada por la antena transmisora. Los parámetros a configurar en esta opción incluyen el ancho de banda de operación, la frecuencia de trabajo y la fase como se ilustra en la tabla 3.15.

Tabla 3.15 Configuración Forma de Onda.

| PARÁMETRO | VALOR |
|-----------------------------|----------|
| Frecuencia de Trabajo | 2400 MHz |
| Ancho de Banda de Operación | 1MHz |
| Fase | 0° |

3.3.3 Transmisores y Receptores

Wireless InSite® permiten seleccionar diferentes tipos de transmisores y receptores, entre los cuales se encuentran: puntos, ruta, red xy, polígono, arco horizontal y vertical. En las tablas 3.16 y 3.17 se presentan los parámetros establecidos para configurar cada elemento de la simulación del sistema implementado.

Tabla 3.16 Configuración del Transmisor.

| NOMBRE DE Tx | Tx EZ430 RF 2500 |
|-------------------------|------------------|
| Tipo de Transmisor | Punto |
| Potencia de Transmisión | -10 dBm y 0 dBm |
| Altura de Antena | 1 m |
| Sistema de Coordenadas | Cartesiano |

Tabla 3.17 Configuración del Receptor.

| NOMBRE DEL Rx | Rx EZ 430 RF 2500 |
|---------------------------|--------------------------|
| Tipo de Receptor | Ruta |
| Sensibilidad del Receptor | -104 dBm |
| Altura de Antena | 1 m |
| Sistema de Coordenadas | Cartesiano |

Capítulo 4 PLAN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo de grado se planteó un plan de pruebas, con el cual se recolectó la información que permitió evaluar el desempeño de un sistema inalámbrico de datos punto a multipunto de corto alcance en la banda de 2,4 GHz, en diferentes escenarios y bajo condiciones de interferencia, dicho plan de pruebas y los resultados obtenidos serán descritos en el presente capítulo permitiendo un análisis comparativo de resultados prácticos, simulados y teóricos.

Para las pruebas realizadas se diseñó unas aplicaciones *software* de escritorio descritas en el capítulo tres del presente documento, que permitieron configurar el kit de desarrollo eZ430-RF2500 de Texas Instruments® utilizado para la transmisión y recepción de datos. Las aplicaciones permitieron la variación de diferentes parámetros como son: la modulación, la velocidad de transmisión de datos, y la utilización de una técnica de aleatorización de bits llamada blanqueamiento. Estos programas cuentan con una base de datos diseñada en el motor de bases de datos PostgreSQL® 9.1, en la cual se recopiló todos los datos evaluados, entre estos: el número de bits errados, el nivel de intensidad de señal de recepción (RSSI), el número de paquetes perdidos. Todos estos datos se recolectaron para cada una de las transmisiones realizadas y las cuales se realizaron variando la distancia entre el transmisor y el receptor en el caso de las pruebas para el sistema punto a punto, y manteniendo la distancia fija para el caso de la evaluación del sistema punto a multipunto en topología de estrella.

Además de las pruebas prácticas, se realizó una simulación del sistema inalámbrico de comunicación de datos mediante la herramienta Wireless InSite® para la comparación y verificación de los resultados obtenidos en la práctica, dicha simulación arrojó algunos resultados como el RSSI y la dispersión de retardo contra la distancia entre transmisor y receptor.

Tanto las pruebas prácticas como las simuladas se realizaron tomando en cuenta diferentes escenarios.

4.1 ESCENARIOS DE PRUEBA

Con el fin de evaluar el desempeño del sistema inalámbrico de comunicación de datos implementado, se planteó dos escenarios, en los cuales se presentaron diferentes fenómenos propios de cada escenario, los cuales caracterizan la propagación, estos escenarios son: exteriores e interiores. Además de esto se realizó dos pruebas en el escenario de exteriores, una en la cual se observa el comportamiento del sistema de comunicaciones inalámbrico punto a punto frente a una fuente de interferencia y el desempeño del sistema a medida que la fuente de interferencia se acerca al receptor, y la segunda creando interferencia por medio de una tarjeta del kit de desarrollo eZ430 Rf 2500 en el canal por el cual este transmite, y verificando cómo reacciona el protocolo SimpliciTI® frente a este fenómeno.

4.1.1 Exteriores

Debido a que el desarrollo del presente trabajo de grado se realizó en el campus universitario, se escogió como escenario de exteriores para la realización de las pruebas el Centro Deportivo Universitario (CDU) de la Universidad del Cauca, ya que este presenta todas las características buscadas para un escenario de este tipo, un ambiente libre de obstáculos, permitiendo así apreciar el comportamiento real de un sistema de comunicación de datos inalámbrico evaluado en exteriores.

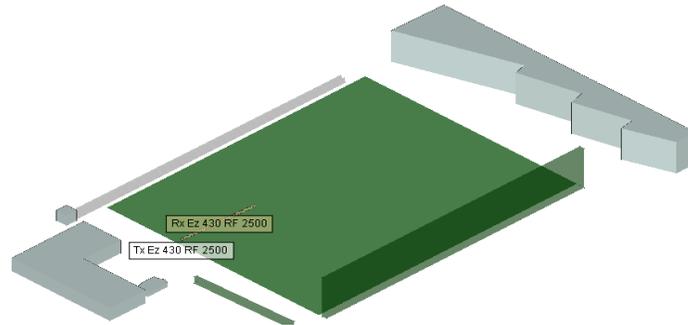
En la figura 4.1 se observa la cancha de fútbol en las instalaciones del Centro Deportivo Universitario de la Universidad del Cauca, la cual mide aproximadamente 120 m de largo por 90 m de ancho, sobre la cual fueron realizadas las pruebas prácticas.

Figura 4.1 Cancha de Fútbol CDU.



Debido a que las mediciones fueron realizadas sobre este escenario específico, también fue necesario modelar este escenario en la herramienta wireless InSite®, para realizar un análisis comparativo entre los resultados de simulación y los obtenidos en la práctica, es por este motivo que guiados por el trabajo de grado realizado en la Universidad del Cauca, titulado “Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz Basado en Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia Utilizando el Modelo Peer-to-Peer”[20], se tomó el modelo creado de la cancha de fútbol del CDU con sus características de infraestructura más importantes: graderías al lado izquierdo del escenario, una zona con árboles al lado derecho, y en la parte inferior el edificio de oficinas, como se observa en la figura 4.2. y sobre este escenario se colocó un transmisor y una ruta de receptores en línea recta con las características de las antenas que presenta el kit de desarrollo Ez430 Rf 2500, con el fin de observar las características de propagación en función de la distancia.

Figura 4.2 Escenario de Exteriores Wireless InSite®.



A pesar de que el sistema a evaluar es de naturaleza punto a multipunto, con una topología de red en estrella, también fue necesaria la evaluación de este sistema utilizando una topología punto a punto, ya que las conexiones a nivel físico que se establecen entre dispositivos son de este tipo.

Las pruebas prácticas realizadas en la Cancha del CDU, se ejecutaron de la siguiente forma:

- **Enlace Punto a Punto**

Este primer sistema consiste en un sistema inalámbrico de comunicación de datos punto a punto, el cual permite evaluar las características físicas del canal de radio frecuencia y sirve como soporte para verificar el comportamiento a nivel físico de una conexión entre el ED y el AP.

Para esta prueba realizó un enlace punto a punto utilizando dos tarjetas de desarrollo eZ430-RF2500T de Texas Instruments®, cada una conectada, por medio del módulo Spy Bi-Wire & MSP Application UART a un computador portátil, en el cual se encontraba instalado el *software* ACAD diseñado para este tipo de prueba, dejando el transmisor fijo en un punto y variando la distancia entre el receptor y este, en intervalos de un metro como se muestra en la figura 4.3

En esta prueba se configuró una potencia de transmisión de -10dBm y se recolectó el valor de la cantidad de bits errados por prueba, paquetes perdidos en recepción y el nivel de intensidad de señal de recepción (RSSI), cambiando entre tres esquemas de modulación, cada una de estas con dos velocidades de transmisión de datos y activando o desactivando la función de aleatorización o blanqueamiento como se muestran en la tabla 4.1. Estas medidas fueron tomadas hasta una distancia de 20m.

Figura 4.3 Ubicación del Transmisor y Receptor en el Enlace Punto a Punto

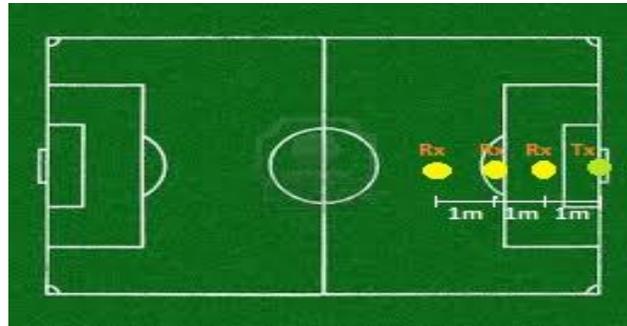


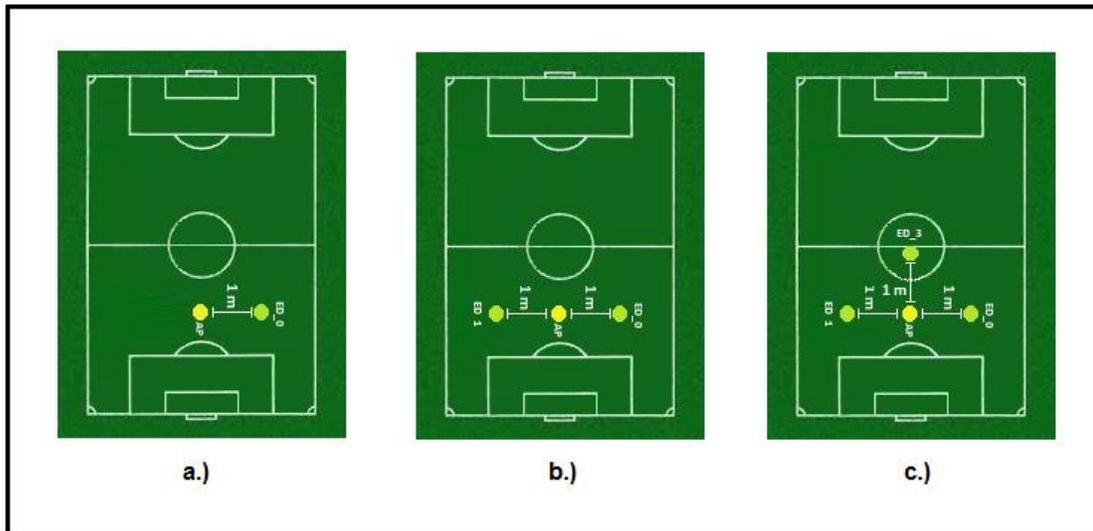
Tabla 4.1 Configuraciones Evaluadas

| Modulación | Tasa de Tx | Blanqueamiento |
|------------|------------|----------------|
| FSK | 2,4 Kbps | Activado |
| | 2,4 Kbps | Desactivado |
| | 10 Kbps | Activado |
| | 10 Kbps | Desactivado |
| GFSK | 2,4 Kbps | Activado |
| | 2,4 Kbps | Desactivado |
| | 10 Kbps | Activado |
| | 10 Kbps | Desactivado |
| MSK | 250 Kbps | Activado |
| | 250 Kbps | Desactivado |
| | 500Kbps | Activado |
| | 500Kbps | Desactivado |

- **Enlace Punto a Multipunto**

Este segundo sistema es un sistema de comunicaciones punto a multipunto con una topología en estrella la cual consta de un AP y de hasta tres ED ubicados como se muestra en la figura 4.4, donde cada uno de los ED establece un enlace punto a punto con el AP. Los ED son colocados a una distancia de un metro del AP, con una potencia de transmisión de 0 dBm, de manera que si se producen errores o pérdidas de paquetes, estos puedan ser razonablemente atribuidos a factores dependientes del protocolo simpliciTI® y no de otro tipo de causas.

Figura 4.4 Ubicación AP y ED para el Sistema de Comunicaciones Punto a Punto Multipunto



La dinámica de la prueba es la siguiente: en cada uno de los enlaces punto a punto existirá al menos un dispositivo al que se denominará Dispositivo Originador (DO) de paquetes. Este dispositivo envía un número determinado de paquetes hacia el otro, al que se denominará Dispositivo Escuchador (DE) y este último, por su parte, recibe cada paquete que envía el DO y lo envía de regreso como método de confirmación o reconocimiento. En caso de que el DO no reciba el paquete desde el DE después de un tiempo de espera determinado, vuelve a enviarlo. Si después del segundo reenvío aún no se recibe el paquete de regreso, se considera un paquete perdido.

Los dos dispositivos conocen de antemano los datos que son enviados en los paquetes y, por lo tanto, cada dispositivo tiene la capacidad de contabilizar los bits errados que se reciben en cada paquete. El DO contabiliza los bits errados cuando recibe el paquete de regreso del DE, de la misma manera el DE cuenta los bits errados del paquete que recibe del DO. Además ambos dispositivos toman lecturas de RRSI, LQI, canal, DO y número de intentos fallidos antes de recibir el reconocimiento.

Al final de la prueba los ED envían un conjunto de paquetes especiales que contienen los resultados registrados por el propio ED durante la prueba, en cambio, el AP, que no posee suficiente memoria para almacenar internamente todos los registros de las pruebas, envía individualmente a la aplicación ACADPMP el registro de cada paquete que llega y de este modo es la aplicación la encargada de llevar el registro de lo que ocurre en el AP durante la prueba.

El rol del DO o DE puede tenerlo tanto el AP como el ED. Por tal razón, el sistema tendrá 3 modos de operación.

- **Modo Solamente AP Origina Paquetes (SAOP):** en este modo, el AP tiene el rol de DO y el ED de DE. De esta manera, el tráfico de paquetes siempre es controlado por el AP ya que ninguno de los ED transmite por iniciativa propia, sino únicamente como

respuesta al envío de un paquete por parte del AP. Por esta razón, este es el modo en el que existe menor congestión y menor probabilidad de colisión y es el modo que se utilizó como referencia.

- **Modo Solamente ED Origina Paquetes (SEOP):** en este modo, el AP tiene el rol de DE y el ED el rol de DO. De esta manera, aumenta la probabilidad de colisiones debido a que los ED transmiten sin que haya coordinación por parte del AP.
- **Modo AP y ED Originan Paquetes (AEOP):** En este modo ambos dispositivos de cada enlace punto a punto adquieren ambos roles, generándose una comunicación dúplex en la que en algunos instantes transmite el AP y en otros transmite el ED. Para los paquetes originados en el AP, el ED adquiere el rol de DE mientras que para los paquetes originados en el ED, es el AP el que adquiere el rol de DE. Este es el modo con mayor congestión y mayor probabilidad de colisiones.

Cada prueba inicia con un envío de un paquete del AP hacia los ED en el que les informa el modo de operación del sistema. En los modos en los que el AP tenga el rol de DO, al terminar el envío de paquetes hacia un ED, envía un paquete de aviso de fin de la transmisión, a lo que el ED responde enviando unos paquetes especiales en los que se envía la información de los resultados de la prueba registrados por el propio ED. Por otra parte, en los modos en los que el ED es DO, este envía, al finalizar la transmisión, los paquetes especiales con los resultados de la prueba registrados por el propio ED.

En caso de que la pérdida de paquetes llegue a alcanzar cierto valor de paquetes perdidos consecutivos, se utiliza la característica de agilidad de frecuencia para pasar a otro canal.

El registro de los resultados se clasificó por frecuencia y por número de retransmisiones en que se recibe la respuesta y de esa manera se cuenta con suficientes criterios para estimar la probabilidad de ocurrencia de colisiones.

4.1.2 Interiores

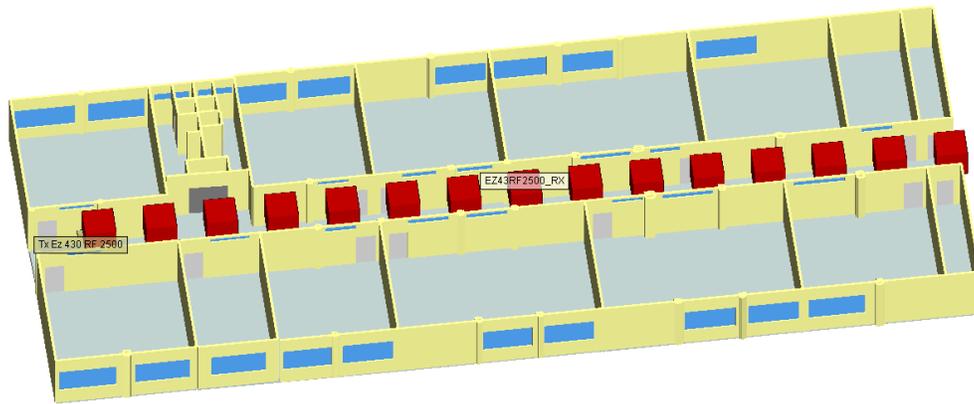
El escenario de interiores escogido para el desarrollo de las pruebas del sistema, fue el pasillo del primer piso del edificio de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de la Universidad del Cauca, ya que este cuenta con las características propias de un escenario de interiores: un ambiente cerrado con puertas, ventanas, paredes, piso, techo, entre otros, lo cual permitió el comportamiento del sistema de comunicaciones inalámbrico frente a los fenómenos generados en este tipo de ambientes como lo es el efecto de la multitrayectoria y el efecto de guía de onda.

Para tener un modelo de referencia realizar la comparación y posterior análisis y conclusiones de los resultados obtenidos en la práctica, se realizó la simulación de este escenario por medio de la herramienta Wireless InSite®. Tomando como referente el modelo del primer piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, diseñado en el trabajo de grado titulado “Análisis de Cobertura de un Sistema Wi-Fi en Interiores, Mediante la Técnica de Trazado de Rayos” [21], y se ubicó un transmisor en un punto fijo al inicio del pasillo principal y una ruta de receptores

equidistantes con una separación de tres metros a lo largo de este, como se observa en la figura 4.5.

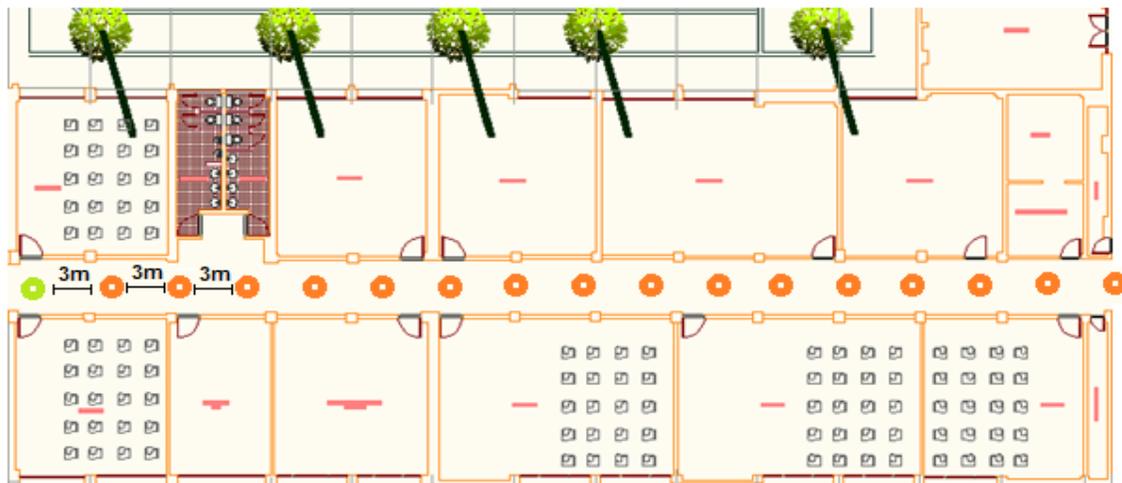
Para esta prueba se realizó un enlace punto a punto utilizando dos tarjetas de desarrollo eZ430-RF2500T de Texas Instruments®, cada una conectada, por medio de la interfaz USB eZ430-RF a un computador portátil, en el cual se encontraba instalado el *software* ACADPP, diseñado para este tipo de prueba, dejando el transmisor fijo en un punto y variando la distancia entre el receptor y este, en intervalos de tres metros como se muestra en la figura 4.6

Figura 4.5 Escenario de Interiores Wireless InSite®.



Para este escenario se variaron 3 tipos de modulaciones, cada una de estas con dos velocidades de transmisión de datos y activando o desactivando la función de aleatorización o blanqueamiento como se muestran en la tabla 4.1. Todas las mediciones se realizaron para una potencia de 0 dBm y una -10dBm, debido a que la Tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) presentada en las mediciones de la potencia más alta era casi nula.

Figura 4.6 Escenario de Interiores



4.1.3 Condición de Interferencia.

En gran medida los problemas de pérdida de información en los sistemas inalámbricos, son ocasionados por la propagación de señales interferentes en el medio de transmisión o canal. Por este motivo surge la necesidad de estudiar y analizar el comportamiento del sistema implementado bajo esta condición.

Para la evaluación de desempeño del sistema inalámbrico de comunicación de datos bajo condiciones de interferencia, se planteó dos tipos de pruebas, una para un enlace punto a punto, la cual permite la evaluación de la conexión física de los dispositivos y otra para el enlace punto a multipunto, con la cual se puede verificar el comportamiento del protocolo SimpliciTI® en este tipo de condición.

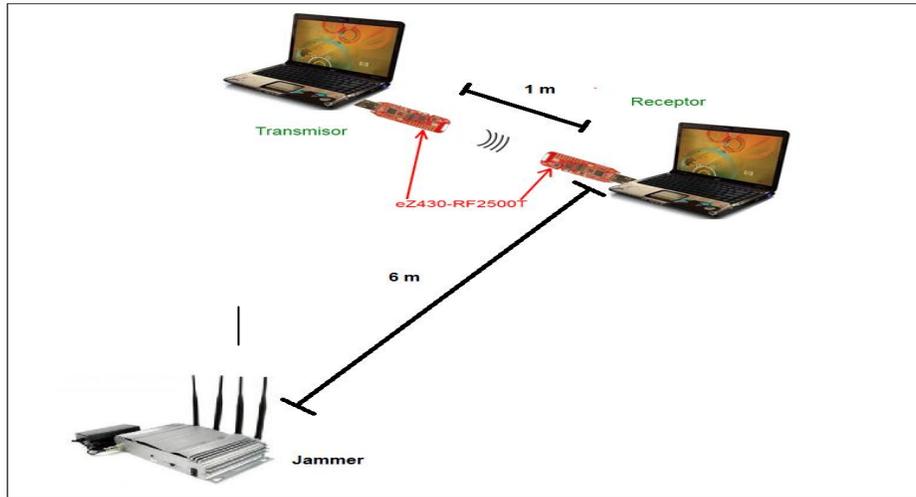
4.1.3.1 Condición de Interferencia en un Enlace Punto a Punto

En esta prueba se utilizó un generador de señales interferentes (*Jammer*²⁰) el cual tiene la capacidad de generar señales radio frecuencia en la banda de 2,4 GHz, con potencia de 1 W y un ancho de banda de 100 MHz, pero debido a su alta potencia de transmisión, que generó un bloqueo total de la comunicación, por lo tanto se hizo necesario utilizar dos atenuadores equivalente a 30 dB en el punto de conexión de la antena del *Jammer*, haciendo que la potencia de la señal interferente disminuyera a 1mW, potencia con la cual también transmiten los dispositivos del sistema de comunicaciones inalámbrico a evaluar. Esta prueba se realizó en el parqueadero del conjunto cerrado Molino de la Estancia teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- La distancia entre el transmisor y el receptor del sistema de comunicaciones inalámbrico a evaluar era igual a un metro. Se escogió esta característica ya que a ésta distancia de separación entre los dispositivos del sistema inalámbrico a evaluar, no se presentaban errores en la comunicación y por lo tanto los errores generados en la comunicación de datos del sistema cuando el *Jammer* esté en funcionamiento, solo son atribuibles a ésta fuente de interferencia.
- Se escogió el parqueadero del conjunto cerrado Molino de la Estancia como escenario para la realización de esta prueba ya que éste además de la facilidad de conexión a la red eléctrica para los dispositivos a utilizar, también presenta las características propias de un ambiente de exteriores, y por tanto la señal del sistema de comunicaciones como la señal de la fuente interferente se ven menos afectados por efectos que podían causar variación en la medición como el efecto multitrayectoria o el efecto guía de onda, presentes en el escenario de interiores.
- Se ubicó la fuente de interferencia *Jammer* a una distancia de 6 metros del receptor y se acercó con espaciamientos de 1 metro hasta llegar a 2 metros de distancia, después de acercó cada 50 cm hasta llegar al receptor, recolectando los datos mediante la aplicación ACADPP. La ubicación de los elementos necesarios para esta prueba se muestra en la figura 4.7.

²⁰ Jammer es también conocido como bloqueador de señal o generador de interferencia intencional.

Figura 4.7 Montaje para Evaluar del Sistema Punto a Punto bajo Condiciones de Interferencia.



4.1.3.2 Respuesta del Protocolo SimpliCI® Ante Señales Interferentes

Para evaluar la capacidad que tienen los dispositivos que implementan el protocolo simpliCI® para realizar un cambio de canal automático ante la presencia de señales interferentes, se realizó una prueba en la cual se hace interferencia intencional al canal en el cual el sistema está transmitiendo, obligando a este a un cambio de canal, con lo cual se puede verificar, si el sistema realmente cambió de canal, y cuantos errores se causaron en el momento en que se realizó este cambio. La recolección de datos para esta prueba se realizó mediante la aplicación ACADPMP diseñada en el presente trabajo de grado. Esta prueba se realizó con un solo ED ubicado a 1 metro de distancia del AP y en modo SAOP. De esta manera se tienen las condiciones óptimas para que en ausencia de interferencia no se produzcan errores, de modo que cualquier error que se produzca pueda ser atribuido al efecto adverso de la interferencia. Para esta prueba se generó interferencia selectiva en un canal específico. Por tal razón no se empleó el Jammer y en su lugar se empleó una de las tarjetas eZ430-RF2500T en asociación con el software ACDPP, la cual fue configurada para transmitir en el mismo canal de transmisión y con los mismos parámetros de configuración empleados por los dispositivos que se comunican por medio de simpliCI®. El dispositivo interferente transmite a una potencia de 0dBm y se localiza de tal manera que sea equidistante al AP y al ED, a una distancia de un metro de cada uno.

Figura 4.8 Montaje para Evaluar del Sistema Protocolo SimpliCI® bajo Condiciones de Interferencia.



4.2 CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LA SEÑAL TRANSMITIDA.

Adicionalmente a la realización de las pruebas antes mencionadas, también se realizó un estudio a las características espectrales de la señal de información emitida por el transmisor. Para ejecutar estas mediciones fue necesario utilizar el analizador de redes ZLV® Rohde & Schwarz®²¹, el cual provee altos estándares de calidad de medición. Este dispositivo combina las funciones de un analizador de redes, un analizador de espectro y un medidor de potencia en un solo instrumento de medida; razón por la cual resulta de gran utilidad para el desarrollo de proyectos de investigación en el área de las redes inalámbricas.

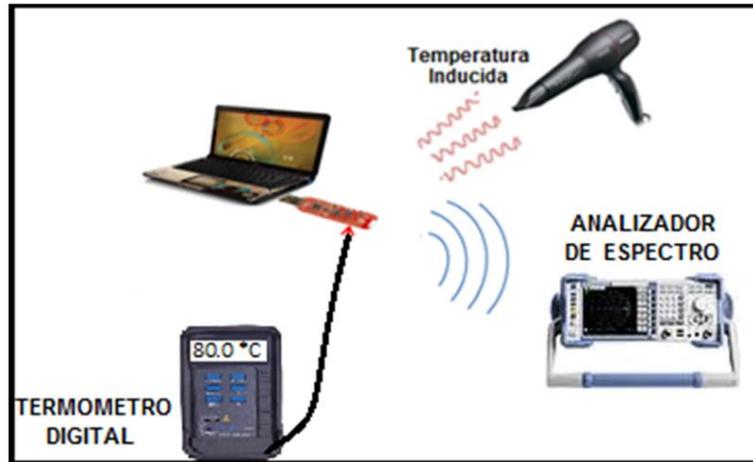
Por medio del analizador de espectro, se realizaron mediciones del ancho de banda (BW), se verificó la estabilidad en frecuencia frente a la temperatura del ambiente utilizando un secador de cabello para calentar el aire y un termómetro digital para medir la temperatura como se muestra en la figura 4.9 y se realizó un análisis comparativo para diferentes modulaciones y velocidades de transmisión de datos como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Configuraciones Evaluadas

| Modulación | Velocidad de Tx |
|------------|-----------------|
| FSK | 2,4 Kbps |
| | 10 Kbps |
| GFSK | 2,4 Kbps |
| | 10 Kbps |
| MSK | 250 Kbps |
| | 500Kbps |

²¹ <http://www2.rohde-schwarz.com>

Figura 4.9 Montaje Empleado para Determinar la Estabilidad en Frecuencia del Kit eZ430-RF2500 al Variar la Temperatura



4.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Después de conectar los kits de desarrollo eZ430-RF2500, se recolectó los datos pertinentes para la evaluación del desempeño a nivel físico del sistema inalámbrico implementado. La recolección de estos datos se realizó para un enlace punto a punto y un enlace punto a multipunto, por medio de las aplicaciones ACADPP y ACADPMP respectivamente. Estas aplicaciones desarrolladas en el presente trabajo de grado para permitir la configuración de los kits de desarrollo eZ430-RF2500 y facilitar la recolección de datos, ya que el kit utilizado en el presente trabajo de grado no tiene soporte *software* para realizar este tipo de pruebas. Para tener validez estadística en la ejecución de las pruebas se realizaron 10 medidas por prueba, para cada valor de distancia entre transmisor y receptor y se tomó el valor promedio de estas 10 medidas.

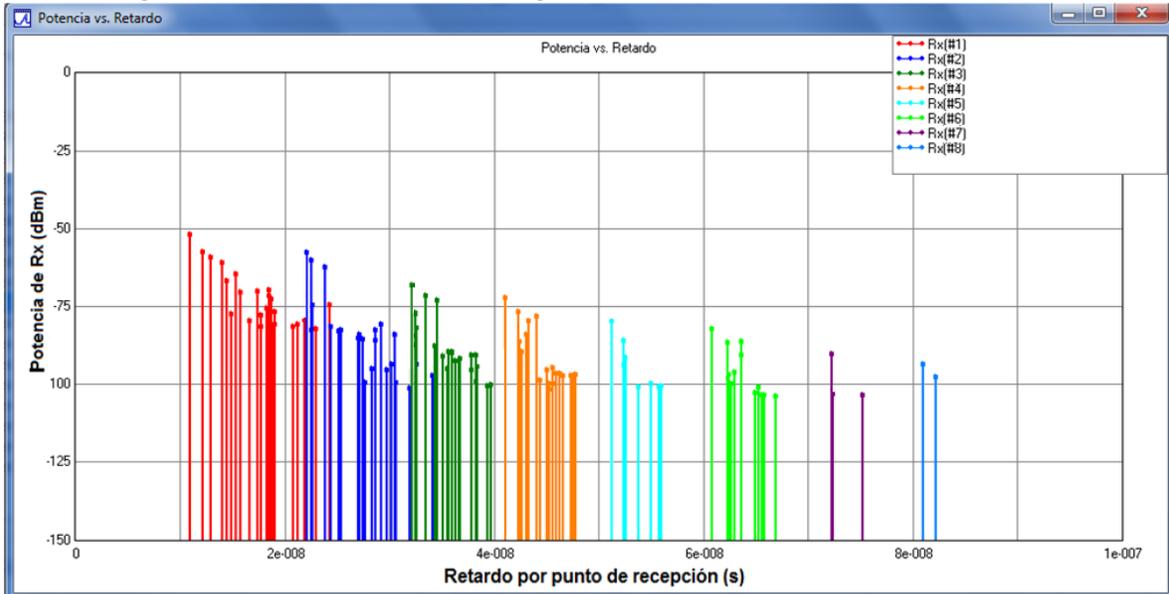
4.3.1 Resultados Obtenidos Mediante la Simulación en Wireless InSite®.

Mediante la herramienta Wireless InSite® se obtuvo el valor del RSSI contra la distancia, para los dos escenarios simulados: exteriores mediante el modelado de la del CDU de la Universidad del Cauca; e interiores mediante el modelado del primer piso de la FIET. Los resultados obtenidos fueron graficados y tabulados, éstos se pueden encontrar en la sección C1 del Anexo C. Además de esto para efecto de comparación de los resultados obtenidos mediante mediciones prácticas con los resultados de simulación, se realizó una grafica en MATLAB® de color rojo que muestra los valores de RSSI contra Distancia generados en la simulación. Esta grafica se superpone con las graficas de los valores de RSSI contra Distancia obtenidos en la práctica.

Para determinar el efecto de la Interferencia InterSimbólica (ISI, *InterSymbol Interference*) se recurre a la estimación de los tiempos de propagación de los distintos rayos que llegan al receptor en distintas posiciones de este. La figura 4.10 muestra los resultados obtenidos mediante Wireless In Site® para los tiempos de propagación en el escenario de interiores. En ella se observa que, los valores de estos tiempos, se encuentran en un orden de magnitud de diez a la menos 8. Para determinar el efecto de la ISI, estos valores deben ser comparados con los tiempos de bit. El tiempo de bit más pequeño en el sistema se produce para la velocidad de transmisión de 500Kbps y tiene un valor de 2

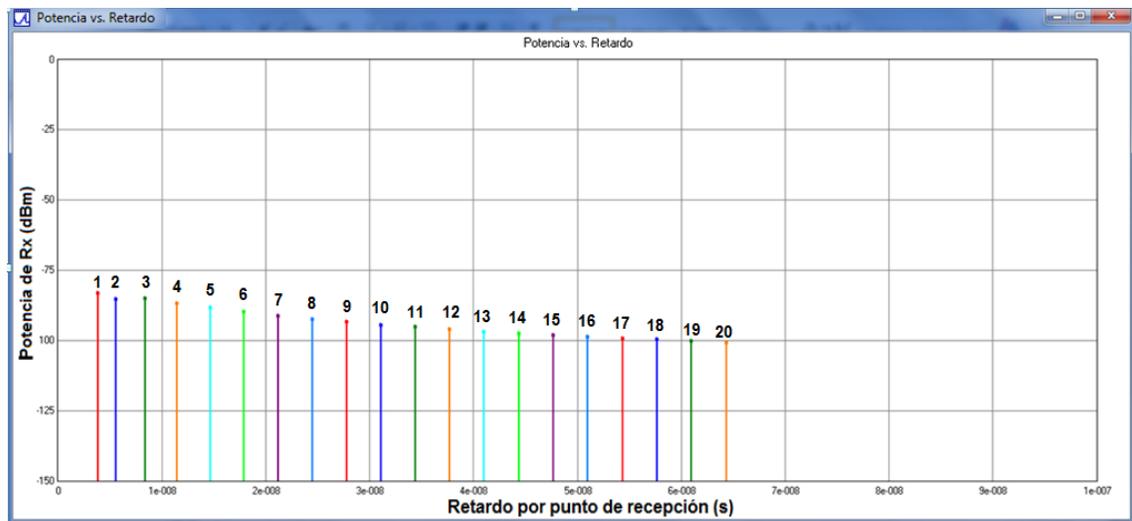
microsegundos. Estos resultados muestran que los retardos de propagación de los rayos secundarios respecto al rayo de trayectoria directa, están aproximadamente dos órdenes de magnitud por debajo del menor tiempo de bit, de lo cual se puede concluir que el efecto de la ISI no es significativo.

Figura 4.10 Retardos de Propagación para el Escenario de Interiores



Para el escenario de exteriores solamente se recibe el rayo de trayectoria directa, como puede observarse en la figura 4.11 de manera que, en este escenario, no existe ISI. En la figura 4.11 el número que se encuentra sobre cada una de las líneas verticales, representa el número del receptor.

Figura 4.11 Retardos de Propagación para el Escenario de Exteriores



4.3.2 Resultados Obtenidos en el Escenario de Exteriores para el Enlace P2P.

Para las mediciones realizadas en la práctica se obtuvieron graficas que relacionan el RSSI contra Distancia y BER contra Eb/No, de estos resultados se puede destacar que para las velocidades de transmisión más bajas el nivel de sensibilidad del receptor es mayor, por lo cual no presentan puntos de desconexión como si pasa con las velocidades de transmisión más altas. En la sección C3 del Anexo C, se muestran y describen cada una de las mediciones realizadas en el CDU de la Universidad del Cauca, para cada configuración evaluada, según lo describe el plan de pruebas en la tabla 4.1.

4.3.3 Resultados Obtenidos en el Escenario de Interiores para el Enlace P2P.

Para las mediciones realizadas en la práctica se obtuvieron graficas que relacionan el RSSI contra Distancia y BER contra Eb/No, de estos resultados se puede destacar que para las velocidades de transmisión de datos más bajas, el nivel de sensibilidad del receptor es mayor, por lo cual no presentan puntos de desconexión como si pasa con las velocidades de transmisión más altas. En la sección C2 del Anexo C muestran y describen cada una de las mediciones realizadas en el primer piso de la FIET de la Universidad del Cauca, para cada configuración evaluada, según lo describe el plan de pruebas en la tabla 4.1.

4.3.4 Resultados Obtenidos Frente a Interferencia para el Enlace P2P.

Para esta prueba se realizaron mediciones de RSSI y BER correspondientes a las configuraciones mencionadas en la Tabla 4.1 del plan de pruebas, teniendo en cuenta el montaje que se muestra en la figura 4.7

4.3.4.1 Sistema de Comunicaciones con Modulación FSK

La figuras 4.12 y 4.13 muestran la variación de la RSSI y del LQI respecto a la distancia de la fuente interferente para la modulación FSK y las figuras 4.14 y 4.15 muestran el BER contra la distancia. Las figuras 4.12 y 4.14 corresponden a una velocidad de transmisión de datos de 2.4Kbps mientras que las figuras 4.13 y 4.15 a una velocidad de 10Kbps. En todas las figuras se dibujan con línea punteada las gráficas correspondientes a las pruebas en las que se empleó blanqueamiento y con línea continua las gráficas que corresponden a las pruebas en las que no se realizó blanqueamiento. En las gráficas correspondientes al RSSI, se dibujó una línea punteada de color en la parte inferior, la cual representa el umbral de sensibilidad nominal y tanto para las gráficas de RSSI como las de LQI una línea horizontal de color verde que representa el valor medido en ausencia de interferencia, la cual tiene propósitos comparativos.

En las gráficas puede observarse que para la velocidad de 2,4Kbps el RSSI siempre se encuentra por encima del valor obtenido en ausencia de interferencia y que a medida que la fuente de interferencia se aleja, el valor del RSSI tiene una tendencia a disminuir. Por otra parte, la BER se mantiene baja y cae a cero para distancias de la fuente interferente mayores a 2 metros. Este resultado puede atribuirse al hecho de que la señal interferente interfiere constructivamente con la señal transmitida de modo que produce un aumento en la intensidad de la señal recibida. Para la velocidad de 10Kbps el RSSI se mantiene por encima del umbral de sensibilidad para distancias mayores a 1 metro. Sin embargo, se

observa que para distancias inferiores a 3 metros, el RSSI se mantiene por debajo del valor obtenido en ausencia de interferencia mientras que para distancias que superan los tres metros, a RSSI está por encima de este valor. Esto sugiere que para una velocidad de 10Kbps el efecto de incremento del RSSI es menos notable que para el caso de 24Kbps. En ambos casos el LQI se incrementó por encima del valor obtenido en ausencia de interferencia, pero este aumento fue mayor para la velocidad de 2,4Kbps. Al observar las gráficas de BER, puede notarse que este cae a cero a partir de cierta distancia de metro medio o de dos metros. En términos generales, puede notarse que la transmisión a una velocidad de 2,4Kbps presenta mayor inmunidad a la interferencia que la transmisión a 10Kbps.

Figura 4.12 RSSI para FSK a 2,4 Kbps

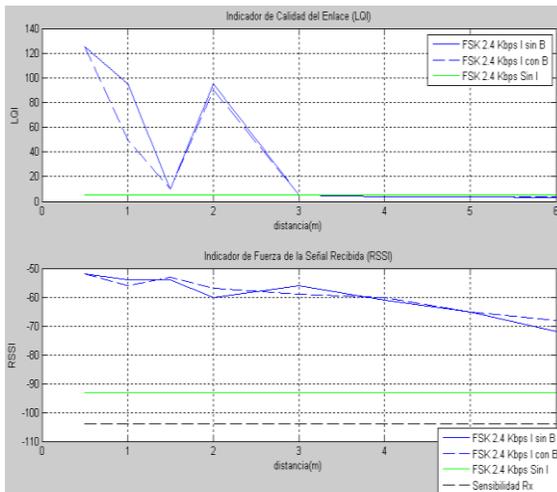


Figura 4.13 RSSI para FSK a 10 Kbps

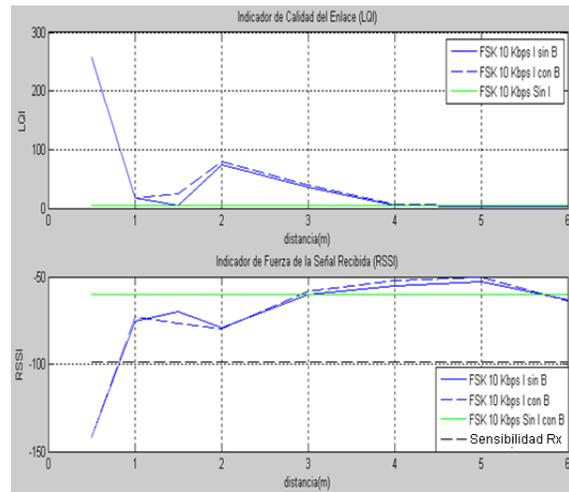


Figura 4.14 BER para FSK a 2,4 Kbps

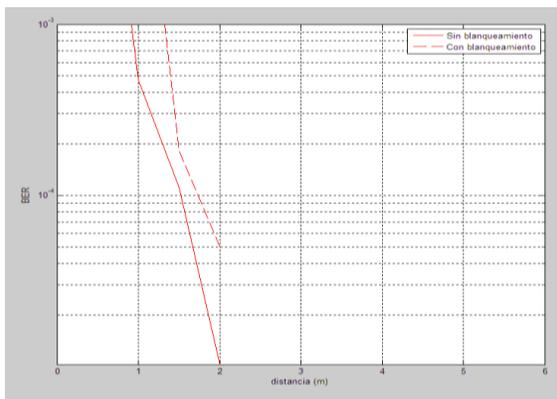
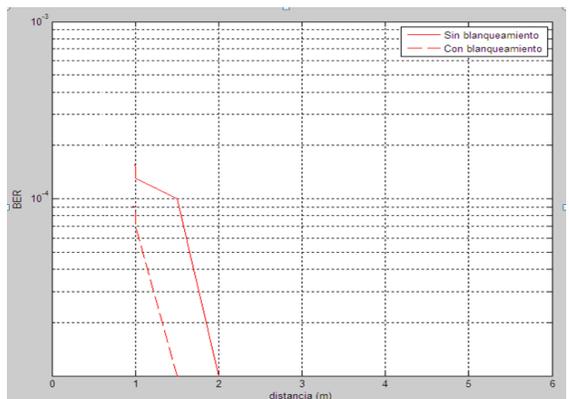


Figura 4.15 BER para FSK a 10 Kbps



4.3.4.2 Sistema de Comunicaciones con Modulación GFSK

Las figuras 4.16 y 4.17 muestran la variación de la RSSI y del LQI respecto a la distancia de la fuente interferente para la modulación GFSK y las figuras 4.18 y 4.19 muestran el BER contra la distancia. Las figuras 4.16 y 4.18 corresponden a una velocidad de transmisión de datos de 2.4Kbps mientras que las figuras 4.17 y 4.19 a una velocidad de 10Kbps. En todas las figuras se dibujan con línea punteada las gráficas correspondientes

a las pruebas en las que se empleó blanqueamiento y con línea continua las gráficas que corresponden a las pruebas en las que no se realizó blanqueamiento. En las gráficas correspondientes al RSSI, se dibujó una línea punteada de color en la parte inferior, la cual representa el umbral de sensibilidad nominal y tanto para las gráficas de RSSI como las de LQI una línea horizontal de color verde que representa el valor medido en ausencia de interferencia, la cual tiene propósitos comparativos.

Se observa un comportamiento similar en esta modulación al observado en la modulación FSK. Para la velocidad de 2,4Kbps el nivel del RSSI se encuentra por encima del valor obtenido en ausencia de interferencia. Este incremento también se observa para la velocidad de 10Kbps pero en este caso, el aumento en RSSI es menor y no se observa en todas las distancias. En este caso la BER fue notoriamente menor para la velocidad de 2,4Kbps y que para esta velocidad de transmisión decayó a cero a partir de una distancia de dos metros mientras que para la velocidad de 10Kbps, se obtuvo una BER mayor y que esta cayó a cero a una distancia de cinco metros. De lo anterior se puede concluir que para la modulación GFSK una transmisión a 2,4Kbps presentó mayor inmunidad a la interferencia que una transmisión a 10Kbps

Figura 4.16 RSSI para GFSK a 2,4Kbps

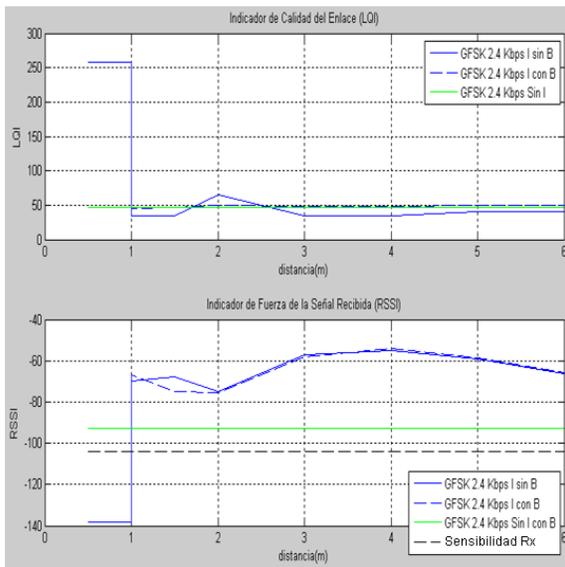


Figura 4.17 RSSI para GFSK a 10Kbps

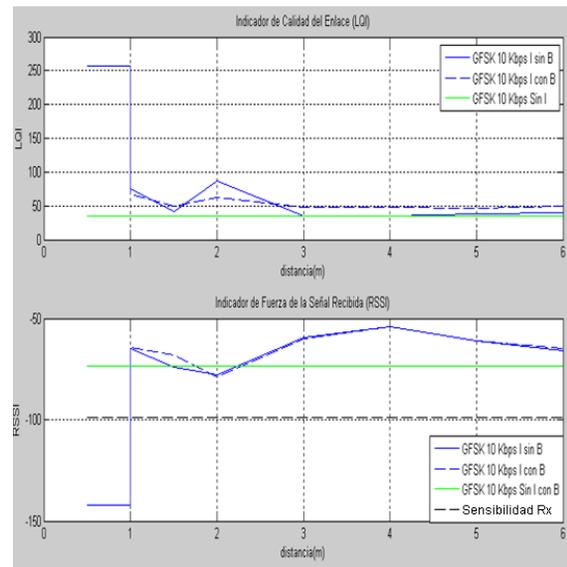
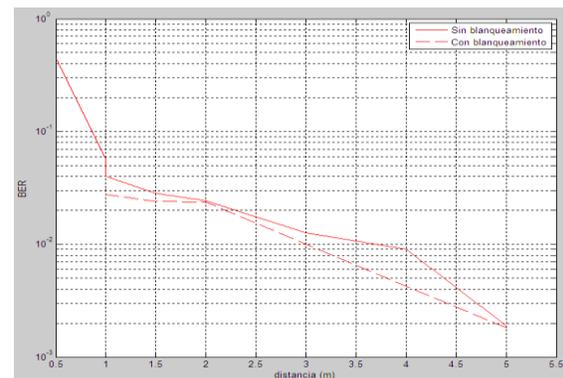


Figura 4.18 BER para GFSK a 2,4 Kbps



Figura 4.19 BER para GFSK a 10 Kbps



4.3.4.3 Sistema de Comunicaciones con Modulación MSK

Las figuras 4.20 y 4.21 muestran la variación de la RSSI y del LQI respecto a la distancia de la fuente interferente para la modulación MSK y las figuras 4.22 y 4.23 muestran el BER contra la distancia. Las figuras 4.20 y 4.22 corresponden a una velocidad de transmisión de datos de 250Kbps mientras que las figuras 4.21 y 4.23 a una velocidad de 500Kbps. En todas las figuras se dibujan con línea punteada las gráficas correspondientes a las pruebas en las que se empleó blanqueamiento y con línea continua las gráficas que corresponden a las pruebas en las que no se realizó blanqueamiento. En las gráficas correspondientes al RSSI, se dibujó una línea punteada de color en la parte inferior, la cual representa el umbral de sensibilidad nominal y tanto para las gráficas de RSSI como las de LQI una línea horizontal de color verde que representa el valor medido en ausencia de interferencia, la cual tiene propósitos comparativos.

Las gráficas muestran que para distancias de la fuente interferente menores a tres metros del receptor, no se produjo recepción. A partir de los 3 metros se produce recepción y un incremento del RSSI respecto al obtenido en ausencia de interferencia. Se puede observar que la BER para esta modulación es mayor que para los casos de FSK y GFSK, lo cual permite concluir que entre las tres modulaciones consideradas en el presente trabajo de grado, MSK es la más susceptible a ser afectada por la interferencia.

Figura 4.20 RSSI para MSK a 250 Kbps

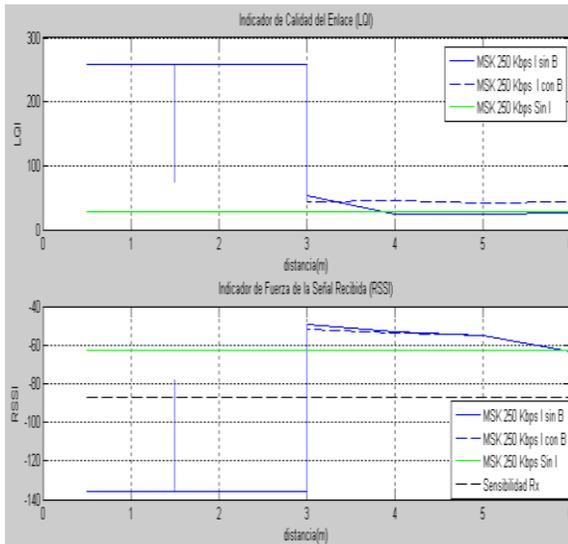


Figura 4.21 RSSI para MSK a 500 Kbps

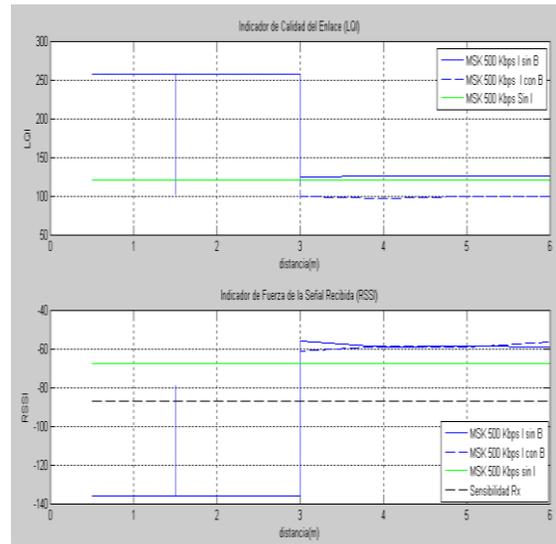


Figura 4.22 BER para MSK a 250 Kbps

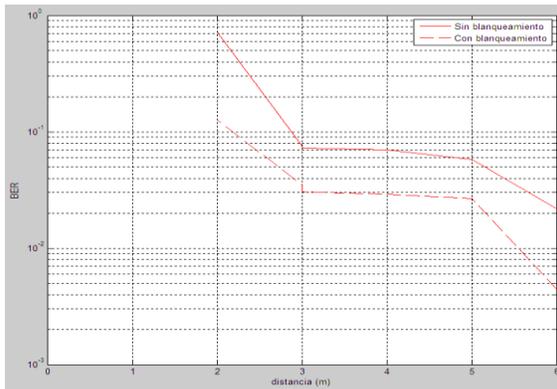
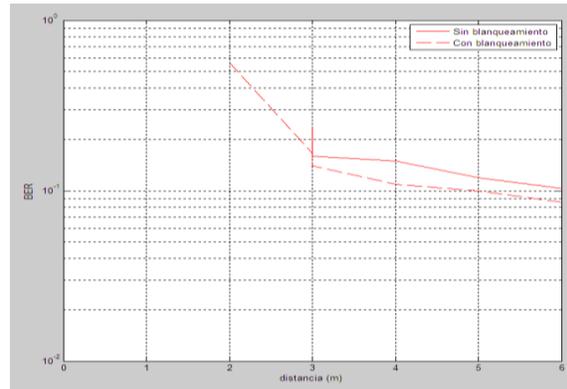


Figura 4.23 BER para MSK a 500 Kbps



4.3.4.4 Alcance del Sistema de Comunicación Punto a Punto

Para estimar el alcance del sistema de comunicación punto a punto se verifica que el BER no sobrepase un valor de referencia. El valor del BER usado como referencia es de 10^{-3} el cual es considerado un valor aceptable para redes inalámbricas. La tabla 4.3 muestra la distancia alcanzada entre el transmisor y el receptor antes de que el BER sobrepase el valor de referencia.

Tabla 4.3 Alcance en metros del sistema de Comunicación Punto a Punto

| Configuración | Interiores | Exteriores |
|---------------|------------|------------|
| FSK 2,4Kbps | 22 | 13 |
| FSK 10Kbps | 22 | 13 |
| GFSK 2,4Kbps | 22 | 13 |
| GFSK 10Kbps | 22 | 13 |
| MSK 250Kbps | 10 | 7 |
| MSK 500Kbps | 7 | 5 |

4.3.5 Espectro de la Señal Transmitida.

Mediante el análisis espectral de la señal transmitida se puede observar el comportamiento del sistema de comunicaciones implementado, observar su estabilidad en frecuencia y hacer un análisis comparativo de los anchos de banda utilizados para la transmisión de la señal dependiendo del sistema de modulación que este emplee o la velocidad de transmisión de datos que se esté usando.

4.3.5.1 Estabilidad en Frecuencia Frente a Cambios de Temperatura.

En los sistemas de radio comunicaciones, la precisión y estabilidad en frecuencia, es considerada como un aspecto de gran importancia. Para determinar el efecto de las variaciones en la temperatura sobre la estabilidad en la frecuencia transmisión de la tarjeta eZ430-RF2500T, se configuró dicha tarjeta para transmitir paquetes de manera ininterrumpida a una frecuencia de transmisión nominal de 2463999877,9Hz y se hizo uso del analizador de redes ZLV Rohde & Schwarz®, con el objetivo de visualizar el espectro de la señal transmitida. En la figura 4.24 se observa el comportamiento del sistema de comunicaciones implementado, frente a los efectos producidos por una fuente

de calor. En esta figura, la curva de color negro corresponde a la temperatura de 25°C, la color verde a la temperatura de 50°C y la de color azul corresponde a la temperatura de 80°C. Los valores de temperatura y de frecuencia central del sistema de comunicaciones están descritos en la tabla 4.4. Claramente se visualiza que hay un incremento en la frecuencia central, al aumentar la temperatura a la que está sometido el dispositivo transmisor. Las especificaciones de la tarjeta eZ430RF2500T indican que existe un margen de tolerancia en la frecuencia de transmisión de 20 partes por millón (ppm) [12]. Según lo mostrado en la tabla 4.4 las frecuencias reales se encuentran dentro del margen de tolerancia.

Figura 4.24 Variación de la Frecuencia Central Frente a Cambios de Temperatura

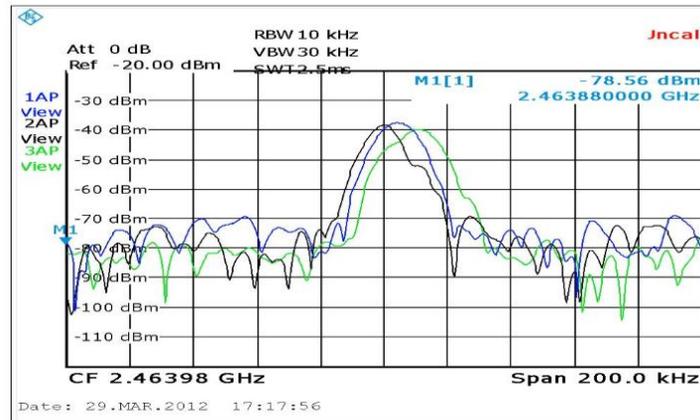


Tabla 4.4 Variación de la Frecuencia Central Frente a Cambios de Temperatura

| TEMPERATURA [°C] | FRECUENCIA CENTRAL [GHz] | VARIACION RELATIVA [ppm] |
|------------------|--------------------------|--------------------------|
| 25 | 2,463984390 | -6,28 |
| 50 | 2,463990780 | -3,69 |
| 80 | 2,463998000 | -0,76 |

Tomando como referencia la frecuencia de transmisión nominal del sistema, se obtiene la variación porcentual de la frecuencia con respecto a la temperatura inducida. Dichos porcentajes se calculan mediante la ecuación 4.1. Los porcentajes de corrimiento de la frecuencia central como se puede observar en la tabla 4.3 muestran que el porcentaje de corrimiento de la frecuencia central es muy pequeño.

$$\text{Variación relativa [ppm]} = \left(\frac{f_c - f_N}{f_N} \right) * 10^6 \quad (4.1)$$

Donde:

f_c : es la frecuencia central del espectro medida mediante el analizador de espectro.
 $f_N=2463999877,9\text{Hz}$, es la frecuencia de transmisión nominal.

4.3.5.2 Ancho de Banda

Haciendo uso del analizador de redes ZLV Rohde & Schwarz®, se cumplió el objetivo de visualizar el espectro de la señal transmitida por el sistema de comunicaciones implementado, utilizando diferentes modulaciones y diferentes velocidades de transmisión, logrando así realizar un análisis comparativo del ancho de banda de los espectros de las señales medidas con el ancho de banda obtenido teóricamente como se muestra en la tabla 4.5. La medida del ancho de banda se realizó buscando las frecuencias en las que la magnitud del espectro estuviera 20 dB por debajo de su valor máximo.

Tabla 4.5 Valor de Ancho de Banda para las Configuraciones Evaluadas

| Modulación | Velocidad de Transmisión [Kbps] | Ancho de Banda Teórico [KHz] | Ancho de Banda Medido a -20dB [KHz] |
|------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| FSK | 2,4 | 104,8 | 107,2 |
| | 10 | 120 | 120,9 |
| GFSK | 2,4 | 104,8 | 107,3 |
| | 10 | 120 | 119,83 |
| MSK | 250 | 375 | 372,58 |
| | 500 | 750 | 753,37 |

- **Ancho de Banda para FSK a 2,4 Kbps y 10 Kbps**

En las figuras 4.25 y 4.26 se muestran los espectros de la señal transmitida por el sistema de comunicaciones implementado con modulación FSK y se puede observar el ancho de banda de la señal mediante la suma de los valores dados por los marcadores D2 y D3, estos valores de ancho de banda se observan en la tabla 4.4 los valores resultados obtenidos en las mediciones son muy cercanos a los obtenidos teóricamente.

- **Ancho de Banda para GFSK a 2,4 Kbps y 10 Kbps**

En las figuras 4.27 y 4.28 se muestran los espectros de la señal transmitida por el sistema de comunicaciones implementado, con modulación GFSK y se observa el ancho de banda de la señal a -20 dB mediante la suma de los valores dados por los marcadores D2 y D3, los valores de ancho de banda se observan en la tabla 4.4 los resultados obtenidos en las mediciones son muy cercanos a los obtenidos teóricamente.

Figura 4.25 Ancho de Banda para FSK a 2,4 Kbps

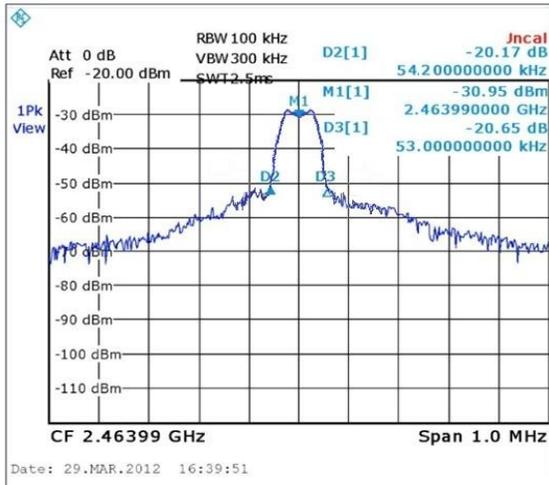


Figura 4.26 Ancho de Banda para FSK a 10 Kbps

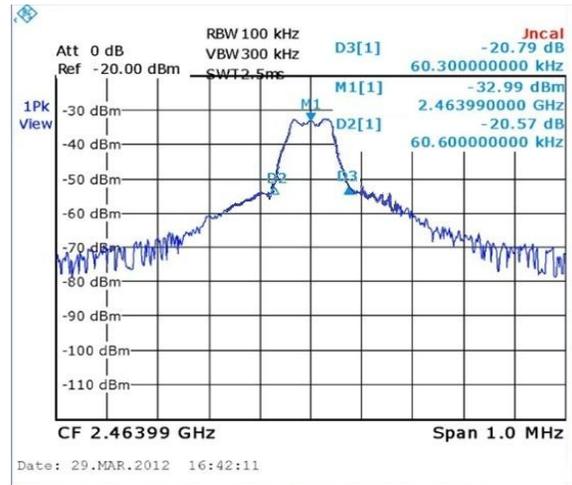


Figura 4.27 Ancho de Banda para GFSK a 2,4 Kbps

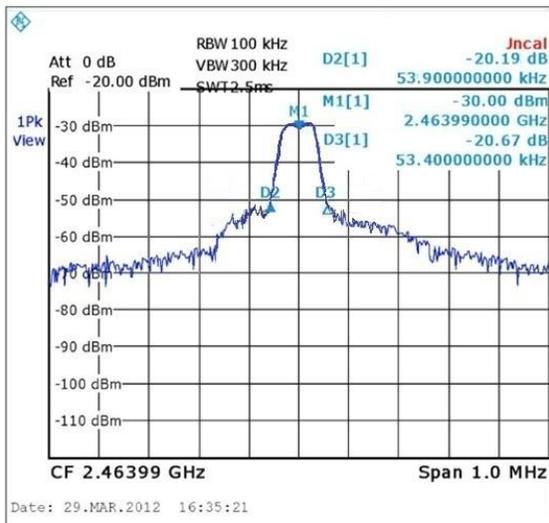
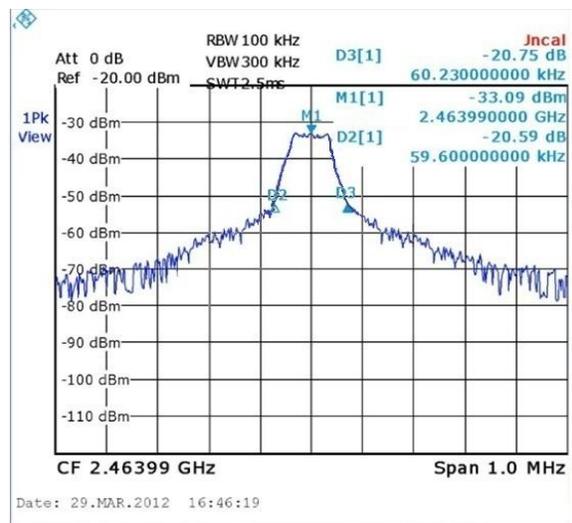


Figura 4.28 Ancho de Banda para GFSK a 10 Kbps



- Ancho de Banda para MSK a 250 Kbps y 500 Kbps**

En las figuras 4.29 y 4.30 se muestran los espectros de la señal transmitida por el sistema de comunicaciones implementado, con modulación FSK y se puede observar el ancho de banda de la señal a -20 dB mediante la suma de los valores dados por los marcadores D2 y D3. Estos valores de ancho de banda se observan en la tabla 4.4. Los resultados obtenidos en las mediciones son muy cercanos a los obtenidos teóricamente.

Figura 4.29 Ancho de Banda para MSK a 250 Kbps

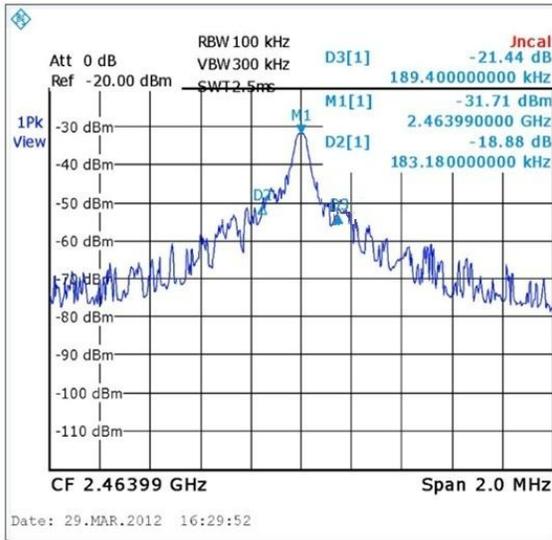
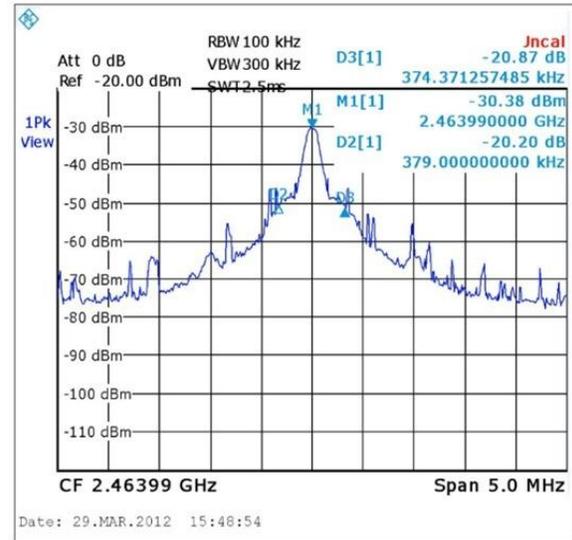


Figura 4.30 Ancho de Banda para MSK a 500 Kbps



4.3.6 Resultados Obtenidos en el Enlace Punto a Multipunto.

Las pruebas realizadas en el enlace punto a multipunto se tomaron para dos tipos de condición, sin Interferencias de canal y con interferencia de canal.

4.3.6.1 Resultados sin Fuente de Interferencia.

En todas las pruebas, cada ED forma un enlace punto a punto con el AP y en cada enlace punto a punto existe al menos un DO. Cada uno de los DO del sistema procedió a enviar 2500 paquetes, con 50 bytes de información útil hacia el DE, que se encontraba en el otro extremo de su correspondiente enlace punto a punto. En caso de que el DO tuviese varios enlaces punto a punto -que es el caso en que el AP tiene este papel- este envía 2500 paquetes por cada uno de dichos enlaces. El DE de cada enlace procede a reenviar hacia el DO, cada paquete recibido de éste.

En las distintas pruebas se procedió a variar el número de EDs y el modo de operación del sistema, obteniendo 9 tipos de pruebas distintas, las cuales se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Pruebas Realizadas del Sistema Punto a Multipunto

| Número de ED | MODO | | |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | Solo AP origina paquetes | Solo ED origina paquetes | AP y ED originan paquetes |
| 1 | Prueba 1 | Prueba 2 | Prueba 3 |
| 2 | Prueba 4 | Prueba 5 | Prueba 6 |
| 3 | Prueba 7 | Prueba 8 | Prueba 9 |

Para cada una de las pruebas se registraron los resultados tanto por los DO como por los DE de cada enlace punto a punto. De esta manera es posible estimar la pérdida de paquetes en las dos direcciones de los enlaces.

Cada dispositivo realizó un conteo de paquetes recibidos, bits errados y paquetes errados, además de un promedio de RSSI y de LQI clasificándolos por frecuencia de recepción y por el número de retransmisiones necesario para que el paquete llegara a su destino.

En la tabla 4.7 se registran los resultados de las pruebas 1,2 y 3 en las cuales solamente existe comunicación con un ED, en cada uno de los modos de operación del sistema. Para el modo SAOP, no existen pérdidas de paquetes, ni paquetes errados. Esto se debe a que no existen colisiones, ya que el ED transmite paquetes únicamente como respuesta a los paquetes que el AP envía, y el AP a su vez, espera a recibir la respuesta del ED antes de enviar el siguiente paquete. Lo mismo se observa en el modo SEOP, en el cual el AP solamente transmite como respuesta a los paquetes que el ED origina. Sin embargo, en el modo AEOP ambos dispositivos originan paquetes, en instantes arbitrarios, lo cual aumenta la probabilidad de colisiones y de errores. Esto se ve reflejado el hecho de que hubo un pequeño número de paquetes errados, al igual que un bajo número de paquetes para los cuales se requirió de una retransmisión para que el DO recibiera el eco del DE, sin embargo estas se mantienen bajas debido al uso de la técnica CCA por parte del protocolo simpliciTI®.

La tabla 4.8 muestra los resultados de la prueba 4 de la tabla 4.6 en la que existen dos ED y el sistema se configura en el modo SAOP. Se observa que, no existen pérdidas de paquetes y los errores son muy pocos. Eso se debe a que ninguno de los ED transmite paquetes por su propia iniciativa, sino únicamente como respuesta a los paquetes que envía el AP individualmente a cada uno de los ED de manera que en este sistema no se presentan colisiones. Por otra parte, la tabla 4.8 muestra los resultados de la prueba 5 de la tabla 4.6 en la que el sistema contaba con dos ED y operaba en modo SEOP. La tabla 4.9 muestra que para ambos dispositivos aumentan los paquetes que requieren ser retransmitidos una o dos veces para llegar a su destino, así como el número de paquetes que tras dos retransmisiones, nunca son recibidos correctamente por el DO. Además, el número de bits y paquetes errados aumentó considerablemente. La razón principal de este comportamiento está en el hecho de que los ED transmiten sus paquetes de manera autónoma, ya que esto aumenta la probabilidad de colisión de paquetes. A pesar de contar con CCA, las posiciones físicas de los ED respecto al AP aumentan las probabilidades de que se produzca el fenómeno de nodo oculto en el que un dispositivo comienza a transmitir mientras hay otro que está transmitiendo, debido a que no percibe la presencia de la portadora antes de iniciar la transmisión.

Las tablas 4.10 y 4.11, muestran los resultados obtenidos para la prueba 6 de la tabla 4.6 en la que se tienen dos ED y el sistema opera en el modo AEOP, de modo que en cada enlace punto a punto entre el AP y un ED los dos dispositivos originan paquetes. Esto aumenta la probabilidad de errores por colisiones, lo cual se ve reflejado en el aumento de los bits errados, los paquetes errados y los paquetes perdidos en esta prueba respecto a la prueba 5 en la que el AP no originaba paquetes.

Las pruebas 6 a 9 de la tabla 4.6 son similares a las anteriores pero, a diferencia de estas, se emplearon tres EDs Las tablas 4.12 a 4.18 contienen los resultados de estas pruebas,

en los cuales se puede notar una tendencia al aumento de los errores y de los paquetes retransmitidos y perdidos.

Para que la tendencia general del sistema sea más clara, se procedió a obtener los resultados generales mostrados en las tablas 4.19 a 4.21. Para calcular los valores mostrados en dichas tablas, se procedió a realizar dos conteos: en el primer conteo se sumaron los bits errados, paquetes errados y paquetes perdidos teniendo en cuenta todos los paquetes que han sido enviados desde un ED hacia el AP y sin hacer distinción del ED que los origina; en el segundo conteo se sumaron los bits errados, paquetes errados y paquetes perdidos para todos los paquetes que han sido enviados desde el AP hacia cualquiera de los ED presentes en el sistema, sin hacer distinción del ED hacia el cual se dirigen los paquetes. De esta manera se obtienen resultados que proporcionan una visión global del desempeño del sistema para cada una de las pruebas.

Al observar las tablas 4.19 a 4.21 se puede notar que en el modo SEOP se muestra una tendencia al aumento en el número de errores y de paquetes perdidos al aumentar el número de dispositivos. Sin embargo esta tendencia no es tan marcada en el modo AEOP ya que al pasar de 2 ED a 3 ED, no se nota un aumento considerable en los valores de la BER y la PER, aunque, sí en la pérdida de paquetes.

Tabla 4.7 Resultados Pruebas 1, 2 y 3

| CANAL | PARÁMETRO | Modo SAOP | | Modo SEOP | | Modo AEOP | | | | | | | |
|-------|------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------------|---------|---------------|---------|-----------------|---------|---------------|---------|
| | | | | | | 0 | | 1 | | 0 | | 1 | |
| | | AP (DO) | ED (DE) | AP (DE) | ED (DO) | Retransmisiones | | Retransmisión | | Retransmisiones | | Retransmisión | |
| | | | | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) |
| 3 | RSSI | -51,5 | -50,5 | -50 | -50,5 | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 |
| | LQI | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 |
| | PAQUETES RX | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2493 | 2495 | 7 | 7 | 2494 | 2495 | 6 | 5 |
| | PAQUETES ERRADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | BITS ERRADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 35 | 43 | 0 | 0 | 15 | 15 | 0 | 0 |
| | BER | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,5E-5 | 4,3E-5 | 0 | 0 | 1,5E-5 | 1,5E-5 | 0 | 0 |
| | PER | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,02E-4 | 8,01E-4 | 0 | 0 | 4E-4 | 4E-4 | 0 | 0 |
| | P. PERDIDOS | 0 | | 0 | | 2 | | 0 | | 1 | | 0 | |
| | P. SIN ECO | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |

Tabla 4.8 Resultados Prueba 4

| CANAL | PARÁMETRO | ED0 | | ED1 | |
|-------|-------------------|-----------------|---------|-----------------|------|
| | | 0 | | 0 | |
| | | Retransmisiones | | Retransmisiones | |
| | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | |
| 3 | RSSI | -51 | -50,5 | -50 | -53 |
| | LQI | 5 | 6 | 5 | 5 |
| | PAQUETES RX | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| | PAQUETES ERRADOS | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | BITS ERRADOS | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | BER | 2E-6 | 0 | 0 | 0 |
| | PER | 4E-4 | 0 | 0 | 0 |
| | PAQUETES PERDIDOS | 0 | | 0 | |
| | PAQUETES SIN ECO | 0 | | .0 | |

Tabla 4.9 Resultados Prueba 5

| CANAL | PARÁMETRO | ED0 Número de Retransmisiones | | | | | | ED1 | | | | | |
|-------|-------------------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) |
| 3 | RSSI | -50 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 |
| | LQI | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 6 |
| | PAQUETES RX | 2383 | 2379 | 81 | 78 | 31 | 31 | 2410 | 2403 | 54 | 51 | 30 | 30 |
| | PAQUETES ERRADOS | 43 | 37 | 13 | 16 | 4 | 6 | 30 | 27 | 12 | 11 | 6 | 7 |
| | BITS ERRADOS | 301 | 279 | 77 | 111 | 53 | 71 | 199 | 173 | 139 | 131 | 63 | 76 |
| | BER | 3,15E-4 | 2,96e-4 | 2,37E-3 | 3,55E-3 | 4,27E-3 | 5,7E-3 | 2E-4 | 1,79E-4 | 6,4E-3 | 6,4E-2 | 5,25E-3 | 6,33E-3 |
| | PER | 1,8E-2 | 1,5e-2 | 0,16 | 0,2 | 0,129 | 0,192 | 1,2E-2 | 7,2E-2 | 0,222 | 0,215 | 0,2 | 0,233 |
| | PAQUETES PERDIDOS | 4 | | 3 | | 0 | | 7 | | 3 | | 0 | |
| | P. SIN ECO | 12 | | | | | | 16 | | | | | |

Tabla 4.10 Resultados Prueba 6 para los Paquetes Originados por el AP

| CANAL | PARÁMETRO | ED0 Número de Retransmisiones | | | | | | ED1 | | | | | |
|-------|------------------|----------------------------------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) |
| 3 | RSSI | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 |
| | LQI | 5 | 6 | 5 | 7 | 5 | 7 | 5 | 6 | 5 | 7 | 5 | 5 |
| | PAQUETES RX | 2297 | 2303 | 117 | 120 | 59 | 59 | 2273 | 2275 | 101 | 105 | 105 | 110 |
| | PAQUETES ERRADOS | 53 | 54 | 16 | 15 | 7 | 7 | 49 | 44 | 14 | 15 | 11 | 11 |
| | BITS ERRADOS | 1437 | 1452 | 211 | 180 | 86 | 86 | 1201 | 1127 | 204 | 231 | 149 | 149 |
| | BER | 1,56 E-3 | 1,57 E-3 | 4,5 E-3 | 3,75 E-3 | 3,64 E-3 | 3,64 E-3 | 1,32 E-3 | 1,23 E-3 | 5,04 E-3 | 5,5 E-3 | 3,54 E-3 | 3,38 E-3 |
| | PER | 2,3E-2 | 2,34 E-2 | 0,13 | 0,125 | 0,118 | 0,118 | 2,15 E-2 | 1,93 E-2 | 0,138 | 0,142 | 0,104 | 0,1 |
| | P. PERDIDOS | 6 | | 3 | | 0 | | 2 | | 4 | | 5 | |
| | P. SIN ECO | 27 | | | | | | 21 | | | | | |

Tabla 4.11 Resultados Prueba 6 para los Paquetes Originados por el ED

| CANAL | PARÁMETRO | ED0 Número de Retransmisiones | | | | | | ED1 Número de Retransmisiones | | | | | |
|-------|------------------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|---------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) |
| 3 | RSSI | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 |
| | LQI | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | PAQUETES RX | 2325 | 2321 | 97 | 95 | 49 | 49 | 2203 | 2199 | 165 | 165 | 115 | 112 |
| | PAQUETES ERRADOS | 43 | 47 | 13 | 13 | 5 | 6 | 46 | 45 | 16 | 18 | 15 | 12 |
| | BITS ERRADOS | 879 | 1039 | 129 | 129 | 37 | 49 | 1215 | 1191 | 319 | 517 | 234 | 234 |
| | BER | 9,45E-4 | 1,11 E-3 | 3,32 E-3 | 3,39 E-3 | 1,88 E-3 | 2,5 E-3 | 1,37 E-3 | 1,35 E-3 | 4,83 E-3 | 7,83 E-3 | 5,08 E-3 | 5,22 E-3 |
| | PER | 1,84 E-2 | 2,02 E-2 | 0,134 | 0,136 | 0,102 | 0,122 | 2,08 E-2 | 2,04 E-2 | 9,69 E-2 | 0,109 | 0,130 | 0,107 |
| | P. PERIDDOS | 4 | | 2 | | 0 | | 4 | | 0 | | 3 | |
| | P. SIN ECO | 35 | | | | | | 27 | | | | | |

Tabla 4.12 Resultados Prueba 7

| CANAL | PARÁMETRO | ED0 | | ED1 | | ED2 | |
|-------|-------------------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|
| | | 0 Retransmisiones | | 0 Retransmisiones | | 0 Retransmisiones | |
| | | AP (DO) | ED (DE) | AP (D0) | ED (DE) | AP (D0) | ED (DE) |
| 3 | RSSI | -51 | -50,5 | -50 | -53 | -52 | -51 |
| | LQI | 5 | 6 | 5 | 5 | 7 | 5 |
| | PAQUETES RX | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |
| | PAQUETES ERRADOS | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 |
| | BITS ERRADOS | 10 | 0 | 0 | 0 | 15 | 10 |
| | BER | 2E-6 | 0 | 0 | 0 | 1,5E-5 | 1E-5 |
| | PER | 4E-4 | 0 | 0 | 0 | 8E-4 | 4E-4 |
| | PAQUETES PERDIDOS | 0 | | 0 | | 0 | |
| | PAQUETES SIN ECO | 0 | | 0 | | 0 | |

Tabla 4.13 Resultados Prueba 8 para el ED0 y el ED1

| CANAL | PARÁMETRO | ED0 Número de Retransmisiones | | | | | | ED1 Número de Retransmisiones | | | | | |
|------------|------------------|----------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|----------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) |
| 3 | RSSI | -50 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 |
| | LQI | 5 | 6 | 5 | 7 | 5 | 7 | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 6 |
| | PAQUETES RX | 2235 | 2221 | 201 | 197 | 53 | 53 | 2273 | 2260 | 171 | 163 | 40 | 37 |
| | PAQUETES ERRADOS | 66 | 61 | 24 | 23 | 9 | 9 | 61 | 57 | 20 | 17 | 5 | 4 |
| | BITS ERRADOS | 972 | 831 | 170 | 153 | 84 | 84 | 905 | 749 | 270 | 234 | 61 | 77 |
| | BER | 1,E-3 | 9E-4 | 2,1 E-3 | 1,9E-3 | 3,9E-3 | 3,9E-3 | 9,9E-4 | 8,2E-4 | 3,9E-3 | 3,5E-3 | 3,8E-3 | 5,2E-3 |
| | PER | 2,95E-2 | 2,74 E-2 | 0,119 | 0,116 | 0,169 | 0,169 | 2,68 E-2 | 2,52 E-2 | 0,116 | 0,104 | 0,125 | 0,108 |
| | P. PERIDDOS | 14 | | 4 | | 0 | | 4 | | 0 | | 3 | |
| P. SIN ECO | 29 | | | | | | 40 | | | | | | |

Tabla 4.14 Resultados Prueba 8 para el ED2

| CANAL | PARÁMETRO | ED2 Número de Retransmisiones | | | | | |
|------------|------------------|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) |
| 3 | RSSI | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 |
| | LQI | 5 | 6 | 5 | 7 | 5 | 6 |
| | PAQUETES RX | 2355 | 2339 | 65 | 71 | 58 | 63 |
| | PAQUETES ERRADOS | 54 | 51 | 11 | 10 | 7 | 6 |
| | BITS ERRADOS | 871 | 921 | 115 | 103 | 181 | 83 |
| | BER | 1,08E-3 | 9,35 E-4 | 2,11 E-3 | 1,94 E-3 | 3,96 E-3 | 3,96 E-3 |
| | PER | 2,95 E-2 | 2,74 E-2 | 0,119 | 0,116 | 0,169 | 0,169 |
| | P. PERIDDOS | 16 | | 6 | | 5 | |
| P. SIN ECO | 27 | | | | | | |

Tabla 4.15 Resultados Prueba 9 para los Paquetes Originados por el AP (ED0 y el ED1)

| CANAL | PARÁMETRO | ED0 Número de Retransmisiones | | | | | | ED1 Número de Retransmisiones | | | | | |
|------------|------------------|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) |
| 3 | RSSI | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 |
| | LQI | 6 | 6 | 5 | 7 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 6 |
| | PAQUETES RX | 2201 | 2211 | 125 | 127 | 121 | 121 | 2223 | 2225 | 105 | 105 | 105 | 110 |
| | PAQUETES ERRADOS | 57 | 56 | 17 | 15 | 7 | 7 | 45 | 45 | 14 | 15 | 11 | 11 |
| | BITS ERRADOS | 1503 | 1483 | 308 | 273 | 19 | 19 | 1007 | 1127 | 204 | 231 | 149 | 149 |
| | BER | 1,7E-3 | 1,67 E-3 | 6,16 E-3 | 5,37 E-3 | 3,92 E-4 | 3,92 E-4 | 1,13 E-3 | 1,24E-3 | 4,85E-3 | 5,5E-3 | 3,54E-3 | 3,38E-3 |
| | PER | 2,58E-2 | 2,53 E-2 | 0,136 | 0,118 | 5,78 E-2 | 5,78 E-2 | 2,02 E-2 | 1,99E-2 | 0,133 | 0,142 | 0,104 | 0,1 |
| | P. PERIDDOS | 10 | | 2 | | 0 | | 2 | | 0 | | 5 | |
| P. SIN ECO | 53 | | | | | | 67 | | | | | | |

Tabla 4.16 Resultados Prueba 9 para los Paquetes Originados por el AP (ED2)

| CANAL | PARÁMETRO | ED2 Número de Retransmisiones | | | | | |
|------------|------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) |
| 3 | RSSI | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 |
| | LQI | 6 | 6 | 5 | 7 | 5 | 6 |
| | PAQUETES RX | 2300 | 2303 | 69 | 72 | 83 | 83 |
| | PAQUETES ERRADOS | 33 | 34 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| | BITS ERRADOS | 1001 | 1084 | 41 | 41 | 93 | 62 |
| | BER | 1,08E-3 | 1,17 E-3 | 1,48 E-3 | 1,42 E-3 | 2,80 E-3 | 1,86 E-3 |
| | PER | 1,43 E-2 | 1,47 E-2 | 4,34 E-2 | 4,16 E-2 | 4,81 E-2 | 3,61 E-2 |
| | P. PERIDDOS | 3 | | 3 | | 0 | |
| P. SIN ECO | 42 | | | | | | |

Tabla 4.17 Resultados Prueba 9 para los Paquetes Originados por el AP (ED0 y el ED1)

| CANAL | PARÁMETRO | ED0 Número de Retransmisiones | | | | | | ED1 Número de Retransmisiones | | | | | |
|------------|------------------|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) |
| 3 | RSSI | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 |
| | LQI | 5 | 6 | 5 | 8 | 5 | 5 | 7 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | PAQUETES RX | 2257 | 2253 | 103 | 103 | 115 | 114 | 2137 | 2130 | 115 | 115 | 153 | 150 |
| | PAQUETES ERRADOS | 50 | 51 | 15 | 16 | 19 | 18 | 40 | 39 | 13 | 14 | 18 | 17 |
| | BITS ERRADOS | 1139 | 1273 | 375 | 373 | 361 | 337 | 1115 | 1086 | 283 | 317 | 350 | 331 |
| | BER | 1,26E-3 | 1,41 E-3 | 9,01 E-3 | 9,05 E-3 | 7,91 E-3 | 7,39 E-3 | 1,34 E-3 | 1,27E-3 | 6,15 E-3 | 6,89 E-3 | 5,71 E-3 | 5,51 E-3 |
| | PER | 2,21 E-2 | 2,26 E-2 | 0,144 | 0,155 | 0,166 | 0,157 | 1,87 E-2 | 1,83E-2 | 0,113 | 0,121 | 0,117 | 0,113 |
| | P. PERIDDOS | 4 | | 0 | | 1 | | 7 | | 0 | | 3 | |
| P. SIN ECO | 30 | | | | | | 105 | | | | | | |

Tabla 4.18 Resultados Prueba 9 para los Paquetes Originados por el AP (ED2)

| CANAL | PARÁMETRO | ED2 Número de Retransmisiones | | | | | |
|------------|------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) | AP (DE) | ED (DO) |
| 3 | RSSI | -51,5 | -50,5 | -50 | -53 | -50 | -53 |
| | LQI | 7 | 6 | 6 | 5 | 6 | 7 |
| | PAQUETES RX | 2345 | 2340 | 65 | 65 | 70 | 70 |
| | PAQUETES ERRADOS | 26 | 65 | 5 | 5 | 6 | 7 |
| | BITS ERRADOS | 610 | 643 | 193 | 193 | 293 | 321 |
| | BER | 1,26 E-3 | 1,41 E-3 | 9,01 E-3 | 9,05 E-3 | 7,91 E-3 | 7,39 E-3 |
| | PER | 2,21 E-2 | 2,26 E-2 | 0,14423077 | 0,15533981 | 0,16666667 | 0,15789474 |
| | P. PERIDDOS | 5 | | 0 | | 0 | |
| P. SIN ECO | 25 | | | | | | |

Tabla 4.19 Resultados Generales para 1ED

| | Modo SAOP | | Modo SEOP | | Modo AEOP | |
|-----------------------|-----------|----|-----------|----|-----------|---------|
| | AP | ED | AP | ED | AP | ED |
| BER | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,5E-5 | 2,89E-5 |
| PER | 0 | 0 | 0 | 0 | 6E-4 | 5,99E-4 |
| % PERDIDA DE PAQUETES | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,19E-3 | 9,9E-4 |

Tabla 4.20 Resultados Generales para 2 ED

| | Modo SAOP | | Modo SEOP | | Modo AEOP | |
|-----------------------|-----------|----|-----------|---------|-----------|---------|
| | AP | ED | AP | ED | AP | ED |
| BER | 1E-6 | 0 | 4,16E-4 | 4,22E-4 | 1,53E-3 | 1,61E-3 |
| PER | 2E-4 | 0 | 2,16E-2 | 2,09E-2 | 2,93E-2 | 2,86E-2 |
| % PERDIDA DE PAQUETES | 0 | 0 | 2,2E-3 | 5,99E-2 | 6,44E-2 | 7,36E-2 |

Tabla 4.21 Resultados Generales para 3 ED

| | Modo SAOP | | Modo SEOP | | Modo AEOP | |
|-----------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| | AP | ED | AP | ED | AP | ED |
| BER | 8,33E-6 | 1,23E-5 | 2,43E-3 | 5,6E-4 | 1,58E-3 | 6,13E-4 |
| PER | 4E-4 | 1,33E-4 | 2,34E-2 | 2,24E-2 | 3,07E-2 | 2,91E-2 |
| % PERDIDA DE PAQUETES | 0 | 0 | 1,47E-2 | 7,6E-2 | 8,6E-2 | 8,9E-2 |

Los resultados anteriores permiten realizar una estimación del número de ED que puede soportar la red. Para realizar dicha estimación se establecieron unos límites para el BER y el PER y se procedió a realizar una predicción lineal del aumento de dichos parámetros basándose en el incremento de los mismos al aumentar el número de ED de 2 a 3. La estimación se realizó para cada uno de los modos de operación y con los resultados obtenidos en cada una de las direcciones de los enlaces entre el AP y los ED. La tabla 4.22 muestra los números estimados de ED obtenidos mediante este procedimiento para cada uno de los modos de operación y para dos diferentes criterios.

Tabla 4.22 Número Estimado de ED

| Criterio | Modo SAOP | Modo SEOP | Modo AEOP |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| BER<5E-3 | 406 | 69 | 23 |
| PER<1E-1 | 498 | 50 | 43 |

Debe tenerse en cuenta que los resultados en la tabla 4.22 fueron obtenidos bajo las condiciones de tráfico presentes en las pruebas realizadas, las cuales son altas debido a

que cada dispositivo originador transmite sus paquetes de manera ininterrumpida. Sin embargo, bajo condiciones normales, en las redes de sensores reales los niveles de tráfico son menores a los de estas pruebas.

4.3.6.2 Resultados con Fuente de Interferencia.

Para esta prueba se empleó la configuración más simple y que en ausencia de interferencia mostró la menor probabilidad de errores en la cual solamente existe un ED y el sistema se encuentra en el modo SAOP. De esta manera es posible atribuir razonablemente los errores medidos al efecto de la interferencia. La tabla 4.23 muestra los resultados de esta prueba. En ella se observa la interferencia provocó una disminución del RSSI y un aumento del LQI. Además el número de errores aumentó significativamente hasta llevar al AP a hacer un salto hacia la siguiente frecuencia en la tabla de frecuencias de simpliciti®. También es notorio que los paquetes recibidos en la segunda frecuencia no muestran los efectos de la interferencia que se registraron para los paquetes transmitidos por el canal interferido.

Tabla 4.23 Resultados Prueba de Interferencia

| CANAL | PARÁMETRO | ED0 Número de Retransmisiones | | | | | |
|-------|-------------------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 0 | | 1 | | 2 | |
| | | AP (DO) | ED (DE) | AP (D0) | ED (DE) | AP (DO) | ED (DE) |
| 3 | RSSI | -54 | -53 | -55 | -54 | -53 | -54 |
| | LQI | 30 | 32 | 26 | 32 | 30 | 32 |
| | PAQUETES RX | 427 | 531 | 133 | 157 | 33 | 37 |
| | PAQUETES ERRADOS | 263 | 310 | 39 | 47 | 17 | 13 |
| | BITS ERRADOS | 7631 | 8110 | 1231 | 1115 | 1091 | 793 |
| | PAQUETES PERDIDOS | 279 | | | | | |
| 103 | RSSI | -50 | -51 | | | | |
| | LQI | 5 | 5 | | | | |
| | PAQUETES RX | 1628 | 1628 | | | | |
| | PAQUETES ERRADOS | 0 | 0 | | | | |
| | BITS ERRADOS | 0 | 0 | | | | |
| | PAQUETES PERDIDOS | 0 | | | | | |

Capítulo 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

- La distancia máxima entre el transmisor y el receptor que permite garantizar comunicaciones con un BER inferior a 10^{-3} en un sistema de comunicación punto a punto implementado con el kit de desarrollo eZ430-RF2500 es, en el escenario de interiores, de 22 metros para las modulaciones FSK y GFSK con velocidades de transmisión de datos de 2,4Kbps y 10Kbps, mientras que para la modulación MSK a 250Kbps es de 10 metros y para la modulación MSK a 500Kbps es de 7 metros. Este resultado muestra que el alcance de las comunicaciones disminuye al aumentar la velocidad de transmisión. Este comportamiento también puede observarse en el escenario de exteriores en el cual el alcance máximo es de 13 metros para las modulaciones FSK y GFSK con velocidades de transmisión de datos de 2,4Kbps y 10Kbps mientras que para la modulación MSK con velocidad de 250Kbps es de 7 metros y se reduce a los 5 metros para la modulación MSK con velocidad de 500Kbps. Comparando los resultados en interiores y en exteriores puede notarse que el alcance en el escenario de exteriores disminuye considerablemente en comparación con el escenario de interiores.
- El kit de desarrollo eZ430-RF2500 presenta una desviación en frecuencia, respecto a la frecuencia nominal definida en la hoja de especificaciones que va entre las 6,28 partes por millón para una temperatura de 25 °C y 0,76 partes por millón para una temperatura de 80 °C, según las medidas tomadas en el desarrollo del presente trabajo de grado. La hoja de especificaciones del kit de desarrollo eZ430-RF2500 muestra que este tiene una tolerancia de 20 partes por millón en la frecuencia de operación, de manera que en todo el rango de temperatura medido, la frecuencia de operación del kit se mantuvo dentro de los límites permitidos. Esto significa que el kit de desarrollo es estable en frecuencia frente a cambios de temperatura.
- Aunque durante el desarrollo del presente trabajo de grado solamente se contaba con un máximo de 3 ED para la red punto a multipunto que implementa el protocolo simpliciTI®, los resultados obtenidos permitieron realizar una estimación aproximada de la cantidad de ED que podría soportar una red de este tipo para cada uno de los modos de operación. Los resultados obtenidos muestran que el modo de operación en el que solamente el AP origina paquetes es el que soporta un mayor número ED ya que, según la estimación soporta más de 400 ED. Sin embargo, la especificación de simpliciTI® dice que este protocolo soporta un máximo de 100 ED. Por otra parte, el modo en que solamente los ED originan paquetes soportan un máximo de 50 ED, según la predicción mientras que el modo en el que los dos tipos de dispositivos

originan paquetes simultáneamente soporta un máximo de 23 dispositivos. Esto permite concluir que si se implementan protocolos en los que el AP coordine el acceso de los ED al medio, en lugar de permitir que estos accedan al medio en instantes arbitrarios, reduce significativamente los errores y permite un mayor número de ED en el sistema.

- Se verificó que ante condiciones adversas en un canal de RF, el protocolo simpliciTI® posee la capacidad de realizar un cambio automático de canal.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Evaluación y análisis de desempeño de una red de sensores móviles en la banda de 2,4 GHz empleando el protocolo SimpliciTI®.

Evaluación y análisis de desempeño de un sistema punto a multipunto en la banda de 2,4 GHz empleando técnicas de codificación de canal para la detección y corrección de errores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Ramírez, J. Díaz, *Las redes inalámbricas, más ventajas que desventajas*. México: Universidad Veracruzana. Facultad de Contaduría y Administración. México. Nivel académico pregrado.[En Línea].
<http://www.uv.mx/iiesca/revista/documents/redes2008-2.pdf>.
[Consultado Febrero 15, 2012]
- [2] L. Fernández, *Transmisión y Comunicación de Datos*. México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de ciencias de la Computación. 2005. Nivel académico pregrado.
- [3] J.Orduña, *Fundamentos de Modulación*. Universidad de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Departamento de Informática. Material de apoyo para el curso: *Telemática y Sistemas de transmisión de Datos*. 2011.
- [4] M. Faúndez, *Sistemas de Comunicaciones*. Edit. Marcombo. España: 2001.
- [5] "Módulación GFSK ("Gaussian Minimum Shift Keying"),". [En Línea].
<http://ceres.ugr.es/~alumnos/alonso/p3.html>. [Consultado Diciembre 28, 2011]
- [6] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Edit. Prentice Hall Mexico: 2003.
- [7] D. Ortiz, *Personal Area Network (PAN)*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala. 2012.
- [8] G. Díaz, *Redes de Computadoras. Introducción a la Arquitectura de Redes*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, facultad de Ingeniería. Escuela de Sistemas. 2010
- [9] Texas Instruments®, "eZ430-RF2500 Development Toll User's Guide", 2007.
- [10] Texas Instruments®, "MSP430x22x2, MSP430x22x4 Mixed Signal Microcontroller", 2007.
- [11] Texas Instruments®, "CC2500, Single Chip Low Cost Low Power FR Transceiver", 2006.
- [12] Texas Instruments®, *MSP430™ Programming Via the JTAG Interface*, 2012
- [13] L. Lemaître, A Brief Tutorial on *SimpliciTI® 1.1.1*. USA: Texas Instruments®, Inc. USA. 2010
- [14] L. Fierdman, *SimpliciTI®: Simple Modular RF Network Specification*. USA, San Diego, California: Texas Instruments®, Inc. USA. 2009

- [15] Texas Instruments®, “*Introduction to SimpliciTI Low-Power RF Protocol from Texas Instruments Free Source Code Available*”, 2008.
- [16] Texas Instruments®, “*MSP430 IAR Embedded Workbench. User Guide*”, 2005.
- [17] Texas Instruments®, “*Code Composer Studio. User Guide*”, 2000.
- [18] *Tutorial de Postgres*, Postgres Global Developments [16]
- [19] Remcom, "The Wireless InSite R Users Manual," 2009.
- [20] D. Garcia and L. Navarro, "Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz Basado en Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia Utilizando el Modelo Peer-to-Peer," Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Tesis de Grado 2011.
- [21] S. Agredo and J. Luna, "Análisis de Cobertura de un Sistema WI -FI en Interiores, Mediante la Técnica de Trazado de Rayos," Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Trabajo de Grado 2011.
- [22] Group A.Ruiz, *Diseño e Implementación de una Red de Sensores de Nodos Móviles*, Escuela Politécnica Superior de CastellFedels, Universidad Politécnica de Catalunya, España, Trabajo de Fin de Carrera 2009. [En Línea]
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/8295/1/memoria.pdf> [Consultado Julio 10 de 2012].
- [23] L. Martinez and P. Sevilla, "Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Punto a Punto Vía Radio que Utiliza Codificación Reed-Solomon," Departamento de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Trabajo de Grado 2012.