

# ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DATOS VÍA RADIO PUNTO A PUNTO DE CORTO ALCANCE EN UHF

ANALYSIS AND EVALUATION OF A SHORT RANGE POINT TO POINT RADIO DATA COMMUNICATION SYSTEM IN UHF



## AUTOR

YULY MARTIZA GONZÁLEZ LUNA  
Ingeniera en Electrónica y telecomunicaciones.  
\*Universidad del Cauca  
Miembro Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL)  
+57 (2) 8209800  
+57 (2) 8209811  
ymgonzalez@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## AUTOR

CARLOS ALBERTO GÓMEZ FERNÁNDEZ  
Ingeniero en Electrónica y telecomunicaciones.  
\*Universidad del Cauca.  
Miembro Grupo de Radio e Inalámbricas (GRIAL)  
+57 (2) 8209800  
+57 (2) 8209811  
carlosfernandez@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## AUTOR

VICTOR MANUEL QUINTERO FLÓREZ  
Ingeniero en Electrónica y telecomunicaciones.  
Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.  
Coordinador del Grupo de Radio e InAlámbricas (GRIAL)  
\*Universidad del Cauca Miembro Profesional IEEE.  
+57 (2) 8209800 Ext 2137  
+57 (2) 8209811  
vflorez@unicauca.edu.co  
COLOMBIA

## INSTITUCIÓN

\*UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
UNICAUCA  
Universidad pública  
Calle 5 # 4 - 70.  
Popayán, Cauca  
COLOMBIA

**Recepción:** Agosto 31 de 2009

**Aceptación:** Diciembre 14 de 2009

**Temática:** Sistemas inalámbricos y móviles.

**Tipo de artículo:** Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

**RESUMEN**

En el desarrollo, investigación e innovación relacionada con la implementación de sistemas de comunicación de datos vía radio, resulta conveniente utilizar dispositivos que operen en las bandas de uso libre. Esto implica el estudio y la utilización de tecnologías de bajo costo, baja potencia y corto alcance relacionadas con Circuitos Integrados de Radiofrecuencia (RFIC, Radiofrequency Integrated Circuits), el análisis de las características de estabilidad y exactitud en frecuencia de dispositivos inalámbricos, análisis de esquemas de modulación y codificación, ingeniería de protocolos, control de errores, análisis de potencia, ancho de banda y consideraciones de desempeño del sistema ante ruido e interferencia.

Este artículo es la implementación de un sistema de comunicación sencillo, práctico y confiable que por medio del uso de transceptores de radiofrecuencia permite establecer una comunicación de datos entre dos equipos terminales, la aplicación de un protocolo de comunicaciones que garantiza calidad en la transmisión y recepción de la información, evaluando y analizando las características principales de la comunicación y su desempeño para diferentes condiciones de propagación o escenarios. El sistema implementado es una herramienta que permite soportar procesos de enseñanza y aprendizaje en lo relacionado a sistemas de comunicación de datos vía radio, que involucra software y hardware y en especial el uso de circuitos integrados de radiofrecuencia y equipo especializado de medida.

Este artículo es una primera aproximación a la evaluación y análisis del desempeño de sistemas de comunicación de datos utilizando pequeños dispositivos de baja potencia en la banda de 433 MHz, que puede ser utilizado en diferentes tipos de aplicaciones tanto de hogar como de industria.

**PALABRAS CLAVES**

RFIC  
Modulación  
Codificación  
Protocolo  
Desempeño

**ANALYTICAL SUMMARY**

In development, research and innovation related to the implementation of radio data communication systems, it is convenient to use devices operating on free bands. It implies studying and using low cost technologies related to Radiofrequency Integrated Circuits (RFIC), frequency stability and accuracy analysis in wireless devices, modulation and encoding schemes analysis, protocol engineering, error control, power analysis, bandwidth and system performance against noise and interference.

This article is about the implementation of a simple, practical and reliable communication system, which through radiofrequency transceivers allows establishing a data communication between two data terminal equipments, the application of a communication protocol which guarantees quality in information transmission and reception, evaluating and analyzing the main

features of the communication and its performance for different propagation conditions or scenarios. The implemented system is a tool which allows supporting teaching and learning processes in relation to radio or wireless data communication systems, which involves software and hardware and specially the use of radiofrequency integrated circuits and specialized measurement equipment.

This article is a first approach to the performance evaluation and analysis of data communication systems, using low power small devices in 433 MHz, which can be used in different applications in home and industry.

**KEYWORDS**

RFIC  
Modulation  
Coding  
Protocol  
Performance

**INTRODUCCIÓN**

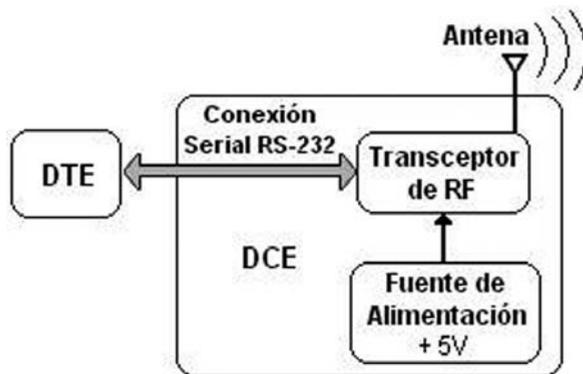
Entre las alternativas que se plantean para comunicar dos computadores e intercambiar información entre ellos, dependiendo de la distancia y del entorno de desarrollo, la tecnología inalámbrica es una muy buena

opción, debido a las ventajas que ofrece en cuanto a movilidad, flexibilidad, portabilidad y simplicidad en la conexión física.

La utilización de los RFIC en comunicaciones inalámbricas brinda una solución realmente válida a través de la implementación de sistemas sencillos y confiables que permitan establecer una comunicación de datos vía radio entre dos equipos terminales por medio de un determinado protocolo que garantice calidad en la transmisión y recepción de la información.

## 1. SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DATOS VÍA RADIO

Los componentes utilizados en uno de los extremos del sistema de comunicación vía radio implementado se detallan en la figura 1. El Equipo Terminal de Datos (DTE, *Data Terminal Equipment*) corresponde a un computador que recibe o entrega la señal digital hacia un Equipo de Comunicación de Datos (DCE, *Data Communication Equipment*).

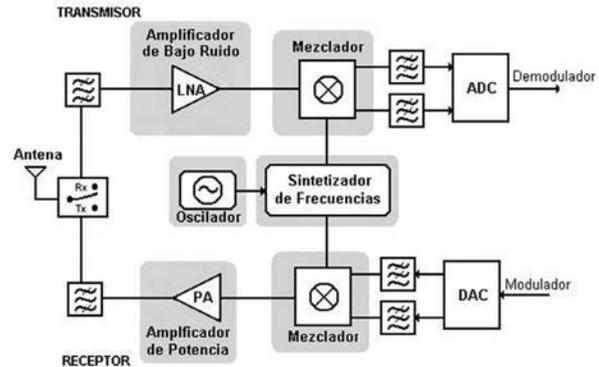


**Figura 1.** Componentes del Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio

En el DTE se realiza la codificación/decodificación de los datos y se define un protocolo de comunicación. El DCE se refiere al transceptor de Radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*) utilizado para la transmisión y recepción de datos, el cual consta principalmente de un RFIC y realiza la modulación/demodulación de la señal de información.

### 1.1 TRANSCPTORES BASADOS EN RFIC

En la figura 2 se aprecia un diagrama general que describe la estructura de los RFIC a partir de los cuales se construye un transceptor inalámbrico.



**Figura 2.** Diagrama en bloques de un RFIC para un transceptor inalámbrico [1]

Dos secciones principales constituyen el RFIC: receptor y transmisor. El duplexor, que funciona como un interruptor, permite que el transmisor y receptor puedan utilizar la misma antena. A continuación se encuentra de manera general la descripción de las funciones de los bloques o unidades que constituyen el RFIC.

#### 1.1.1 Oscilador

Es un circuito eléctrico activo que puede generar formas de onda periódicas. La energía DC proveniente de una fuente de energía se transforma en una señal variable a la salida del oscilador, la cual se define por ciertos parámetros tales como la amplitud, la frecuencia y la forma de onda [2].

#### 1.1.2 Sintetizador de Frecuencias

Este es uno de los módulos más importantes en los dispositivos inalámbricos y se encarga de generar la señal del oscilador local (LO, *Local Oscillator*), base de operación de los RFIC [3].

El método más utilizado en la síntesis de frecuencia es el que trabaja con un Lazo de Enganche de Fase (PLL, *Phase Locked Loop*), el cual es un circuito de control realimentado que incorpora un divisor de frecuencia para generar una señal a partir de la frecuencia del oscilador utilizado [3].

El Oscilador Controlado por Voltaje (VCO, *Voltage-Controlled Oscillator*) es un elemento común en sistemas inalámbricos y generalmente hace parte del sintetizador de frecuencias. Su frecuencia de salida es controlada por un voltaje de entrada, la cual varía linealmente de acuerdo a éste [4].

### 1.1.3 Mezclador

Es un elemento utilizado para trasladar la frecuencia de una señal a un rango de frecuencias diferente sin modificar sus características. La conversión de frecuencia puede ser de RF a Banda Base (BB, *Base Band*) o viceversa. Un mezclador es un circuito no lineal y las variaciones de frecuencia en estos dispositivos provocan ruido que deberá ser controlado adecuadamente para evitar la degradación de la señal en la salida del mezclador [5].

Con el fin de controlar la generación de señales no deseadas que resultan de la no linealidad del proceso de mezcla, se utilizan filtros para el rechazo de las señales fuera de banda.

### 1.1.4 Amplificador de Potencia (PA, *Power Amplifier*)

El PA constituye el último elemento activo de la sección transmisora y es el encargado de amplificar y entregar la señal a la antena con un nivel lo suficientemente alto para que pueda viajar a través del aire hacia el receptor [6].

Uno de los parámetros más importantes que determinan el funcionamiento, el tipo de configuración y clases de operación de los PAs es la eficiencia, la cual se define como la relación entre la potencia de salida en RF entregada a la carga y la potencia de entrada proveniente de la fuente DC [7].

Un componente esencial del PA que permite la máxima transferencia de potencia sin generar ondas estacionarias es la red de adaptación de impedancias, la cual consta de componentes reactivos y una resistencia de carga que generalmente se encuentra estandarizada en 50 Ohm y puede ser reemplazada por una antena o un filtro pasabanda obteniendo la máxima transferencia de potencia desde el PA hacia la antena [6].

### 1.1.5 Amplificador de Bajo Ruido (LNA, *Low Noise Amplifier*)

Es un amplificador electrónico utilizado para amplificar señales muy débiles percibidas por una antena; debe proporcionar la mínima figura de ruido, la máxima ganancia, una respuesta plana en el ancho de banda especificado y un bajo consumo de energía [8].

### 1.1.6 Antena

Es un elemento esencial para capturar y enviar la señal de RF en forma de ondas electromagnéticas. Actúa como una impedancia de carga y dependiendo de su diseño el valor de impedancia puede fluctuar significativamente en función del ambiente [1].

## 1.2 TRANSCÉPTOR DE RF: YS-1020UA

El sistema implementado utiliza transceptores referenciados como YS-1020UA, proporcionado por *ShenZhen Yishi Electronic Technology Development Co., Ltd* de Shenzhen (Guangdong), China. El funcionamiento de estos dispositivos se basa en el RFIC CC1020 de *Texas Instruments*. En la figura 3 se muestra los transceptores utilizados y sus características se detallan en la tabla 1.



FIGURA 3. Transceptor de RF YS1020UA

TABLA 1. Características del transceptor YS-120UA [Fuente: <http://www.yishi.net.cn/>]

| Frecuencia de operación   | 434,0325 MHz                          |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Interfaz serial           | RS-232                                |
| Velocidad de transmisión  | 9600 bps                              |
| Modulación                | GFSK                                  |
| Impedancia de salida      | 50Ω                                   |
| Conector de Antena        | SMA ( <i>SubMiniature version A</i> ) |
| Potencia de RF            | ≤ 10mW/10dBm                          |
| Corriente en transmisión  | ≤ 40mA                                |
| Corriente en recepción    | < 25mA                                |
| Fuente de voltaje DC      | 5V ó 3,3V                             |
| Sensibilidad del receptor | -115dBm (9600 bps)                    |
| Distancia máxima          | 500 m                                 |

### 1.3 RFIC CC1020

Corresponde a un circuito integrado de radiofrecuencia (RFIC) diseñado para aplicaciones de transmisión y recepción inalámbrica con bajo consumo de energía, para Dispositivos de Corto Alcance (SRD, *Short Range Devices*), que opera en bandas de uso libre para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*) entre 402 y 470 MHz, 868 MHz y 915 MHz.

De acuerdo al tipo de aplicación, para lograr un buen desempeño se pueden configurar determinados parámetros del CC1020 tales como la potencia y frecuencia de salida de RF, la frecuencia de referencia de oscilación local, la velocidad de transmisión de datos y el tipo de modulación. Los transceptores YS-1020UA tienen configurada la Modulación por Desplazamiento de Frecuencia Gaussiana (GFSK, *Gaussian Frequency Shift Keying*), una velocidad de transmisión de 9600 bps y un nivel de potencia de 10dBm.

## 2. MODULACIÓN Y CODIFICACIÓN

### 2.1 MODULACIÓN GFSK

La modulación GFSK se basa en la utilización de un filtro Gaussiano antes del modulador lo cual hace más suaves los cambios de frecuencia de la señal de radiofrecuencia. Esta es una de las formas estándar para reducir el espectro de frecuencias de la señal modulada, lo que permite disminuir su ancho de banda.

La modulación GFSK se realiza internamente en el RFIC y se utiliza además un Control de Frecuencia Automático (AFC, *Automatic Frequency Control*) para sintonizar el RFIC con una señal RF de referencia que permita mejorar y garantizar la exactitud y estabilidad en frecuencia [9]. Además, el transceptor YS-1020UA utiliza un Oscilador a Cristal Controlado por Voltaje y Compensado por Temperatura (VCTCXO, *Voltage-Controlled Temperature-Compensated Crystal Oscillator*).

### 2.2 CODIFICACIÓN MANCHESTER

El sistema utiliza la codificación Manchester para codificar los datos a nivel de banda base con el fin de ofrecer una mayor inmunidad al ruido en el sistema de comunicación. Esta codificación define los estados binarios "1" y "0" como transiciones en lugar de valores constantes: el "1" se representa como una transición de estado bajo a alto y el "0" como una transición de estado alto a bajo [10]. La figura 4 es un ejemplo de este tipo de codificación para una determinada señal de datos seriales.

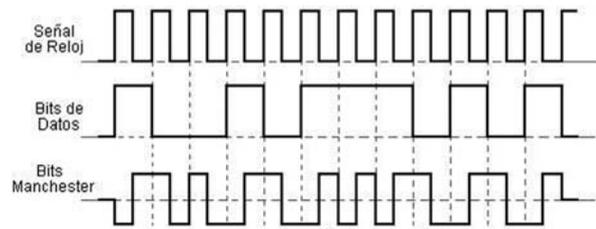


FIGURA 4. Codificación Manchester para una señal de datos

## 3. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN DE DATOS VÍA RADIO

La estructura del protocolo utilizado en el sistema y que corresponde al nivel de enlace de datos del modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open Systems Interconnection*), se basa en la trama de información de la figura 5.

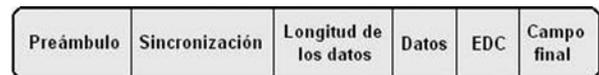


FIGURA 5. Trama De Información

El *Preámbulo* corresponde a un arreglo de 24 bits (1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0) que permite identificar en el receptor el inicio de cada trama de información además de estabilizar el receptor.

La *Sincronización* consta de un arreglo de 16 bits (1 1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1 0 0 0 1) que permiten realizar una adecuada sincronización de los bits entre transmisor y receptor con el fin de dar inicio a la transmisión de los datos.

La *Longitud de los Datos* corresponde a un campo de 10 bits que indica el número de bits del campo de datos que será enviado dentro de una trama de información, facilitando su reconocimiento en el receptor. El campo de *Datos* son los bits que contienen la información a enviar.

La *Detección y Corrección de Errores (EDC, Error Detection and Correction)* se implementa a través de dos codificaciones: Hamming y Verificación de Redundancia Cíclica (CRC, *Cyclic Redundancy Check*).

El *Campo Final* indica el final de cada trama de información y corresponde a una secuencia de unos con una longitud de 16 bits.

### 3.1 CODIFICACIÓN HAMMING

Es un código bloque lineal que utiliza un determinado número de bits de redundancia en algunas posiciones del bloque de datos a transmitir. Este tipo de codificación tiene la capacidad de corregir un solo error por cada bloque de datos. Se aplica principalmente en casos en los cuales ocurren errores aleatoriamente y no en ráfagas [11].

### 3.2 CODIFICACIÓN CRC ITU-T

Es un tipo de código cíclico que consiste en una división binaria cuyo residuo corresponde a un determinado número de bits redundantes que se agregan al final de los bits de datos. En la codificación CRC ITU-T el polinomio generador utilizado como divisor es de la forma  $X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$ .

Los datos codificados con CRC, que llegan al receptor, se procesan con el mismo método empleado por el transmisor. En caso de que no ocurra ningún error durante la transmisión, el resultado de esta división es exacto y el residuo es igual a cero; de no ser así, el residuo distinto de cero indica que ha ocurrido un error en la comunicación de los datos y es necesario volver a transmitir la trama de información que fue alterada.

## 4. PLAN DE PRUEBAS Y RESULTADOS

Las medidas que generalmente se realizan para sistemas de comunicación de datos vía radio corresponden a la potencia de transmisión, potencia de recepción, ancho de banda, frecuencia de operación, estabilidad en frecuencia y la medida de la BER de acuerdo a las condiciones de propagación (figura 6).



FIGURA 6. Diagrama general del plan de pruebas realizado en el sistema

### 4.1 MEDIDA DE LA POTENCIA DE TRANSMISIÓN

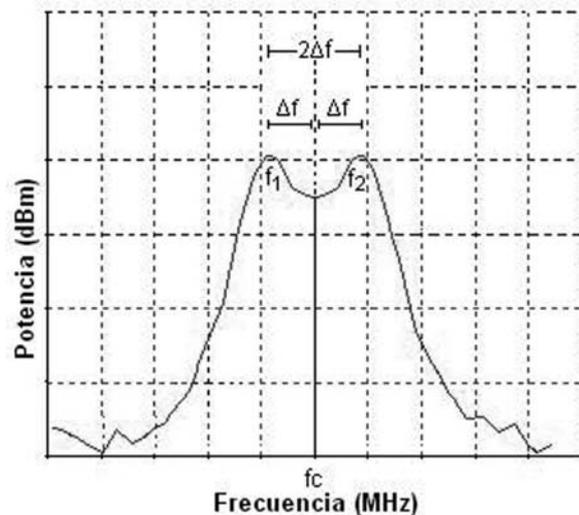
La medida de este parámetro se realizó haciendo uso del analizador de redes ZLV Rohde & Schwarz, el cual opera en el rango de frecuencias de 9 KHz a 6 GHz. Este equipo permitió obtener la potencia de señal transmitida durante un envío constante de información

y para esta medida fue necesaria la utilización de un sensor conectado entre el dispositivo inalámbrico y el analizador ZLV. La potencia de transmisión medida en los transceptores RF del sistema de comunicación fue de +10dBm.

### 4.2 MEDIDA DE LA FRECUENCIA DE OPERACIÓN

Teniendo en cuenta que los transceptores operan en un canal de frecuencia de 434,0325 MHz, es posible obtener la frecuencia central de la señal recibida y comprobar de esta manera si los RFIC se encuentran funcionando dentro de los valores de frecuencia especificados por [9]. Esta medida se obtiene del Analizador de redes ZLV Rohde & Schwarz, al cual se conecta directamente la antena del terminal receptor.

Teniendo en cuenta la modulación utilizada, se realizó un envío constante de unos y ceros con el fin de medir las frecuencias de marca y espacio respectivamente, las cuales representan los cambios de frecuencia de la señal modulada con GFSK. Estas frecuencias se distinguen a través de dos puntos máximos en el espectro de frecuencias de la señal, separados entre sí por un valor equivalente a  $2\Delta f$ , cuyo punto medio es igual a la frecuencia central de la señal recibida. Tanto la frecuencia de marca como la de espacio se encuentran separadas por  $\Delta f$  de la frecuencia central como se observa en la figura 7.



$$F_{\text{Espacio}} = f_1 = 434,02701 \text{ MHz}$$

$$F_{\text{Marca}} = f_2 = 434,03719 \text{ MHz}$$

FIGURA 7. Separación de frecuencias en la modulación GFSK

Separación entre las frecuencias de marca y espacio:

$$2\Delta f = f_2 - f_1 \quad (1)$$

$$2\Delta f = 434037,19\text{KHz} - 434027,01\text{KHz} = 10,18\text{KHz}$$

De este valor obtenido, cada frecuencia se encuentra separada  $\Delta f = 5,065$  KHz de la frecuencia central. La frecuencia central del canal se obtiene de la siguiente manera:

$$f_c = (f_1 + f_2)/2 \quad (2)$$

Reemplazando las frecuencias de marca y espacio se obtiene que  $f_c = 434,0321$  MHz.

El corrimiento de frecuencia de la señal recibida corresponde a la diferencia entre la frecuencia de la señal transmitida (434,0325 MHz) y recibida (434,0321 MHz). De esta manera, se presentó un corrimiento de frecuencia de -0,4KHz equivalente a -0,922 ppm.

Según [9] para una velocidad de 9600 bps, una canalización de 50 KHz y un ancho de banda por canal de 25,6 KHz, se establecen requerimientos de exactitud en frecuencia menores a  $\pm 4,95$  KHz, es decir,  $\pm 11,4$  ppm. De este modo se comprobó el correcto funcionamiento de los transceptores del sistema en lo relacionado a su exactitud en frecuencia.

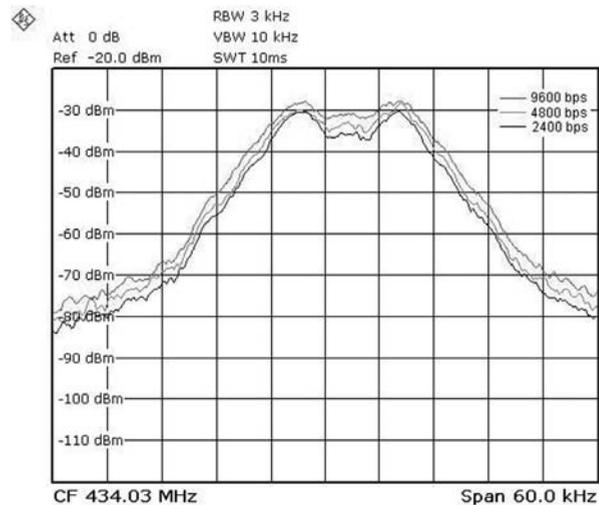
#### 4.3 MEDIDA DEL ANCHO DE BANDA DE LA SEÑAL

Este valor, en forma teórica, se puede determinar a partir de la regla de Carlson modificada para este tipo de sistemas, teniendo en cuenta las recomendaciones establecidas en [9]. De esta manera se plantea la ecuación:

$$BW = R + 2\Delta f \quad (3)$$

Donde  $R_b$  es igual a la velocidad de transmisión de datos programada en el RFIC CC1020 y  $2\Delta f$  equivale a la separación de las frecuencias de marca y espacio en la modulación GFSK que para todos los casos es de 10,18KHz.

Por otra parte, utilizando el analizador ZLV Rohde & Schwarz, se determinó el ancho de banda de la señal para velocidades de 9600 bps, 4800 bps y 2400 bps (figura 8).



**FIGURA 8.** Ancho de banda de la señal para 2400 bps, 4800 bps y 9600 bps.

Según la ecuación (3), el valor del ancho de banda obtenido para 9600bps, 4800bps y 2400bps es de 19,78KHz, 14,98KHz y 12,58KHz respectivamente.

El ancho de banda medido en el analizador de espectro ZLV fue de 22,994KHz, 21,437KHz y 20,599KHz para 9600bps, 4800bps y 2400bps respectivamente.

De acuerdo a los valores obtenidos se demuestra que cada vez que se disminuye la velocidad de transmisión de los datos, el ancho de banda ocupado por la señal es menor.

#### 4.4 MEDIDA DE LA BER DEL SISTEMA

La medida de la BER se realizó en el terminal receptor de acuerdo a la relación:

$$BER = \frac{\text{Número de bits errados}}{\text{Número de bits transmitidos}} \quad (4)$$

Esta medida permitió evaluar el desempeño del sistema implementado a partir de una relación  $E_b/N_0$ , en donde  $E_b$  corresponde a la energía de bit y  $N_0$  a la densidad de potencia del ruido a la salida del receptor.

A pesar de que el RFIC CC1020 realiza una lectura del nivel de potencia recibida, el transceptor inalámbrico YS-1020UA no entrega dicha lectura y no fue posible obtener el valor real de potencia recibida. Por tal motivo, se utilizaron valores teóricos y se debe aclarar

que los valores reales correspondientes a la relación  $E_b/N_0$  del sistema son menores con respecto a los establecidos teóricamente.

El cálculo de  $N_0$  se obtuvo al sumar la densidad de potencia de ruido teórica (-174 dBm/Hz) a la entrada del receptor con la figura de ruido de 7 dB en el receptor, obteniendo así un valor para  $N_0$  de -167dBm/Hz.

La energía de bit ( $E_b$ ) corresponde a la potencia de recepción del sistema ( $P_{Rx}$ ) dividida por la velocidad de transmisión de los datos ( $R_b$ ).  $P_{Rx}$  se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{Rx} [\text{dBm}] = P_{Tx} [\text{dBm}] + 2G_{Ant} - L_{fs} \quad (5)$$

Donde  $P_{Tx}$  es la potencia de transmisión del sistema,  $G_{Ant}$  es la ganancia de cada antena y  $L_{fs}$  corresponde a las pérdidas de espacio libre las cuales depende de la distancia y la frecuencia de operación del sistema (434,0325 MHz). De esta manera:

$$E_b [\text{dBm}] = P_{Rx} [\text{dBm}] - 10 \log(R_b) \quad (6)$$

Con los valores calculados se obtuvo la relación  $E_b/N_0$  para distancias de 5, 10, 15 y 20 metros:

$$E_b/N_0 [\text{dB}] = P_{Rx} - 10 \log(R_b) - N_0 \quad (7)$$

Se debe tener en cuenta que los valores obtenidos de forma teórica difieren de los valores reales, ya que para estos cálculos se utilizó el modelo de pérdidas de espacio libre, el cual es un modelo ideal que sólo depende de la frecuencia de operación y la distancia entre transmisor y receptor, y que por lo tanto considera la mínima pérdida de propagación. No se realizó una medida de potencia real dado que el kit de evaluación no entregaba el valor de la potencia recibida, el cual si podía ser entregado por el circuito integrado de radiofrecuencia.

Los escenarios utilizados para analizar el desempeño del sistema de comunicación corresponden a ambientes libres de obstáculos e interferencia, ambientes con obstáculos y ambientes con señales interferentes presentes en el medio.

#### 4.4.1 Ambientes Libres de Obstáculos e Interferencia

- Desempeño del sistema utilizando la codificación Hamming

Las medidas tomadas para distancias menores a 200 metros, enviando en cada prueba 34600 bits que se distribuyen en el campo de datos de cada trama de

información, arrojaron una BER igual a cero, es decir que no se producen errores debidos al medio de propagación. Sin embargo, para distancias mayores a 200 metros, se empezaron a presentar algunos errores durante la comunicación.

Con el fin de analizar adecuadamente el desempeño del sistema fue necesario disminuir el alcance de los dispositivos inalámbricos y por tal razón se incluyó un atenuador de 30 dB al sistema de comunicación de datos.

De acuerdo a la BER obtenida, se realizó el cálculo de la relación  $E_b/N_0$  con el fin de confrontar los resultados obtenidos con la teoría planteada al respecto. En este caso, para la obtención de la potencia de recepción, fue necesario agregar un factor de atenuación de 30dB a la ecuación (5):

$$P_{Rx} [\text{dBm}] = P_{Tx} + 2G_{Ant} - L_{fs} - 30\text{dB} \quad (8)$$

Las gráficas de BER vs  $E_b/N_0$  obtenidas para distancias de 5, 10, 15 y 20 metros, con 30 dB de atenuación, sin emplear ningún tipo de codificación a nivel de banda base y utilizando la codificación Hamming, se muestran en las figuras 9 y 10 respectivamente.

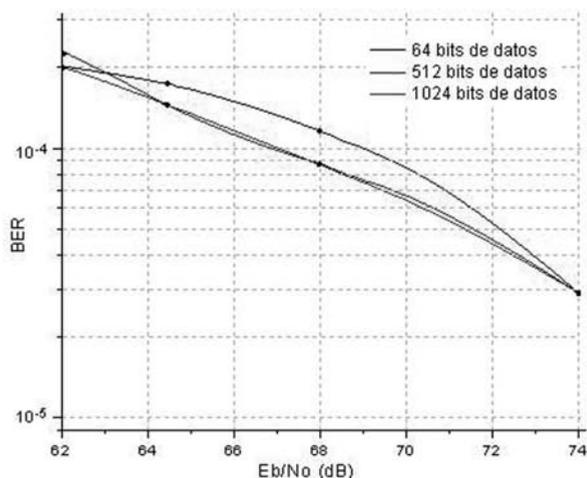
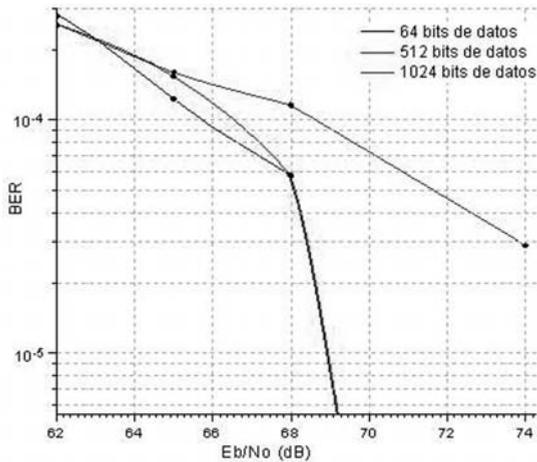


FIGURA 9. Comportamiento del sistema con 30dB de atenuación, para distancias entre 5 y 20 metros y sin codificación Hamming

En las figuras 9 y 10 las curvas corresponden al comportamiento del sistema para tramas con campos de datos de 64, 512 y 1024 bits. Teniendo en cuenta que los resultados obtenidos en la práctica para la relación  $E_b/N_0$

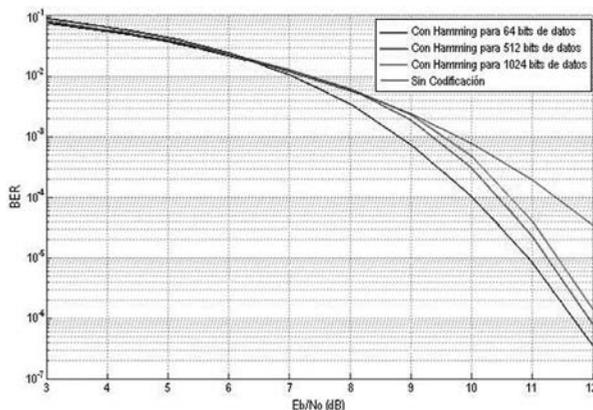
$N_0$  difieren de los establecidos teóricamente, se deduce que los niveles de potencia obtenidos en la práctica se encuentran aproximadamente entre 50dB y 60 dB por debajo de los valores teóricos y que como se ha expresado anteriormente los valores altos de la relación  $E_b/N_0$  son debidos al uso del modelo de pérdidas de espacio libre para determinar la potencia recibida.



**FIGURA 10.** Comportamiento del sistema con 30dB de atenuación, para distancias entre 5 y 20 metros con codificación Hamming

De acuerdo a las figuras 9 y 10, se comprobó que en todos los casos la BER del sistema se incrementó cada vez que se disminuye el nivel de potencia de la señal recibida debido a la distancia.

En la figura 11 se aprecian las curvas teóricas de BER vs  $E_b/N_0$  teniendo en cuenta la diferencia entre los valores de la relación  $E_b/N_0$  obtenidos teórica y prácticamente.

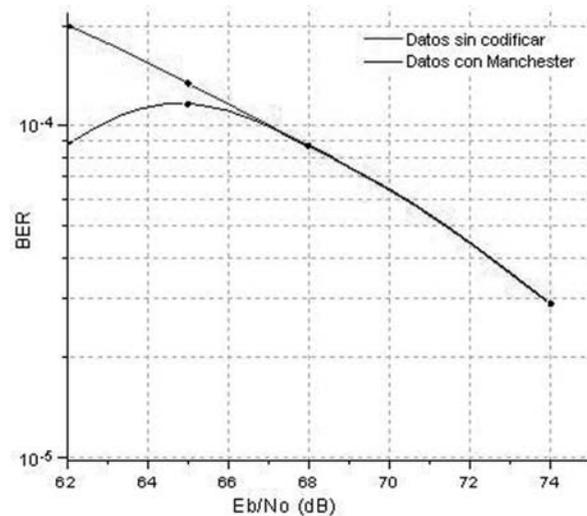


**FIGURA 11.** Relación  $E_b/N_0$  obtenida de forma teórica utilizando la codificación Hamming. [Fuente: Matlab 7.6.0.324 (R2008a)]

La utilización de la codificación Hamming introdujo una mejora en la comunicación para las distintas longitudes del bloque de datos establecido; al incrementarse la relación  $E_b/N_0$ , se disminuye la BER y mejora el desempeño del sistema de comunicación, principalmente para aquellos casos en donde se utilizan tramas con un bloque de datos de 64 bits y 512 bits. Sin embargo se debe tener en cuenta que los niveles de potencia manejados por el sistema no deben ser muy bajos.

- Desempeño del sistema utilizando la codificación Manchester

Esta codificación fue efectiva para niveles bajos de potencia, es decir, para una distancia de 20 metros e incluyendo 30 dB de atenuación a la comunicación de los datos. De este modo, en la figura 12 se detalla la gráfica de BER vs  $E_b/N_0$  para bloques de datos de 1024 bits haciendo uso de la codificación Manchester.



**FIGURA 12.** Comportamiento del sistema con 30dB de atenuación, para 20 metros de distancia y utilizando codificación Manchester

Se demostró que la codificación Manchester permite disminuir la BER del sistema cuando los niveles de potencia recibida son relativamente bajos, proporcionando a la señal de información una mayor inmunidad ante el ruido presente en el medio de propagación.

- Desempeño del sistema utilizando la codificación CRC ITU-T

Debido a que la codificación CRC es sólo una técnica de detección de errores, su evaluación se realizó de acuerdo a la FER del sistema, la cual se expresa en la ecuación:

$FER = \text{Tramas erradas} / \text{ramas transmitidas} \quad (9)$

De este modo, se enviaron 300 tramas de información por cada longitud del campo de datos establecido en el protocolo de comunicaciones, con una atenuación de 30 dB y a una distancia de 20 metros. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 8.

**TABLA 8. Medida de la FER para 20 metros de distancia y con 30 dB de atenuación**

| Bits por trama | Tramas erradas | Tramas enviadas | FER (%) |
|----------------|----------------|-----------------|---------|
| 64 bits        | 27             | 300             | 9       |
| 512 bits       | 31             | 300             | 10,33   |
| 1024 bits      | 40             | 300             | 13,33   |

Utilizando la codificación CRC ITU-T para campos de datos 64 bits, 512 bits y 1024 bits, la FER del sistema toma un valor cercano al 10%, lo cual indica que aproximadamente el 90% de la información se validó en el receptor. Esta medida es ligeramente más alta cuando se utilizan tramas de 1024 bits de información, ya que la longitud del bloque de datos es la de mayor tamaño y tienen una mayor probabilidad de presentar error.

#### 4.4.2 Ambientes con Obstáculos

La señal de información también se ve afectada por obstáculos presentes en el medio de propagación, tales como árboles y muros pequeños, los cuales generan atenuación e incrementan la BER del sistema.

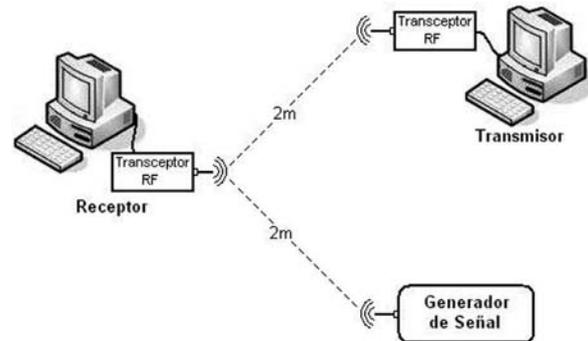
Con la utilización de la codificación Hamming se verificó que el sistema tiene la capacidad de corregir los errores presentes en la información enviada, disminuyendo la BER del sistema. Sin embargo, en aquellas tramas con 1024 bits de datos no es conveniente utilizar Hamming, ya que este tipo de tramas pueden presentar más de un solo error en el bloque de datos, incrementando la BER y disminuyendo de esta manera el desempeño del sistema.

#### 4.4.3 Ambientes con Interferencia

En el medio pueden existir señales no deseadas operando bajo el mismo rango de frecuencia y con suficiente potencia para afectar la señal transmitida, bloqueando el terminal transmisor del sistema de comunicación.

La generación de la señal interferente se realizó utilizando un generador de señal Hewlett Packard 8656B. El generador se ubicó aproximadamente a 2

metros de distancia del receptor, del mismo modo en que se encontraba el transmisor del sistema (figura 13), con el fin de predecir el nivel de potencia de la señal interferente a partir de la cual se empiezan a producir errores durante el proceso de comunicación.



**FIGURA 13.** Diagrama de conexión utilizando una señal interferente.

Se comprobó que para potencias mayores a +5,6dBm, la señal interferente bloquea el receptor. Esto permitió comprobar el *efecto captura* producido en el receptor, que, ante la presencia de diferentes señales moduladas en frecuencia, opera en el mismo rango de frecuencias, descarta las más débiles y captura la señal más potente. Generalmente, una señal modulada en frecuencia se ve afectada por otra cuando la diferencia de potencia es menor a 4 dB (zona equisignal).

Bajo los efectos de una señal interferente con una potencia de +5,6dBm, la comunicación presentó algunos errores.

Para señales con niveles de potencia menores a +5,6 dBm no se presentó ningún tipo de alteración en la señal recibida, ya que estas señales interferentes son de bajo nivel de potencia con respecto a la potencia de transmisión de la señal deseada y debido al efecto captura producido en el receptor, siempre que la señal deseada sea considerablemente más fuerte que la interferencia, se detecta apropiadamente la señal de información para llevar a cabo la comunicación entre los dos terminales.

## 5. CONCLUSIONES

Los transceptores YS-1020UA utilizados en el sistema manejan una potencia de transmisión +10dBm y a una velocidad de 9600 bps presentan un desplazamiento de frecuencia respecto a la frecuencia central del canal de -0,4 KHz, es decir, -0,922 ppm, cumpliendo con las características brindadas por el fabricante acordes a la operación de este tipo de dispositivos.

El sistema de comunicación implementado utiliza una modulación GFSK que reduce el ancho de banda de la señal a través de un filtro gaussiano. El ancho de banda de la señal también se reduce con la disminución de la velocidad de transmisión de datos.

La codificación Manchester proporciona a la señal de información una mayor inmunidad ante ruido e interferencia, principalmente para aquellos casos en los cuales el sistema manejaba niveles bajos de potencia.

Ante la aparición de algunos errores durante la comunicación fue posible comprobar el mejoramiento de la BER del sistema, haciendo uso de la codificación Hamming, principalmente en tramas de información con campos de datos pequeños.

La codificación CRC se utilizó para la validación de las tramas recibidas, brindando la posibilidad de verificar, de forma sencilla, la existencia de errores en cada uno de los bloques de datos que llegan al receptor.

La presencia de ruido e interferencia en el canal se ve reflejada en el incremento de la BER del sistema de comunicación.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Leenaerts Domine, Tang Johan van der y Vaucher Cicero S. *Circuit Design for RF Transceivers*. (Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001), pp. xv, 43.
- [2] Gerrits John. *Practical Harmonic Oscillator Design. Lowpower Design Techniques and CAD Tools for Analog and RF Integrated Circuits*. (2001). Disponible: <http://www.rfsilicon.com/home/circuits/rfcircuitsblocks/vcos/esdbook12.pdf> Consultado: Octubre 26, 2008.
- [3] Lalchand Khemchandani D. Sunil. *Diseño de Circuitos Integrados de RF para un Receptor WLAN en la Banda de 5 GHz Sobre una Tecnología de Silicio de Bajo Coste*. Tesis doctoral. (Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2007). Disponible: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaites?codigo=1466>. Consultado: Noviembre 18, 2008.
- [4] Texas Instruments. *TLC2932 Phase-Locked-Loop Building Block with Analog Voltage-Controlled Oscillator and Phase Frequency Detector*. Application Report. (1997). Disponible: <http://focus.ti.com/lit/an/slaa011b/slaa011b.pdf>. Consultado: Octubre 26, 2008.
- [5] Weldon Jeffrey Arthur. *High Performance CMOS Transmitters for Wireless Communications*. Tesis doctoral. Engineering-Electrical Engineering and Computer Sciences (University of California at Berkeley, 2005). Disponible: [http://kabuki.eecs.berkeley.edu/~weldon/thesis/thesis\\_weldon.pdf](http://kabuki.eecs.berkeley.edu/~weldon/thesis/thesis_weldon.pdf). Consultado: Noviembre 22, 2008.
- [6] Tsai King Chun. *CMOS Power Amplifiers for Wireless Communications*. Tesis doctoral. Electrical Engineering and Computer Sciences (University of California at Berkeley, 2007). Disponible: <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2007/EECS-2007-161.pdf>. Consultado: Noviembre 27, 2008.
- [7] Santa Cruz Oscar M. *Transmisores de Radio – Amplificadores de Potencia*. *Electrónica aplicada*. (2008). Disponible: <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaI11/Aplicada/Cap10Transmisores.pdf>. Consultado: Noviembre 27, 2008.
- [8] National Semiconductor. *Integrated LNA and Mixer Basics*. Application Note 884 (1993). Disponible: <http://www.circuitsage.com/lnapa/motlnamix.pdf>. Consultado: Diciembre 1, 2008.
- [9] Texas Instruments. *CC1020 Single Chip Low Power RF Transceiver for Narrowband Systems*. Datasheet. (2008). Disponible: [http://www.aye-tech.com.cn/aye/DATA/RF/CC1020\\_Data\\_Sheet\\_1\\_8.pdf](http://www.aye-tech.com.cn/aye/DATA/RF/CC1020_Data_Sheet_1_8.pdf). Consultado: Abril 5, 2009.
- [10] Maxim. *Manchester Data Encoding for Radio Communications*. Application Note 3435. (2005). Disponible: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3435.pdf>. Consultado: Febrero 1, 2009.
- [11] Wagner Neal R. *The Laws of Cryptography: The Hamming Code for Error Correction*. (2002). Disponible: <http://www.cs.utsa.edu/~wagner/laws/hamming.html>. Consultado: Marzo 5, 2009.