

# Sistema de transmisión de información sobre FPGA`s mediante la modulación spread spectrum

## Information Transmission System on FPGA`s Trough Spread Spectrum Modulation

John Alexis Colorado A<sup>1</sup>., Alberto Luis Ramirez H<sup>2</sup>., Edwin Andrés Quintero Salazar<sup>3</sup>

Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

johncolorado1@hotmail.com

alluramirez@hotmail.com

equintero@utp.edu.co

**Resumen**— En este documento se presentan la implementación y el desarrollo de dos algoritmos diseñados para la transmisión de datos mediante la modulación *Spread Spectrum* en secuencia directa usando *FPGA`s* en el emisor y en el receptor. Además de lo anterior, también se exponen los resultados obtenidos al transmitir una onda cuadrada, visualizando su espectro y comparando las señales de entrada y salida.

**Palabras clave**— Canal de transmisión, espectro, modulación, demodulación, secuencia pseudo-aleatoria, ruido, potencia, sincronización, bit.

**Abstract**— This paper presents the implementation and development of two algorithms designed for data transmission by modulating Direct Sequence Spread Spectrum using *FPGA`s* in the transmitter and receiver. Besides the above, also presents the results obtained by delivering a square wave, displaying its spectrum and comparing the input and output signals.

**Key Word** —Transmission channel, spectrum, modulation, demodulation, pseudo-random sequence, noise, power, synchronization, bit.

### I. INTRODUCCIÓN

Dada la creciente evolución de la electrónica, y en específico del campo enfatizado en esta investigación, las telecomunicaciones, es importante que la formación de ingenieros electrónicos se encuentre en un proceso de constante actualización, con miras hacia el desarrollo de nuevas tecnologías, en este caso la del espectro expandido o *Spread Spectrum*. En sus inicios, *Spread Spectrum* era

una tecnología que por su complejidad y altos costos solo encontraba aplicación en proyectos militares, siendo difícil acceder a ella para fines comerciales. La integración a gran escala de circuitos digitales permitió colocar el costo de la tecnología de *Spread Spectrum* en un nivel realista para desarrollar aplicaciones comerciales.

En este proyecto se hace uso de la técnica antes mencionada para implementarla en una tarjeta de desarrollo de gran auge comercial, la *FPGA*, ya que por su naturaleza y funcionamiento es la ideal para emular circuitos físicos tales como compuertas lógicas, multiplexores, moduladores y demoduladores, etc. La finalidad de este proyecto es desarrollar un sistema de comunicación aplicando los principios de la modulación *Spread Spectrum* para así comprobar y verificar su correcto desempeño sobre un dispositivo de hardware reconfigurable (*FPGA*). Dicha comunicación entre modulador y demodulador se realiza mediante un par de cobre, con lo cual es posible determinar la viabilidad de utilizar dicho principio en el intercambio de información.

### II. MODULACION SPREAD SPREACTRUM

Un atributo importante de la modulación *Spread Spectrum* es que ésta puede ofrecer protección contra señales de interferencia (*jamming*) con potencia finita generadas externamente. La señal *jamming* puede consistir en ruido de banda ancha bastante potente, o en una forma de onda multitonos que se dirige al receptor con el fin de interrumpir las comunicaciones. La protección contra formas de onda perturbadoras se obtiene al hacer intencionalmente que la señal que contiene la información ocupe un ancho de banda bastante mayor que el mínimo necesario para transmitirla. Esto tiene el efecto de provocar que la señal transmitida asuma una apariencia similar al ruido, de manera que se mezcle con el ruido de fondo. De esa manera se permite que la señal transmitida se propague por el canal sin que

<sup>1</sup> Ingeniero Electrónico

Fecha de Recepción: 12 de Mayo de 2011  
Fecha de Aceptación: 26 de Diciembre de 2011

<sup>2</sup> Ingeniero Electrónico

<sup>3</sup> Ingeniero Electrónico, Especialista en Pedagogía, Magíster en Instrumentación Física, Grupo de Investigación en Astronomía Alfa Orión

la detecte alguien que quizás se encuentre escuchando. Por lo tanto, es posible pensar en *Spread Spectrum* como un método de “camuflaje” de la señal que contiene la información [1].

La principal ventaja del sistema de comunicación de *Spread Spectrum* es su capacidad para resistir a las interferencias, ya sean las interferencias no intencionales generadas por otro usuario que trata al mismo tiempo de transmitir a través del canal, o una interferencia intencional o “*jamming*” dirigida directamente al receptor para sabotear la comunicación. La modulación *Spread Spectrum* se puede definir en dos partes:

- A. *Spread Spectrum* es una técnica de comunicación en la que la secuencia de datos ocupa un ancho de banda por encima del ancho de banda mínimo necesario para enviarlo.
- B. La modulación se lleva a cabo antes de la transmisión a través de la utilización de un código que es independiente de la secuencia de datos. El mismo código se utiliza en el receptor (que opera en sincronismo con el transmisor) para demodular la señal en el receptor de manera que la secuencia de datos original puede ser recuperada [1].

#### A. SPREAD SPREACTRUM CON SALTOS DE FRECUENCIA (*FHSS*)

En un sistema *FHSS*, un transmisor da “saltos” entre las frecuencias disponibles (figura 1) de acuerdo a un algoritmo determinado, que puede ser aleatorio o pre-planeado. El transmisor funciona en sincronización con un receptor, que sigue siendo sintonizado en el mismo centro de frecuencia que el transmisor. Una breve ráfaga de datos se transmite en una banda estrecha.

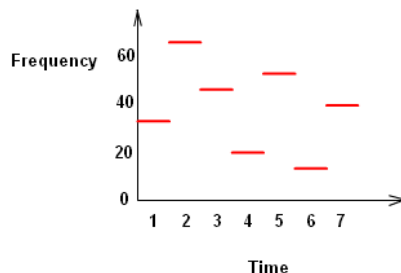


Figura 1. Canales de transmisión en *FHSS* utilizados en diferentes intervalos de tiempo [2].

#### B. SPREAD SPREACTRUM EN SECUENCIA DIRECTA *DSSS*

Esta técnica consiste en la generación de un patrón de *bits* redundante llamado *señal de chip* para cada uno de los *bits* que componen la señal de información y la posterior modulación de la señal resultante. Entre mayor sea esta

señal, mayor será la resistencia de la señal a las interferencias. El estándar *IEEE 802.11* recomienda un tamaño de *11 bits*, pero el óptimo es de *100* [3]. En recepción es necesario realizar el proceso inverso para obtener la señal de información original. La secuencia de *bits* utilizada para modular cada uno de los *bits* de información es la llamada secuencia *pseudo-aleatoria* o código de dispersión [3].

El bloque básico de construcción del transmisor de *Spread Spectrum* en *Secuencia Directa (DSSS)* se muestra en la figura 2. El dato a transmitir es multiplicado con la secuencia pseudo-aleatoria (*PN*) para generar el dato “ensanchado”. Los datos son convertidos a la forma analógica y son transmitidos después de la modulación [4].

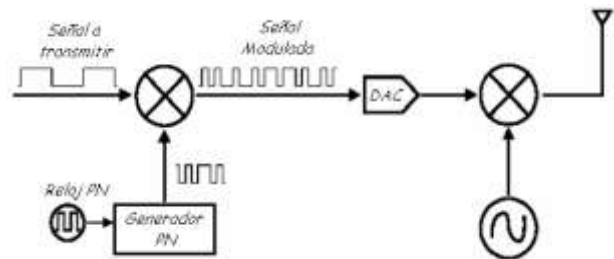


Figura 2. Transmisor *DSSS* básico [4].

El bloque básico de construcción del receptor se muestra en la figura 3. La señal recibida se multiplica por una réplica local de la secuencia *PN* del transmisor para “desensanchar” la señal original. El oscilador local en el receptor se supone que está en sincronización con el oscilador en el transmisor.

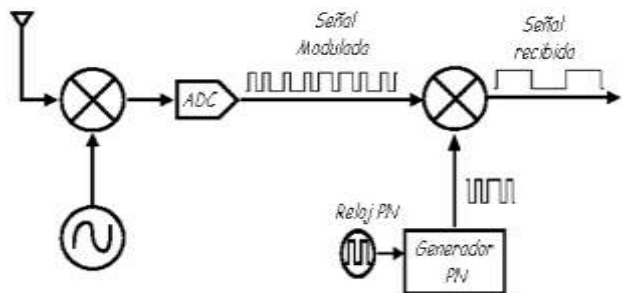


Figura 3. Receptor *DSSS* básico [4].

### III. DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN SOBRE *FPGA*

El diseño de este sistema de comunicaciones fue desarrollado e implementado en una *FPGA Spartan 3E*, programando los respectivos algoritmos usando el lenguaje *VHDL* y con la ayuda del compilador *Xilinx ISE 9.2i*. Además de esto, se usó un amplificador operacional con un ancho de banda elevado (*OPA860*) para equilibrar las impedancias de las *FPGA*'s. El algoritmo general de diseño es el siguiente:

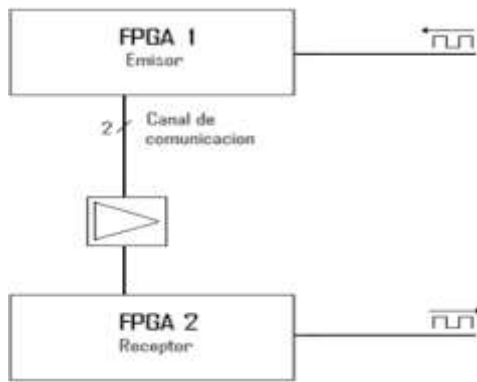


Figura 4. Diseño sistema de comunicación.

Inicialmente se realiza la conexión directa del generador de señales a la FPGA para obtener la señal cuadrada, esta es la señal de entrada en la FPGA 1 (Emisor) para su posterior tratamiento, haciendo la modulación mediante la técnica *Spread Spectrum* en secuencia directa. A continuación, los datos debidamente modulados se envían a la FPGA 2 (Receptor) por par de cobre, en el cual se demodula la información con la misma técnica, obteniendo de esta manera los datos inicialmente capturados, finalizando así efectivamente el proceso de comunicación. (Figura 4).

Dado que se busca que entre emisor y receptor exista máxima transferencia de potencia, se busca acoplar inicialmente las impedancias en la entrada y la salida del canal. Un amplificador operacional (Op.-Amp.) ideal debe tener una impedancia de entrada infinita y una impedancia de salida nula, por eso se recomienda usar un amplificador operacional en esta conexión, porque para el emisor el Op-Amp refleja una impedancia tendiendo a infinito y para el receptor una nula. Además de lo anterior, fue necesario que el amplificador operacional tenga un ancho de banda elevado, ya que una de las características de *Spread Spectrum* es incrementar el ancho de banda de la señal para su posterior envío. Estas características se encuentran en el OPA860, el cual tiene un *Buffer* con ancho de banda aproximado de 1600 MHz.

### A. DISEÑO DEL EMISOR

El proceso de modulación en *Spread Spectrum* es relativamente sencillo. Consiste en hacer una operación lógica XOR de cada bit de datos con una secuencia pseudo-aleatoria conocida como código *Barker* de 11 bits, la cual cumple con las siguientes propiedades:

- 1. Propiedad de balance:** en cada periodo del código, el número de 1's es siempre uno más que el número de 0's.
- 2. Propiedad Run:** Un *Run* está definido como una secuencia consecutiva de 1's y 0's. En una secuencia pseudo aleatoria, la mitad de los *Runs* tiene longitud 1. El total de los *Runs* de una secuencia pseudo aleatoria es [5]:

$$R = (N + 1)/2 \quad (1)$$

Donde *R* es la cantidad total de *Runs* de la secuencia pseudo aleatoria y *N* es el número de bits.

**3. Propiedad de correlación:** La función de auto correlación de una secuencia pseudo-aleatoria debe ser periódica y de valor binario.

Para realizar el envío de la información ya modulada se hace uso de la lógica de sincronización de *bit* de arranque y *bit* de parada. Dicho *bit* tiene un cuarto del tiempo de duración de un *bit* del código pseudo-aleatorio.

Con base en las propiedades del código *Barker* se escogió el siguiente código: 10110111000. En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo del emisor.

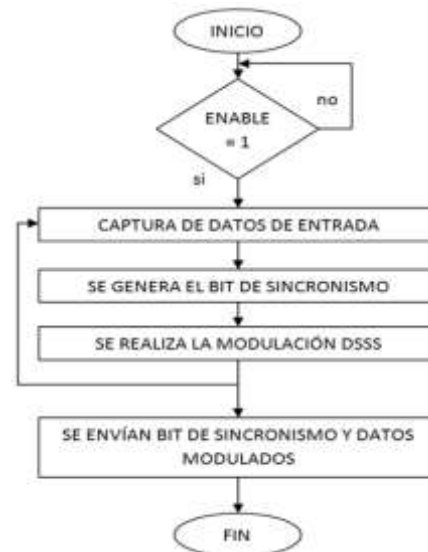


Figura 5. Diagrama de flujo Emisor.

### B. DISEÑO DEL RECEPTOR

El proceso de demodulación en el receptor es el mismo proceso que se hace en el emisor cuando se modula la información. Basta con recoger los *bits* entrantes y hacer la misma operación lógica XOR con cada *bit* y la secuencia pseudo-aleatoria. Cabe mencionar que el emisor y el receptor deben tener la misma secuencia pseudo-aleatoria para que se lleve a cabo correctamente la comunicación entre ellos (10110111000).

En la figura 6 se observa la lógica utilizada en el bloque del receptor mediante un diagrama de flujo.



Figura 6. Diagrama de flujo Receptor.

### C. SINCRONIZACIÓN

Una de las problemáticas más grandes que se tienen en el área de comunicaciones es la sincronización entre emisor y receptor, dado que cuando no hay una correcta sincronización en los datos enviados, el receptor los interpreta de manera errónea, con lo cual el proceso de comunicación puede verse afectado, ya que las tramas se demodulan sin tener un orden o sin saber que *bit* es el que debe ser procesado inicialmente, generando de esta manera datos inconsistentes y provocando el fallo en el sistema. Para solucionar este problema y hacer que los datos enviados por el emisor se entendieran de manera ordenada por el receptor y lograr que el mismo entendiera en qué momento debía empezar con la demodulación, se agregó un *bit* de sincronismo el cual tiene una duración de  $1/4$  de un *bit* de la pseudo-aleatoria (figura 7).



Figura 7. A. señal de reloj B. secuencia pseudo-aleatoria con *bit* de sincronismo ( $t = 1/4$ ).

### IV. RESULTADOS

El objetivo general de este proyecto fue el diseño de un sistema de comunicaciones usando la modulación *Spread Spectrum* en secuencia directa sobre *FPGA*. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Se logró la transmisión de una onda cuadrada a una frecuencia máxima de  $90 \text{ KHz}$ . Se realizaron pruebas en dos etapas las cuales difieren entre sí en el tipo de cable por

el cual se hace la comunicación. La etapa 1 es con cable *UTP* de  $20 \text{ cm}$ , y la segunda etapa es con par de cobre de  $3 \text{ m}$ ; iniciando por  $1 \text{ KHz}$  como frecuencia mínima hasta llegar al límite. A continuación los resultados de las pruebas con el cable *UTP* de  $20 \text{ cm}$ .

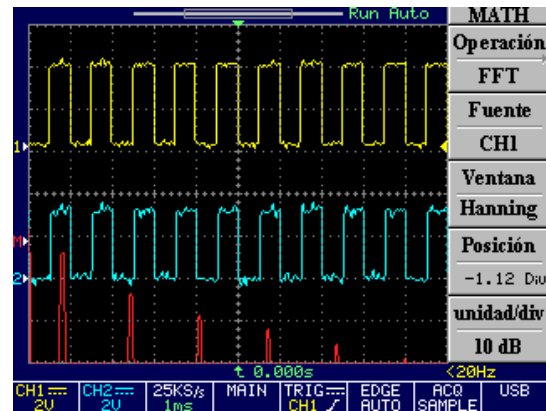


Figura 8. Señal cuadrada de entrada (amarilla) y de salida (azul), con espectro de entrada (rojo), y con una frecuencia de  $1 \text{ KHz}$ .

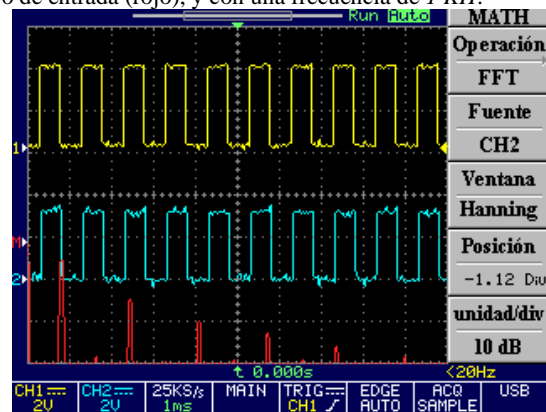


Figura 9. Señal cuadrada de entrada (amarillo) y de salida (azul), con espectro de salida (rojo), y con una frecuencia de  $1 \text{ KHz}$ .

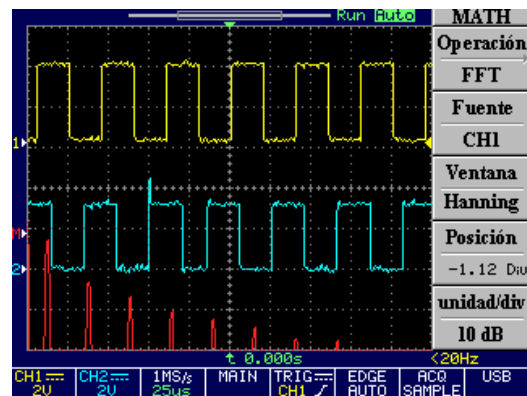


Figura 10. Señal cuadrada de entrada (amarillo) y de salida (azul), con espectro de entrada (rojo), y con una frecuencia de  $25 \text{ KHz}$ .

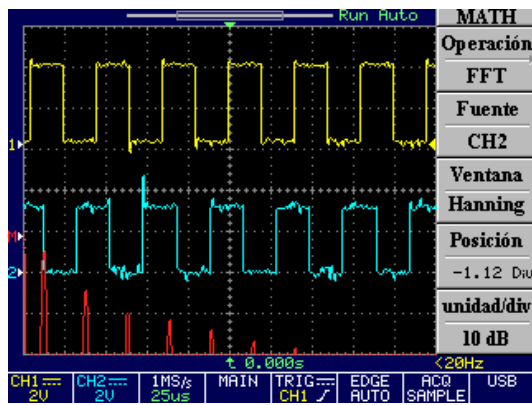


Figura 11. Señal cuadrada de entrada (amarillo) y de salida (azul), con espectro de salida (rojo), y con una frecuencia de 25 KHz.

Como se observa en las figuras 8, 9, 10 y 11, los espectros de las señales de entrada y salida son iguales. Tan solo a partir de los 60 KHz (figuras 12 y 13) se comienzan a notar diferencias entre ambos espectros, observándose así algunos bits con un periodo que duplica el presentado por los bits originales, y con un espectro de salida que difiere bastante del correspondiente a la señal de entrada.

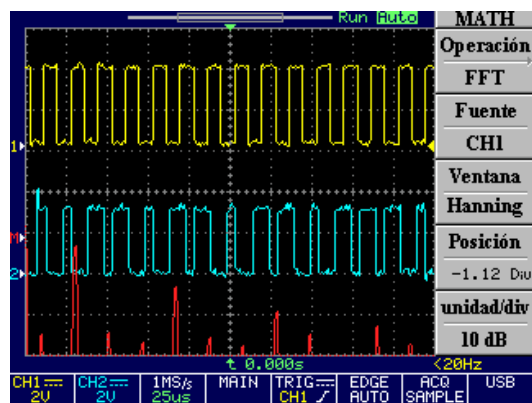


Figura 12. Señal cuadrada de entrada (amarillo) y de salida (azul), con espectro de entrada (rojo), y con una frecuencia de 60 KHz.

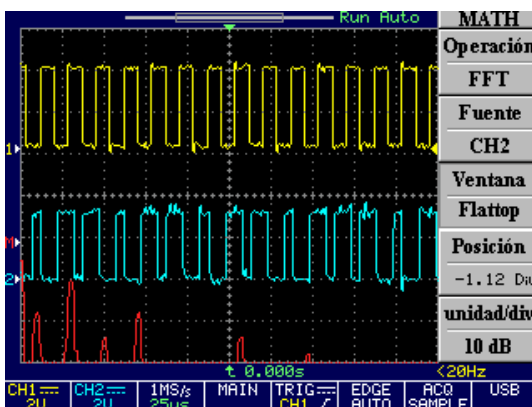


Figura 13. Señal cuadrada de entrada (amarillo) y de salida (azul), con espectro de salida (rojo), y con una frecuencia de 60 KHz.

La tabla 1 se elaboró mediante la medición con el osciloscopio de los espectros de las señales de entrada y salida. Los resultados son coherentes con las observaciones de las señales, notando que a partir de 25 KHz se comienza a presentar una atenuación de 2 dB o más, teniendo en cuenta que a los 3 dB se pierde el 50 % de la potencia de la señal de entrada.

Frecuencias	Potencia señal de entrada en dB	Potencia señal de salida en dB	Diferencia dB
1Khz	27.12	25.62	1.5
5Khz	27.12	26.62	0.5
10Khz	27.12	25.62	1.5
15Khz	27.62	26.62	1
20Khz	28.12	26.62	1.5
25Khz	28.62	26.12	2.5
40Khz	27.12	25.12	2
45Khz	28.12	26.12	2
50Khz	28.12	26.62	1.5
55Khz	28.12	25.62	2.5
60Khz	28.12	21.12	7

Tabla 1. Relación en dB de las potencias de entrada y salida con cable UTP de 20 cm.

Las siguientes figuras (14 a 17) representan la etapa 2 (proceso de comunicación conectado con par de cobre de 3 m).

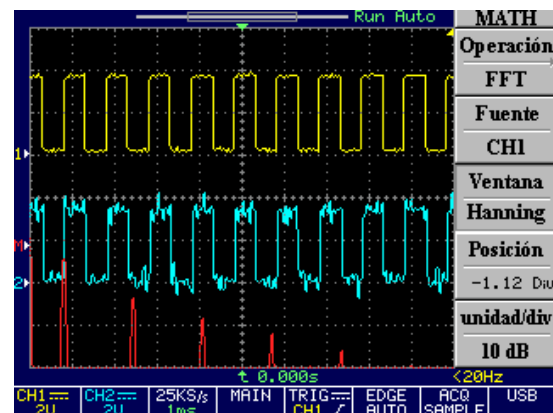


Figura 14. Señal cuadrada de entrada (amarillo) y de salida (azul), con espectro de entrada (rojo), y con una frecuencia de 1 KHz.

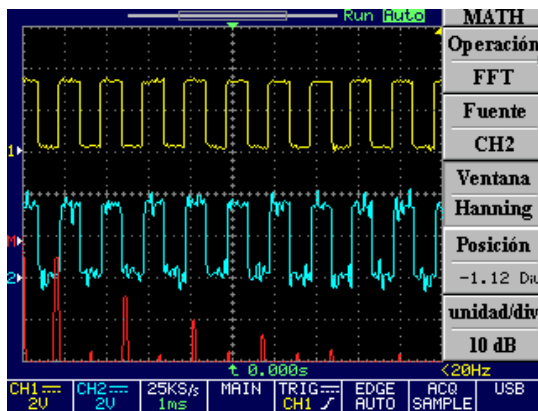


Figura 15. Señal cuadrada de entrada (amarillo) y de salida (azul), con espectro de salida (rojo), y con una frecuencia de 1 KHz.

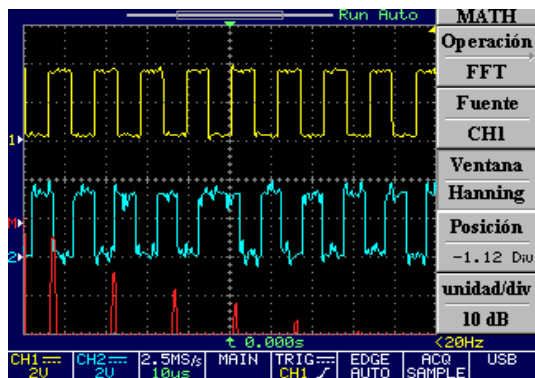


Figura 16. Señal cuadrada de entrada (amarillo) y de salida (azul), con espectro de entrada (rojo), y con una frecuencia de 90 KHz.

En la tabla 2 se puede apreciar como el ruido generado por el cambio del cable del canal de comunicaciones afecta la señal de salida aumentando la amplitud de las frecuencias fundamentales. En los 90 KHz se alcanza apenas a tomar una muestra por *bit* generando una pérdida de datos, lo cual se puede ver en la tabla 2, en donde la atenuación a esta frecuencia es de 3.5 dB dando como pérdida más del 50% de la potencia de entrada.

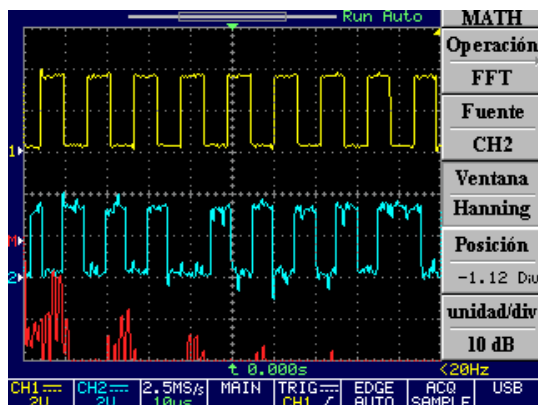


Figura 17. Señal cuadrada de entrada (amarillo) y de salida (azul), con espectro de salida (rojo), y con una frecuencia de 90 KHz.

Frecuencias	Potencia señal de entrada en dB	Potencia señal de salida en dB	Atenuación dB
1KHz	26.62	26.12	0.5
5KHz	26.12	26.12	0
10KHz	25.12	26.12	- 1
15KHz	25.12	26.12	- 1
20KHz	26.12	26.12	0
25KHz	25.62	27.12	- 1.5
30KHz	25.62	26.62	- 1
50KHz	27.12	26.62	0.5
60KHz	26.62	25.12	1.5
90KHz	26.62	22.12	3.5

Tabla 2. Relación en dB de las potencias de entrada y salida con par de cobre de 3 m.

## V. CONCLUSIONES

- ✓ Uno de los efectos secundarios de este sistema es el incremento en el ancho de banda en el proceso de transmisión, dado que al realizar la modulación *Spread Spectrum* en secuencia directa se multiplica cada *bit* de datos por una secuencia pseudo-aleatoria, incrementando el tamaño de cada *bit* de datos.
- ✓ Al interceptar una señal modulada con *Spread Spectrum* sin conocer la secuencia pseudo-aleatoria (*PN*) con la que fue modulada, se obtiene una señal de ruido pseudo-aleatorio irreconocible, por lo cual es importante que el receptor esté debidamente sincronizado y conozca perfectamente la secuencia *PN* para que la comunicación tenga éxito. Se concluye entonces que sin importar la modalidad del *Spread Spectrum* el directamente responsable del funcionamiento de un sistema de comunicaciones con esta técnica es la secuencia *PN*. Por lo anteriormente mencionado, se puede garantizar la seguridad en los datos cifrados de esta manera, ya que el sistema es inmune a interferencias intencionadas, pues la correcta recepción de los datos solo puede realizarse por un receptor autorizado.
- ✓ Al hacer una comparación de los resultados obtenidos cuando se cambia el tipo de cable con el que se conectan emisor y receptor, se hace notorio un efecto producido por este cambio, y es que con el par de cobre se añade ruido a la salida, efecto perfectamente observable al comparar las figuras 8 y 14, las cuales representan la señal de entrada, salida y espectro de salida a una frecuencia de 1KHz, apreciando en la señal de salida (señal en color azul de la figura 14) un ruido añadido. Aún así, con la adición de ruido, se sigue manteniendo la coherencia en la comunicación.

## REFERENCIAS

- [1]. HAYKIN, Simon. Communication Systems. 4th Edition. John Wiley & sons, Inc. 2001. ISBN 0-471-17869-1
- [2]. [2] DIGITAL MODULATION TECHNIQUES. Frequency Hopping Spread Spectrum <<http://digitalmodulation.net/fhss2.html>> [citado el 5 de Mayo de 2010]
- [3]. [Documento Informativo, Capitulo 1[en línea] <<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/83/1/CD-0055.pdf>> [Citado el 18 de Enero de 2011]
- [4]. RAJAGOPAL, HARISH. NAWANI, VARUN. Design of Optimized Engine for Direct Sequence Spread Spectrum Transceiver. Project Report Año 2004.
- [5]. B. Sklar, *Digital Communication:s Fundamentals and Applications*, Prentce Hall PTR, II Edición, New Jersey, 2000.