

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE, PARA EL EJÉRCITO ECUATORIANO, MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UNA TARJETA USRP Y LA HERRAMIENTA SIMULINK® DE MATLAB®

Hugo A. Angulo¹, Capt. Manolo Paredes²

Departamento de Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército
Sangolquí, Ecuador

¹haangulo@espe.edu.ec

²dmparedes@espe.edu.ec

Abstract— This research presents a design of software defined radio using the USRP and Simulink® software of Matlab®. Based on voice digitization, was considered necessary to implement the codec G.726 of the ITU, in the 32Kbps version, to perform the respective comparison with G.711 codec of 64 Kbps, which was developed as a blockset inside of Simulink®. To provide sturdiness to the system, took advantage of appropriate channel coding. This we achieved through the use of block codes and interlaced or Trellis, such as convolutional codes. Finally both systems are proposed with QPSK modulation and frequency modulation, with the hope of providing a significant contribution and comparative development of SDR systems, through the assessment by the BER.

Resumen— La presente investigación presenta el diseño de un radio definido por software mediante el uso de la USRP y el software Simulink® de Matlab®. A partir de la digitalización de la voz, fue considerada necesaria la implementación del códec G.726 de la ITU, en la versión de 32Kbps, a fin de realizar la respectiva comparación con el códec G.711 de 64Kbps, ya desarrollado como bloque dentro de Simulink®. A fin de proveer de robustez al sistema, se aprovechó la codificación de canal adecuada. Esto se lo consigue mediante el uso de los códigos de bloque y entrelazados o Trellis, como es el código Convolutacional. Finalmente se propone ambos sistemas en modulación QPSK y en modulación en frecuencia, con la aspiración de proveer un aporte significativo y comparativo en el desarrollo de los sistemas SDR, mediante la valoración por medio del BER.

Palabras clave— USRP, SDR, G.726, QPSK, BER.

I. INTRODUCCIÓN

Debido al continuo avance en el área de las telecomunicaciones, con el fin de proveer a los usuarios una mayor calidad en los servicios a la vez mayor confiabilidad, surgen los sistemas de comunicación digital en donde todo el tratamiento de las señales se simplifica al campo de los dígitos binarios.

Es así como al proveer el servicio de comunicación a través de un sistema digital, surgen los inconvenientes, tales como el tamaño de la infraestructura, basada principalmente en las dimensiones de los dispositivos utilizados para hacer efectivo dicho fin, el de la comunicación.

Sin embargo, durante los últimos 20 años, y debido a la ley de Moore que manifiesta que cada 2 años el número de transistores al interior de un circuito integrado, dedicado a realizar una o varias tareas, se duplica, han hecho posible que las dimensiones de los dispositivos usados para los enlaces entre un punto y otro, sean cada vez más pequeños y a la vez menos costoso. Pero no todo son buenas

noticias. A pesar de lo citado, aún se siguen utilizando dispositivos rígidos que no permiten ser modificados, lo cual ejemplifica una gran limitante para los proveedores de servicios de telecomunicaciones.

Como consecuencia de lo señalado, en 1992, el Department of Defense (DoD) de los Estados Unidos [1], decide empezar el proyecto de desarrollo de un Radio Definido por Software, que tuvo sus inicios en 1970, tanto en Europa como en dicho país. El proyecto fue bautizado con el nombre de “SpeakEasy” y su objetivo inicial fue el de operar en la banda de 2 a 2000 MHz. A mediados de 1995 el proyecto fue un verdadero éxito por conseguir todas las metas planteadas, lo cual fue un gran argumento para el desarrollo de la segunda etapa que iniciaría el mismo año y finalizaría en el año 2000. La segunda etapa consistía en darle la funcionalidad de un sistema de radio completo, que a complemento de la primera etapa, tenía una funcionalidad de modem [2].



Fig. 1. Primer SDR presentada al mercado.

Radio Definido por Software es un campo relativamente reciente tanto en el ámbito industrial como en el inalámbrico. Es por esta razón que en el año 2000, varios radioaficionados empiezan a generar proyectos enfocados hacia el desarrollo de esta reciente tecnología. Uno de estos es SDR-1000 mostrado en la Fig. 1, que fue lanzado al mercado en el año 2003 por parte de FlexRadioSystems. Para el año 2001, un grupo liderado por Eric Blossom, denominado GNU Radio, empieza el desarrollo de una herramienta para el procesamiento de señales [3]. Poco tiempo después Matt Ettus desarrolla una tarjeta capaz de proveer la sección front-end de la radiocomunicación. Así nace la denominada USRP [4] [5] [6], que se detalla en al Fig. 2.

Aparte del dispositivo de front-end utilizado en los sistemas de comunicación, existe además una sección muy importante, que es una etapa inicial utilizada para el tratamiento de las señales, de audio en este caso, y es la etapa de codificación de fuente, que se encarga de codificar de forma digital las señales o la información transmitida por un tono.



Fig. 2. Universal Software Radio Peripheral.

En cuanto a una señal de audio, y con el propósito de optimizar el uso del ancho de banda, ésta debe ser comprimida, esto se consiguió e con la utilización de un códec, como el G.711 o el G.726, recomendaciones de la ITU. La etapa siguiente es un tratamiento de la señal codificada; esta información debe ser codificada mediante un algoritmo determinado, a fin de disminuir los errores que genera el ruido introducido en el canal, así como también de corregir estos cuando se hagan presentes. Este proceso se lo logra mediante la codificación convolucional y su respectiva decodificación usando el algoritmo de Viterbi, por ejemplo. Otra manera de realizar una tarea similar, pero con mayores limitaciones se la realiza por medio del uso del código de Hamming, que únicamente detecta los errores, mientras que el primero tiene la capacidad no solo de detectar, sino también de corregirlos.

El paso previo al envío de las señales al canal es la modulación de la información, para esto se utilizan diversas técnicas de modulación en banda base como son: modulación de fase, en cuadratura, *M*-PSK, y además puede hacerse uso de una modulación analógica como es la modulación en frecuencia o FM.

Consecuentemente, el proceso de decodificación se lo ejecuta utilizando los mismos algoritmos en el orden adecuado para obtener la señal aproximada a la emitida por la fuente y conseguir un adecuado funcionamiento y rendimiento del sistema.

II. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SDR

A. Generalidades

Un sistema de comunicaciones cuenta con varios procesos indispensables y fundamentales para garantizar que la información llegue de forma oportuna y eficaz desde el emisor hasta el receptor, los mismos que para el presente diseño han sido analizados y seleccionados de acuerdo a su rendimiento. en las condiciones en las que los equipos de radio van a operar, esto implica, por ejemplo, considerar la banda de frecuencia; esto, a su vez, involucra la existencia de longitudes de onda en el orden de los metros, es decir HF y VHF, con frecuencias bajas que permiten tener una gran área de cobertura; de igual forma los canales con los que trabajan al estar modulados en fase, sufren mucha interferencia e inserción de ruido, debido a que los equipos deberán tener la capacidad de operar en condiciones climáticas adversas, en terrenos cuya orografía será complicada, además de otros factores que pueden sumarse de acuerdo al lugar y condiciones de operación [7].

En base a esto se ha considerado que el equipo de radio estará conformado de la manera que se detalla en el siguiente diagrama.

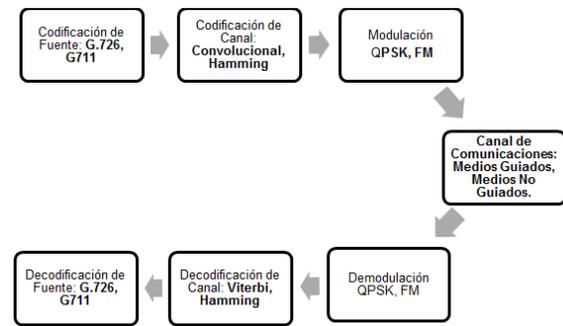


Fig. 3. Sistema Digital de Comunicaciones.

En la Fig. 3, es posible observar un diagrama de un sistema básico de comunicaciones digital. Bajo ésta premisa, y tomando en consideración todo lo mencionado anteriormente, se procederá al diseño de cada uno de los bloques, a excepción del canal, del sistema de comunicaciones [8]. En consecuencia, el sistema constará de las siguientes etapas:

- Codificador – Decodificador de Fuente:
 - Códecs: Recomendaciones ITU G.711 y G.726.
- Codificador – Decodificador de Canal:
 - Convolucional – Viterbi.
 - Hamming.
- Modulador – Demodulador:
 - QPSK.
 - FM.
- Dispositivo de Front – End:
 - USRP, que será el dispositivo que realiza el enlace para hacer efectivo el proceso de comunicación.

B. Codificación de Fuente

- 1) *Códec G.711*: La Recomendación ITU - G.711, es un códec de voz que utiliza 8 bits para codificar cada muestra de la señal vocal. Al ser uno de los primeros códecs desarrollados para optimizar la digitalización y posterior transporte de la voz, ayudó para que se mejoren los algoritmos desarrollados.

Éste códec consta de tres etapas muy marcadas:

- Muestreo
- Cuantización
- Codificación

Por otro lado, la cuantización es el proceso de asignación de ciertos valores discretos, en función de los valores obtenidos de las muestras. Para éste caso existen dos tipos de cuantizadores, los Uniformes y los No Uniformes. En el primero, se asignan valores que se encuentran a distancias iguales, uno y su inmediato, a cada una de las muestras. En el segundo caso, la asignación de valores está regida por algoritmos complejos o leyes de codificación y compresión. Dentro de los No Uniformes, se encuentran:

- Ley A, usada en Europa y América Latina.
- Ley u, usada en Norteamérica y Japón.

- 2) *Códec G.726*: El códec del presente diseño está configurado para trabajar únicamente a 32Kbps, el mismo que ha sido implementado en Simulink[®] en base a las recomendaciones establecidas por la ITU en su recomendación G-REC G.726 publicada en diciembre de 1990. Conjuntamente, se han considerado el anexo publicado en noviembre de 1994, Anexo B publicado en

julio del año 2003 y las correcciones finales publicadas en marzo 2005, las mismas que están disponibles en la página de la ITU. Las Fig. 4 y Fig. 5 corresponden al codificador decodificador de la recomendación ITU-G.726.

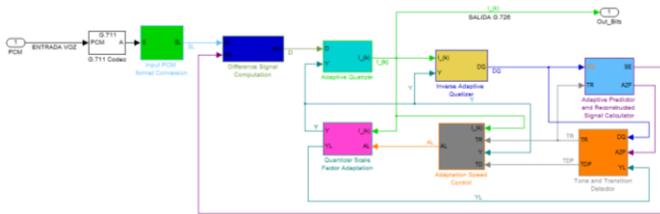


Fig. 4. Esquema del Codificador G.726 implementado.

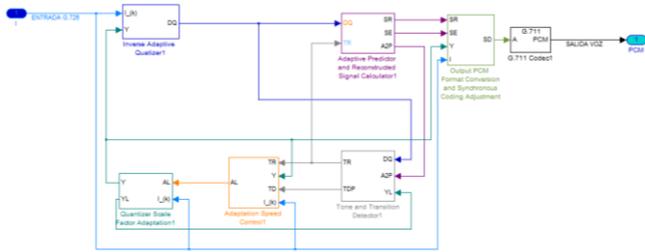


Fig. 5. Esquema del Decodificador G.726 implementado.

A continuación se detallan cada uno de los bloques que fueron implementados dentro de la investigación realizada.

1) *Conversión del formato PCM de entrada*

Este bloque se encarga de transformar la señal codificada en ley A a un formato de PCM uniforme, es decir, que reconstruye parcialmente la señal que fue codificada por medio del codificador G.711, con la intención de que las siguientes etapas puedan predecir los valores futuros de la señal.

2) *Cálculo de la señal de diferencia*

El presente bloque, se encarga de calcular la diferencia entre la señal PCM uniforme $s_l(k)$, proveniente del bloque anterior, y la señal estimada $s_e(k)$ que emana del predictor adaptativo. En resumen, éste bloque hace las veces de diferenciador.

3) *Cuantificador Adaptativo*

Un cuantificador es un elemento que se encarga de asignar ciertos valores discretos, dependiendo del rango de la señal de entrada. Así, éste bloque es un cuantizador no uniforme de 31, 15, 7 o 4 niveles que son usados para cuantificar la señal $d(k)$. Los niveles señalados, funcionan a 40, 32, 24 y 16 Kbps, respectivamente.

Es importante recalcar que para el presente proyecto, únicamente se tomó en cuenta el cuantizador no uniforme de 15 niveles, es decir de 32 Kbps.

Para lograr el objetivo de realizar una cuantización no uniforme, éste bloque convierte la señal $d(k)$ a una base logarítmica de 2. Éste valor está limitado por el factor de escala $y(k)$.

4) *Cuantificador Adaptativo Inverso*

Al inverso del bloque anterior, éste se encarga de reproducir una versión cuantificada de la señal $d_q(k)$ en

función del factor de escala $y(k)$. Esta señal pasa al dominio logarítmico.

5) *Adaptación del factor de escala del Cuantificador*

Para determinar el factor de escala $y(k)$, se procede conforme el principio de adaptación bimodal, que manifiesta que existen dos velocidades de adaptación. Una rápida, para señales con fluctuaciones prominentes, como las señales de voz, y otra lenta, para señales con mínimas fluctuaciones, como las señales de datos usando un tono. Una combinación entre ambas velocidades da lugar a una adaptación más eficiente.

Esto se explica de la siguiente manera. Las señales de audio y voz, poseen cambios pronunciados y por lo tanto se puede separar a dicha señal en tramos, unos en los cuales las oscilaciones sean grandes, para lo cual se necesita una adaptación rápida y otros en los cuales éstas son imperceptibles, en donde la adaptación lenta es suficiente. Por lo tanto, una mezcla entre ambos factores puede ser la solución ideal.

6) *Control de la velocidad de Adaptación*

El parámetro de control $a_l(k)$, varía en el rango entre 0 y 1. Se acerca a cero cuando las señales son tonos usados para señales de datos y tiende a uno cuando las señales son vocales. Esto quiere decir que, éste factor le imprime mayor o menor velocidad de adaptación al sistema, por lo tanto su importancia dentro del mismo es fundamental.

7) *Calculador de la señal Reconstruida y Predictor Adaptativo*

La tarea principal, desarrollada por este bloque, es la de emitir una señal estimada $s_e(k)$, a partir de una señal cuantificada $d_q(k)$. El predictor adaptativo consta de dos secciones que responden eficazmente a la diversidad de las señales de entrada. La primera sección es un banco de ceros de sexto orden y la segunda, un banco de polos de segundo orden. Con esta estructura, éste bloque pretende poseer todas las posibilidades, para que puedan responder a las exigencias planteadas por los distintos tipos de señales.

Estos bloques fueron fusionados, Fig. 4 y Fig. 5, ya que la recomendación así lo requería. Sin embargo, es fácil distinguir que éste bloque cumple dos propósitos, el primero, como ya se mencionó, es predecir una señal, y el segundo es reconstruirla, es decir que no basta con predecir un dato, sino que además debe reconstruirse en función de sus anteriores estados.

8) *Detector de Tono y Transición*

Éste bloque es útil en señales que usan un tono para transmitir la información, no necesariamente voz. Es de gran ayuda, ya que al detectar la estabilidad en el tono de la señal, ayuda a que el bloque de control de velocidad de adaptación, disminuya la velocidad y en consecuencia el sistema alcance el equilibrio. Ocurre lo contrario con las señales de voz.

En base a lo planteado, en las recomendaciones previamente mencionadas, el diseño implementado es el mostrado en las Fig. 4 y Fig. 5, el mismo que utiliza las herramientas de Simulink® como código embebido o bloque embedded, mismo que abarca todas las funciones y cálculos que constan en el algoritmo de funcionamiento del código.

Por el lado del decodificador, tal como se puede observar en la Fig. 5, la única diferencia es que además de todos los bloques ya mencionados, se suma uno más, el de Ajuste de Codificación Síncrona. Por dicha razón, en éste punto únicamente se hará mención de dicho bloque, ya que los demás fueron ya descritos.

9) Ajuste de Codificación Síncrona

Este bloque tiene por objetivo, eliminar la distorsión acumulativa producida por las codificaciones síncronas en cascada, es decir pasar de PCM a ADPCM y nuevamente a PCM. En consecuencia, elimina la probabilidad de escuchar errores al interior de la señal, a la salida del decodificador.

III. PRUEBAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Es importante manifestar que en la presente investigación se desarrollaron ocho modelos con las diversas variaciones del sistema de comunicaciones que se observa en la Fig. 3. Sin embargo, todos aquellos modelos en los cuales se incluyó, como codificador de canal, el codificador de Hamming, no se obtuvieron resultados aceptables, como lo indica más adelante la TABLA II. A continuación, en la TABLA I, se presentan los sistemas implementados con sus respectivas características:

TABLA I
TABLA DE CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS PROPUESTOS

	Codificador de Fuente	Codificador de Canal	Tipo de Modulación
Modelo I	G.711	Convolutional	QPSK
Modelo II	G.711	Hamming	QPSK
Modelo III	G.726	Convolutional	QPSK
Modelo IV	G.726	Hamming	QPSK
Modelo V	G.711	Convolutional	FM
Modelo VI	G.711	Hamming	FM
Modelo VII	G.726	Convolutional	FM
Modelo VIII	G.726	Hamming	FM

En las Fig. 6 y Fig. 7, se exponen los modelos realizados con mejor desempeño en la recepción de la señal de audio.

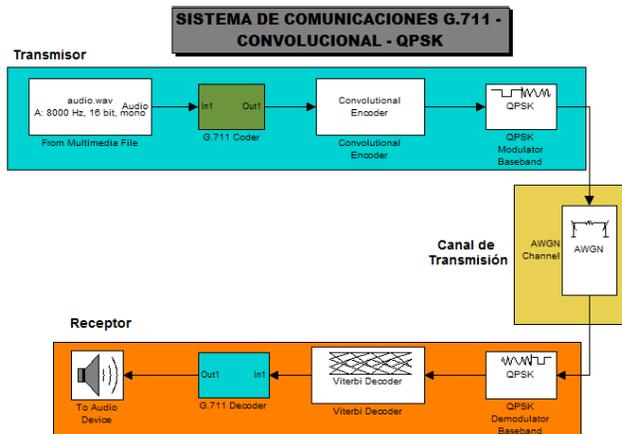


Fig. 6. Sistema de Comunicaciones propuesto Modelo I.

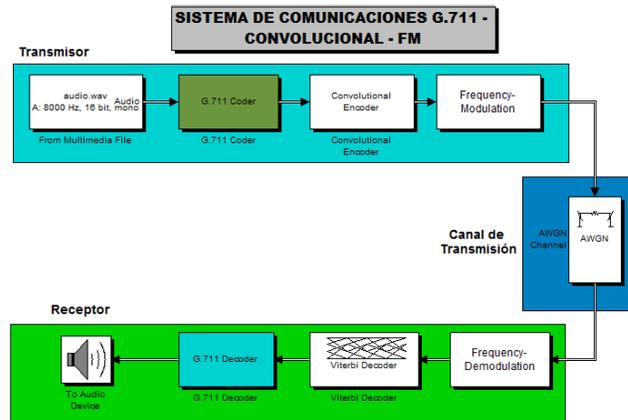


Fig. 7. Sistema de Comunicaciones propuesto Modelo V.

En cuanto a las simulaciones realizadas haciendo uso de la herramienta BERtool de Matlab®, se obtuvieron los siguientes resultados con los modelos que únicamente utilizaban modulación en banda base, es decir, aquellos que utilizaron modulación QPSK.

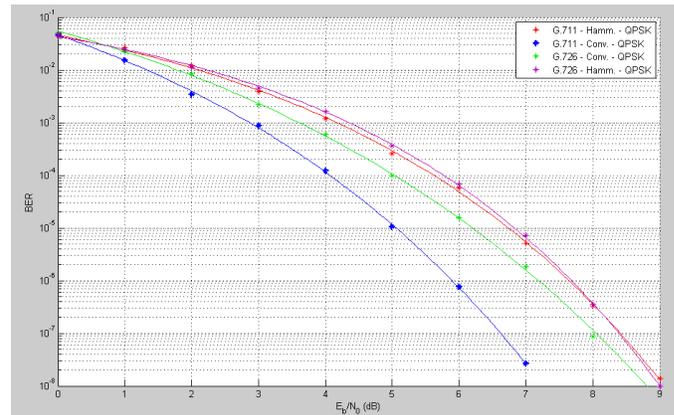


Fig. 8. Gráfica comparativa del BER de los sistemas diseñados.

Además y debido a las características de la presente investigación, se incluyen las mediciones realizadas por medio del uso del analizador de espectros Agilent N1996A-506.

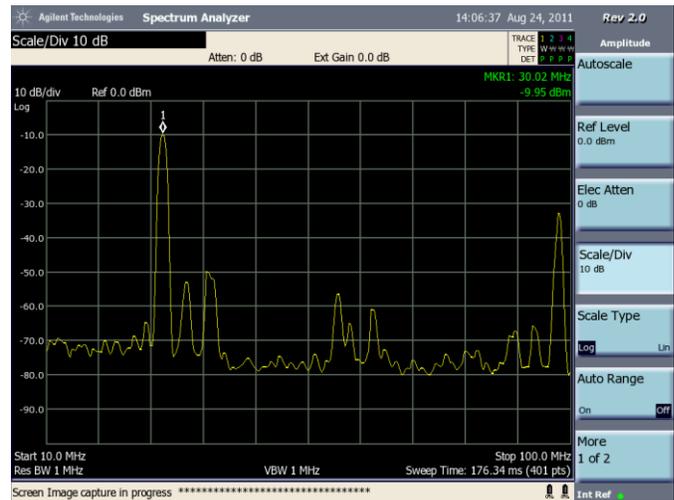


Fig. 9. Potencia de transmisión del Modelo I.

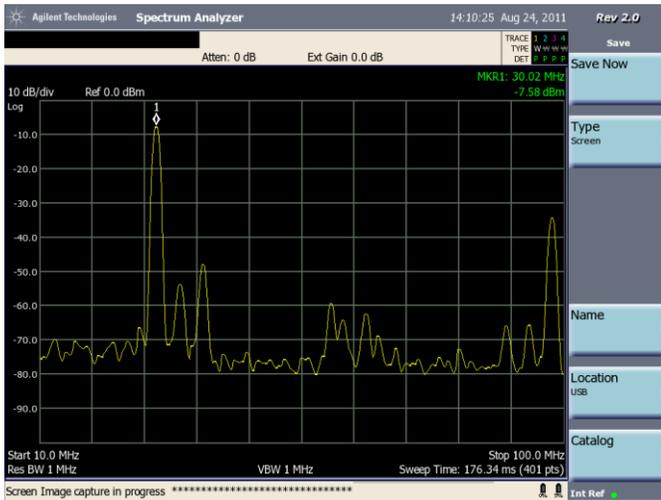


Fig. 10. Potencia de transmisión del Modelo V.

En seguida se presenta una tabla comparativa de los sistemas implementados y las mediciones realizadas.

La valoración de la tangibilidad de la voz, está hecha en base a la nitidez de la voz considerando una escala: Buena, Mala y Ruido. Esto según si: se reconoce la señal sin problemas, se reconoce la señal con dificultades y únicamente se escucha ruido.

TABLA II
TABLA COMPARATIVA DE LOS MODELOS PROPUESTOS

	Relación Señal Ruido [dB]	Tangibilidad de la voz.	Potencia de salida [dBm]	Tasa de transmisión [KSps]
Modelo I	55	Buena	- 8	64
Modelo II	60	Mala	- 10	56
Modelo III	55	Buena	- 10	56
Modelo IV	48	Mala	- 9	28
Modelo V	115	Buena	- 7	16
Modelo VI	110	Ruido	- 10	14
Modelo VII	120	Buena	- 10	8
Modelo VIII	115	Ruido	- 10	7

Para finalizar, se contempla tanto la TABLA II y las Fig. 10 y Fig. 11, de las mediciones de potencia realizadas con el analizador de espectros Agilent N1996A-506, para concluir que los sistemas que presentan mejor desempeño son el modelo I y el modelo V.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es importante mencionar que el códec G.726, implementado dentro del presente proyecto, permitió verificar que el proceso de codificación de la voz y posterior reconstrucción, es de mejor calidad, en comparación con el proceso realizado por el códec G.711. En función de esto, fue posible transmitir la señal al espacio y obtener, en la recepción, una calidad de la voz aceptable. Por lo tanto se concluye que debido al ahorro que presenta el códec G.726, es más eficiente que el códec G.711.

El objetivo de la codificación de canal es detectar y corregir errores, para de esta forma reducir la probabilidad de error necesaria para garantizar que la información que llegue al destinatario sea lo más semejante a la enviada. En función de lo citado, se pudo comprobar de forma práctica que una señal, aún con ruido inducido por el canal, o debido al procesamiento realizado por las tarjetas USRP, en éste caso, se puede transmitir y el decodificador corrige varios de estos errores, en tanto que una señal que no ha recibido una codificación de canal y durante el proceso, adopta errores, en la recepción no se podrá mejorar o corregir estos errores y el resultado será una señal deteriorada o una señal completamente ruidosa.

La tarjeta daughterboard BasicTX, a pesar de que en su especificación esta detallado que la banda de trabajo va de 1 a 250MHz, en la práctica presenta problemas para operar en toda la banda y se comprobó que el rango real de funcionamiento es de 1 a 44MHz, y es el caso en el que la tarjeta propaga adecuadamente las señales al espacio.

El USRP v.1.0 no tiene la capacidad de garantizar una buena comunicación utilizando cualquier modulación en banda base, ya que en ésta se requiere que la fase llegue de forma exacta al receptor, para que éste pueda decodificar la información. Como se puede interpretar, las tarjetas no tienen el aforo suficiente para mantener la fase de la señal, ya que debido a la transformación de digital a analógico y viceversa, hace que la ésta varíe de forma abrupta en el proceso aludido que genera el FPGA en conjunto con los conversores del USRP. Por lo tanto se concluye que las tarjetas no funcionan bien en procesos con modulación digital.

En cuanto a lo que atañe a la compresión de la voz, se debe tomar en consideración que, la codificación inicial, es decir, el paso entre la sección analógica de la voz, a una sección digital es realizada por el módulo del micrófono de Simulink®, el mismo que utiliza 16bits por muestra para dicha digitalización. A esto se debe añadir que, debido a la implementación del códec ITU-G.726 de 15 niveles, se logró comprimir cada una de dichas muestras hasta 4bits, lo que supone una optimización del 75%, en lo referente al uso del ancho de banda.

Se recomienda el uso de una etapa de filtrado de la señal, antes de la recepción de la misma, ya que como se puede constatar en las Fig. 9 y Fig. 10, los armónicos generan ruido sobre la información que se desea decodificar.

REFERENCIAS

- [1] Tuttlebee, Walter. "Software Defined Radio: Origins, Drivers and International Perspectives". West Sussex: John Wiley & Sons, 2002.
- [2] Bard, John y Kovarik, Vincent J. "Software Defined Radio: The Software Communications Architecture". Chichester : John Wiley & Sons, 2007.
- [3] Burns, Paul. "Software Defined Radio for 3G". Norwood: Artech House, 2003.
- [4] GNU radio. (2011, Enero 10)[En línea]. Disponible en: <http://gnuradio.org/redmine/attachments/download/129>.
- [5] Hamza, Firas Abbas. (2011, Febrero 20). "The USRP under 1.5X Magnifying Lens! GNU Radio". [En línea]. Disponible en: http://gnuradio.org/redmine/attachments/129/USRP_Documentation.pdf.

- [6] Ettus. (2011, Enero 21). “*USRP User’s and Developer’s Guide*”. [En línea]. Disponible en: http://www.olifantasia.com/gnuradio/USRP/files/USRP_guide.pdf.
- [7] Blake, Roy. “*Sistemas Electrónicos de Comunicaciones*”. Ontario: Thomson, 2004.
- [8] Proakis, John. “*Digital Communications*”. Cuarta. New York: McGraw-Hill, 2008.