

# IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE SEÑAL AUDITIVA PARA PERSONAS EXPUESTAS A SISTEMAS RUIDOSOS UTILIZANDO UNA TARJETA FPGA

Luis Ignacio Oña Jacho, Ing. Fabián Sáenz, Ing. Paul Bernal

Departamento de Electrónica y Eléctrica en Telecomunicaciones, ESPE Universidad de las Fuerzas Armadas  
Quito, Ecuador

**Resumen:** El presente trabajo describe una solución para la industria, mediante la implementación de un sistema de mejoramiento de la calidad de señales auditivas para personas expuestas a ambientes ruidosos utilizando una tarjeta FPGA, donde se presenta un esquema de diseño y pruebas de rendimiento del tipo cuantitativo del prototipo a ser implementado.

## I. ANTECEDENTES

El hombre ha aprendido a hablar escuchando e imitando las voces de los demás, ha aprendido la mayoría de lo que sabe escuchando a sus padres y profesores. La música, los sonidos de la naturaleza y las voces de los seres queridos le pueden brindar placer y seguridad.

En la actualidad existe un problema fruto de la industrialización la cual ha traído consigo maquinaria mucho más ruidosa y por ende el número de trabajadores expuestos es mayor que en años anteriores. Por lo que es muy común en personas que trabajan en industrias con maquinarias con altos niveles de emisión de ruido y que además no han sido debidamente protegidas, sufran la pérdida auditiva que se expresa como dificultad para entender conversaciones en ambientes ruidosos, escuchar la radio, TV y responder el teléfono.

Hay distintas soluciones para prevenir este tipo de enfermedad auditiva para ello se encuentra en el mercado distintos productos con tecnología eficiente los cuales por su precio no son de fácil accesibilidad, mediante una previa investigación de campo y de laboratorio se pudo determinar el tipo de análisis ideal para poder integrar la tecnología apropiada para reducir los costos y tener una mayor eficiencia en su aplicación [1].

Este análisis plantea la posibilidad de disminuir el ruido en ambientes laborales en donde se hace imposible la comunicación entre personas, y donde es de suma importancia que el trabajador detecte ruidos sumamente fuertes como medida de alarma, de este mecanismo la persona obtendrá beneficios no solo a nivel de eficiencia

laboral, si no que a largo plazo no se presentaran daños en la salud del individuo.

Hoy en día la tecnología que se emplea en la elaboración de los audífonos es muy eficaz además de discreta, dependiendo del paciente se deberá escoger la prótesis que mejor se adapte a sus necesidades. Por medio de nuevos mecanismos para identificar los problemas relacionados a la pérdida de audición en distintos ambientes de trabajo, se establecen modelos matemáticos para implementar, mediante tecnología de última generación nuevos dispositivos e integrar funciones adicionales [2].

## II. ESTUDIOS DE PRUEBA Y MEJORAMIENTO DEL FILTRO PREDISEÑADO

En el proyecto de tesis denominado “*Mejoramiento de la calidad de señal en sistema ruidosos para personas con discapacidad auditiva*” realizada con anterioridad se estableció un modelo de filtro analógico utilizando la herramienta de programación Matlab [3] llegando a obtener resultados satisfactorios para su consecuente implementación en hardware.

### A. Funcionamiento del Filtro Prediseñado

Se determinó que el tipo de filtro a utilizar por sus prestaciones, que este presta en el análisis de señales analógicas y por su rendimiento es el filtro de Butterworth, en el cual se debe considerar la banda de paso y la banda de atenuación de la banda suprimida. De igual manera en este punto se ubica la banda de paso y las frecuencias de banda de rechazo donde 1 corresponde a  $\pi$  rad/muestra, como se muestra en la Tabla 1.

Parámetro	Frecuencia(Hz)	Amplitud(dB)
Fs:	8000	
Fpass:	1600	
Fstop:	2000	
Apass:		3
Astop:		70

Tabla1: Parámetros en la Etapa de Filtrado

### B. Pruebas con el Filtro Prediseñado

Al analizar el rendimiento del filtro se puede establecer que el rango de frecuencias audibles que deja pasar el Filtro Prediseñado es:

Nivel de Ruido (dB)	Rango de Frecuencia Filtrado (Hz)
10	230 - 900
85	210 - 1100
91	208 - 970
97	205 - 990
103	210 - 1000

Tabla 2: Rangos de Frecuencias Audibles Obtenidos por el Filtro Prediseñado.

## III. ADAPTACION DE LA SEÑAL A LA TARJETA FPGA

### A. Definición de la Tarjeta FPGA ha ser utilizada

Las prestaciones que integra la tarjeta Spartan 3A/3AN FPGA Starter Kit son muchas pero las más importantes son las siguientes: contienen 500K compuertas que son equivalentes a 10476 celdas lógicas, Memoria Flash 16 MByte (128 Mbit) para aplicaciones, DDR (double data rate) SDRAM de 64 MByte (512 Mbit), CLPD XC2C64A, familia CoolRunner, Memoria Flash de 4 Mbit, para configuración, Memoria Flash 16 Mbits acceso serial, vía SPI(serial peripheral interface), una interface de capa física Lan Ethernet 10/100 y un oscilador de 50 Mhz, integra un convertidor Digital a Analógico SPI de cuatro salidas (DAC), con resolución de 12 bits y un convertidor Analógico al Digital SPI de dos entradas (ADC) con resolución de 14 bits y pre amplificador con ganancia programable todos manufacturados por Linear Technology.

### B. Diseño del Sistema de Mejoramiento de Calidad Auditiva

El esquema que se integró al sistema embebido FPGA para llegar a determinar el óptimo funcionamiento en ambientes de trabajo ruidoso es el presentado en el diagrama de flujo de la figura 1.

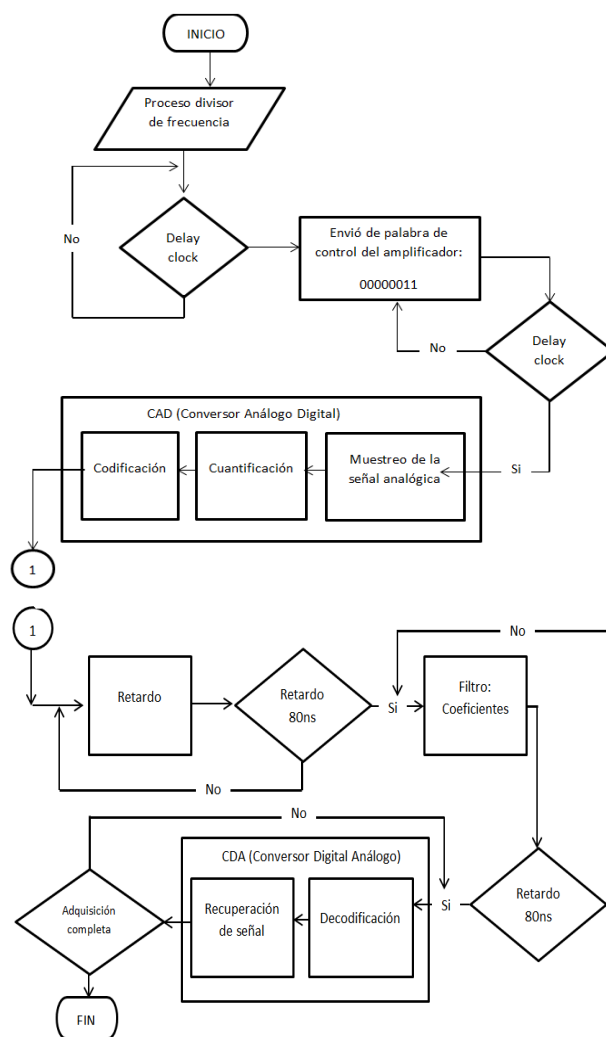


Fig. 1: Diagrama de Flujo del sistema integrado en la tarjeta de desarrollo Spartan 3A/AN

Distintos criterios intervienen en una investigación de campo ya que se consideran muchos factores para poder integrar un nuevo diseño de investigación al ámbito industrial, estableciendo las necesidades por donde se guía el proyecto se determina con fundamentos de ingeniería la mejor solución para llegar a establecer una solución viable.

Los criterios de diseño establecidos para la implementación del Filtro Prediseñado son los siguientes:

- El Tipo de Tecnología Establecida en la Investigación.
- Mejoramiento del Filtro Prediseñado mediante DSP.

El circuito para captura de señales analógicas consiste del LTC6912-1 el cual es un pre amplificador programable, a la salida de este pre amplificado se conecta el LTC1407A-1 ADC. Ambos son dependientes uno del otro siendo configurados por medio de la programación SPI que integra la FPGA.

Este esquema realiza la conversión de la señal analógica las cuales son adquiridas por los puertos VINA o VINB a ser representado el dato en 14-bits, este tipo de conversión se la realiza:

$$D[13:0] = GAIN * \frac{V_{IN} - 1.65V}{1.25V} * 8192 \quad (1)$$

LTC6912-1 provee de dos canales independientes, realizando amplificaciones con ganancia programable, el propósito del pre-amplificado es de determinar el rango de adquisición de la señal analógica de entrada para poder realizar la conversión A/D.

El SPI realiza la comunicación entre las interfaces del amplificador y la tarjeta Spartan, el control de la ganancia para realizar la amplificación se la realiza con una palabra de comando de 8-bit describiendo que 4-bits más significativos son para un canal A y los 4-bit menos significativos son para el canal B.

El bus SPI realiza un inicio de transición cuando la tarjeta FPGA cumple con los eventos de cada elemento por medio del protocolo de comunicación

Cada canal analógico tienen asociado una amplificación de ganancia programable comprendidas en el rango de -1 hasta -100 por cada valor de ganancia se tiene un nivel de voltaje amplificado, como se muestra en la tabla

Este integrado está conformado por dos puertos, su configuración es programable y es la etapa indispensable para poder realizar la digitalización de las señales analógicas.

Cuando el AD\_CONV está en alto, el ADC simultáneamente adquiere las señales analógicas de los canales. El resultado de esta conversión no son presentadas hasta el siguiente tiempo AD\_CONV se ponga en bajo, por medio de una latencia de una muestra, la máxima tasa de muestra es aproximadamente 1.5MHz.

El dispositivo DAC es un integrado de la familia Linear Technology LTC2624 quad DAC con 12-bit sin señal de resolución, las cuatro salidas del DAC se los obtiene por su respectivo puerto.

La configuración típica que se realiza para tener un rendimiento eficiente de los datos del conversor digital a analógico, es muy compleja ya que si se dan cálculos erróneos en la integración de los elementos este no podrá realizar una decodificación adecuada y se perderán datos de la señal original [4].

### C. Programación de lenguaje VHDL.

Con ayuda de la herramienta de Matlab Filtre Design & Análisis Tool, se configuró el filtro digital pasa-banda, se integraron las mismas características del filtro prediseñado como se muestra en la figura 2, porque permiten identificar por las pruebas realizadas la discriminación del ruido producido por maquinaria industrial.

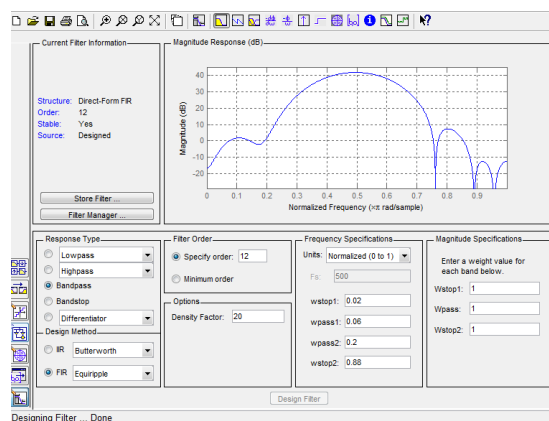


Fig. 2: Configuración del Filtro FIR.

La Tabla 3 representa el orden del coeficiente y el valor del mismo.

Orden del Coeficiente	Valor del Coeficiente
$Z^{12}$	-3.9487
$Z^{11}$	0.2238
$Z^{10}$	14.4987
$Z^9$	-1.0887
$Z^8$	-27.2566
$Z^7$	0.9588
$Z^6$	33.3701
$Z^5$	0.9588
$Z^4$	-27.2566
$Z^3$	-1.0887
$Z^2$	14.4987
$Z^1$	0.2238
$Z^0$	-3.9487

Tabla 3: Coeficientes del Filtro.

### D. Procesamiento de la Señal

El conversor análogo digital es el encargo de la adquisición de datos hacia el FPGA. Esta etapa del receptor es desarrollada en lenguaje de descripción de Hardware verilog.

Por medio de la simulación se verifica el comportamiento del CDA, para ello se necesita de dos pasos importantes para su correcto funcionamiento los cuales se detallan a continuación:

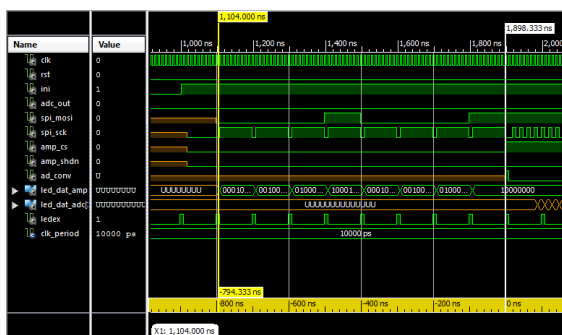


Fig. 3: Configuración de palabra de control para pre-amplificador.

La segunda etapa es adquirir el dato por los puertos los cuales con adquiridos mediante el Bus SPI por medio de la línea SPI\_MOSI se realiza la adquisición del dato y la respectiva conversión del dato a digital como se muestra en la Figura 3.

También se debe realizar la configuración previa para el funcionamiento del ADC para ello solo se necesita que la línea AD\_CONV realice un flanco de reloj como se muestra en la figura 4.

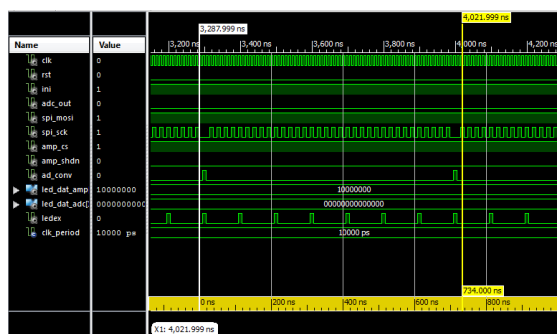


Fig. 4: Adquisición del dato y conversión del mismo con el ADC.

Para recuperar la información y poder obtener una percepción del audio grata para el oído humano se debe configurar y construir la señal como se muestra en la figura 5.

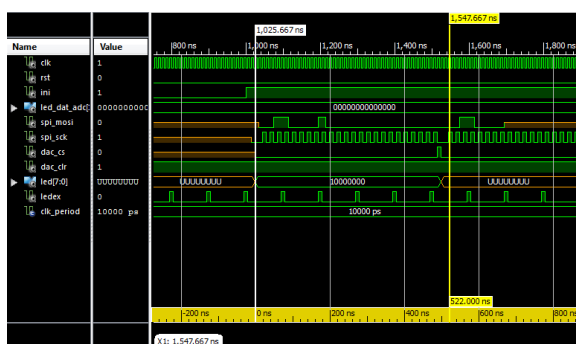


Fig. 5: Configuración y Reconstrucción de la señal con el DAC

#### IV. PRUEBAS DEL SISTEMA DE MEJORAMIENTO DE CALIDAD AUDITIVA.

La implementación los criterios de procesamiento digital de señales y la implementación del mismo como se muestra en la figura 6, el sistema brinda al personal técnico y laboral de instituciones de producción a nivel regional el poder reducir las altas emisiones de ruido llegando a establecer un buen estilo de vida laboral.

La implementación del sistema integra varios componentes los cuales ayudan a mejora el rendimiento del sistema, todos estos elementos cumplen funciones específicas, cabe recalcar que la tarjeta de desarrollo FPGA ofrece múltiples forma de poder manipularla por software esto permitió el poder utilizar un rendimiento de la tarjeta a 97% dando a lugar a su máxima capacidad de operación del sistema de mejoramiento de calidad auditiva.



Fig. 6: Implementación del sistema.

##### A. Elementos que Intervienen en el Sistema

El periférico del que dispone la tarjeta, tiene como función principal la de facilitar al usuario el poder conectar un dispositivo de adquisición de señales de audio como e un micrófono o MIC electrónico por medio de su plug de 3.3 mm hacia el Jack que integra el periférico.

Como segunda función del periférico es la de realizar el acondicionamiento de la señal de entrada hacia el prototipo implementado en la FPGA, este proceso lo realiza por medio del integrado AN7126.

El módulo de procesamiento lo integra completamente la tarjeta de desarrollo Spartan 3A/AN por medio de sus elementos internos como es el Amplificador de señales de audio, Conversor Analógico Digital (CAD) y el Conversor Digital Analógico CDA, internamente el integrado de Xilinx XSC300 realiza el control de los elementos por medio de múltiples configuraciones

comprendiendo la conexión de los mismos y el tipo de comportamiento para el CAD y CDA.

El módulo de PDS cumple con las características de sus predecesores que son las siguientes la frecuencia de muestreo está en 4400Hz, utiliza una codificación de código turbo con un tamaño en símbolo de 4 bits presenta una mejora en el sistema con la incorporación en un libro o base de datos los cuales permiten almacenar la información y adaptarla a cualquier condición del medio, esto es debido que cuando se manipula señales de audio por medio de un DSP es muy difícil poder realizar la reconstrucción de la misma.

Este módulo brinda un rendimiento del 80 %, por lo tanto su comportamiento es aceptable para la manipulación de señales de audio, su función principal es la de manipular señales analógicas con niveles de voltaje menores a los 3.3V, el procesamiento interno que realiza la tarjeta de desarrollo FPGA Spartan 3A/AN es del 92% ahorrando recursos de procesamiento en comparación con equipos que realizan lo mismo pero necesitan de interfaces de software.

### Periférico de Salida para la Emisión de Señales

Este diseño integra un acondicionador de señales porque la tarjeta envía señales con niveles de voltaje muy bajas y son propensas a ser distorsionadas por agentes externos en el cual se esté manipulando la señal de audio, para ello se integró el integrado AN7126.

Este integrado AN7116 cumple la función de acondicionar la señal del conversor digital análogo la cual se la adquiere por el puerto de la tarjeta nominado J1, esta señal puede llegar a ser amplificada a una potencia de 1W.

### B. Obtención de Resultados

Las pruebas que se realizaron para identificar el tipo de filtrado de audio que realiza la tarjeta FPGA y el rendimiento del mismo fueron hechas con el osciloscopio Tektronix TDS320, este quipo permite visualizar las señales eléctricas variables en el tiempo, a partir de estas señales se puede determinar parámetros de la misma como frecuencia, periodo, amplitud,.. etc.

En la figura 7 se visualiza las señales de audio obtenidas tanto en el ingreso y salida del sistema de mejoramiento de calidad auditiva, las señales están con un nivel de ruido de 70 dB, este parámetro es el de menos perjuicio para el personal de operación pero causa molestias al momento de establecer una comunicación fiable, se presentan síntomas de Hipoacusia moderada o media.



Fig. 7: Medición del Sistema de mejoramiento de calidad auditiva para 70 dB.

En la figura 8 se visualiza las señales analógicas obtenidas tanto en el ingreso y salida del sistema de mejoramiento de calidad auditiva con un nivel de ruido en los 80 dB, este parámetro es de nivel medio para el perjuicio del personal de operación, en este nivel de ruido se presentan síntomas de Hipoacusia severa.

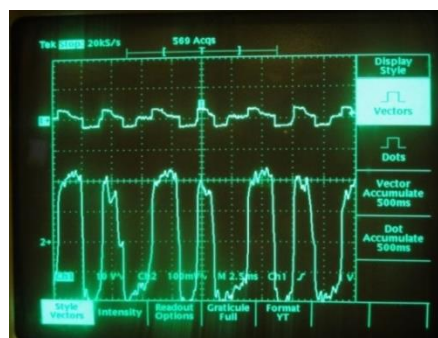


Fig.8: Medición del Sistema de mejoramiento de calidad auditiva para 80 dB.

En la figura 9 se visualiza las señales analógicas obtenidas tanto en el ingreso y salida del sistema de mejoramiento de calidad auditiva con un nivel de ruido en los 90 dB, este parámetro es el de más perjuicio para el personal de operación causando molestias al momento de establecer una comunicación fiable y llegando a futuras enfermedades que causan un daño al rendimiento laboral y familiar.



Fig. 9: Medición del Sistema de mejoramiento de calidad auditiva para 90 dB.



### C. Análisis de Resultados

Las recomendaciones establecidas por la ECUACUSTICA el cual enuncia que “El control del ruido se establece en la fuente, ambiente y en el receptor o trabajador, se debe corregir en estos puntos de origen para así garantizar la seguridad y salud de los trabajadores”.

Con la obtención de los resultados satisfactorios del sistema de mejoramiento de calidad auditiva en ambientes de trabajo con niveles de ruido, puede proceder a realizar los cálculos los cuales garantizan de forma segura el margen de error en el sistema.

#### Obtención de una medida de calidad de audio objetiva MBSD (*Modified Bark Spectral Distortion*)

El desarrollo de una medida de la calidad de voz objetiva que se correlaciona correctamente con la medida de la calidad de voz subjetiva, es importante porque las pruebas subjetivas son costosas y consumen mucho tiempo.

Las medidas objetivas son también más fáciles de poner en práctica y consumen menos tiempo. Además una buena medida de la calidad de voz objetiva se puede utilizar para mejorar la calidad de voz, proporcionándonos un criterio para la selección de un codificador.

La medida BSD (*Bark Spectral Distortion*) se basa en la suposición de que la calidad de voz está directamente relacionada al dimensionamiento de la voz, que es un término psicoacústico definido como la magnitud de la sensación auditiva.

La medida BSD es el promedio cuadrado de la distancia euclidiana de la dimensión estimada de la voz original y codificada.

Para el cálculo de la dimensión, la señal de voz se procesa mediante resultados de mediciones psicoacústicas, que incluyen: análisis de banda crítica, pre-énfasis de la igualdad de dimensión y la ley de potencia de intensidad-dimensión.

Se ha utilizado el concepto de umbral de enmascaramiento de ruido para mejorar la calidad de la voz. Se demostró que la ganancia de codificación podría ser obtenida sin pérdida de calidad de la voz, si no se transmiten muestras espectrales por debajo del umbral de enmascaramiento del ruido.

Esto implica que el ruido por debajo del umbral de enmascaramiento del ruido no es perceptible. Por lo tanto, los componentes espectrales del ruido por debajo del umbral de enmascaramiento del ruido son excluidos en el cálculo de la medida BSD, debido a que estos componentes son considerados inaudibles.

### Medición del MBSD

En la figura 10 se muestra el diagrama de bloques del método MBSD. El umbral de estimación de enmascaramiento de ruido se añade al BSD convencional.

El umbral de enmascaramiento de ruido se estima por el análisis de banda crítica, la aplicación de la función de dispersión y consideraciones de umbral absoluto.

La estimación del umbral de enmascaramiento de ruido considera el ruido de tono-enmascarado y el tono del ruido-enmascarado. La intensidad del umbral de enmascaramiento de ruido se compara con la diferencia de intensidad de la voz original y codificada que determina si la distorsión es perceptible.

El indicador de distorsión perceptible se denota por  $M(i)$ , donde  $i$  es  $i$ -énima banda crítica. Cuando la distorsión es perceptible,  $M(i)$  es 1, de lo contrario  $M(i)$  es 0. El cálculo de MBSD está dado por la siguiente formula.

$$MBSD = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [ \sum_{i=1}^K M(i) |L_X^{(j)}(i) - L_Y^{(j)}(i)| ] (2)$$

$N$ =número de tramas procesadas

$K$ =número de bandas criticas

$L_X^{(j)}(i)$  = Espectro de Bark<sup>1</sup> de la  $i$ -énima trama del dialogo original

$L_Y^{(j)}(i)$  = Espectro de Bark de la  $i$ -énima trama del dialogo codificado

$M(i)$  = Indicador de distorsión en  $i$ -énima banda crítica

La distorsión imperceptible es excluida en el cálculo MBSD multiplicando  $M(i)$ , ya que  $M(i)$  es cero cuando la distorsión no es perceptible. Así, el valor de MBSD puede ser definido como la diferencia media de la intensidad estimada que sólo es perceptible [5].

<sup>1</sup> Bark: amplitud de una banda crítica auditiva

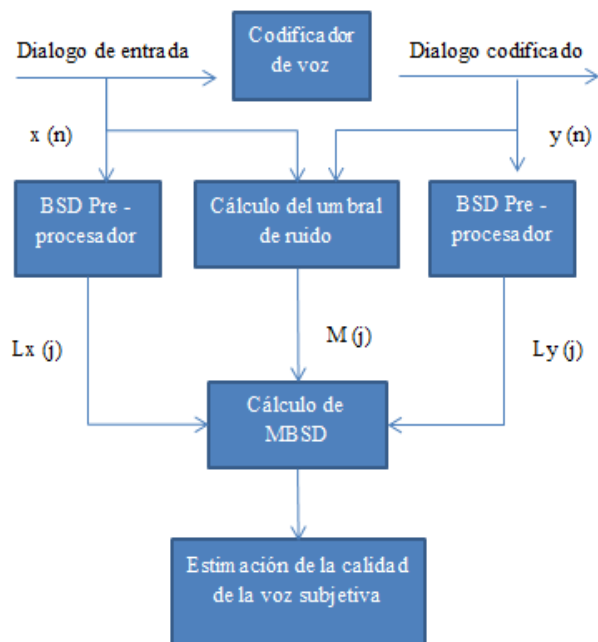


Fig. 10: Diagrama de bloques del método MBSD

### Análisis de las señales de audio utilizando el método MBSD

Para la obtención de un valor de dimensionamiento objetivo que nos de la correlación de la ganancia de la señal filtrada y señal con ruido, se ha implementado en la herramienta Matlab, un programa que ejecute el proceso para calcular dicho valor utilizando el método MBSD.

El programa a ser utilizado manipula una muestra de 20ms de cada una de las señales con ruido y filtrada respectivamente. Por lo que antes de utilizar el programa MBSD se debe ajustar las dos señales debido a que por cuestiones de retardos introducidos en el procesamiento de las señales, la señal filtrada tendrá un retardo imperceptible para el oído humano, pero que debe ser considerada en la ejecución del programa.

Para el ajuste de las señales se han tomado los picos máximos de ambas señales como se muestra en la figura 11 y de acuerdo a su posición se ha calculado el número de muestras recorridas por las que se ha desfasado la señal filtrada, para lo cual se ha utilizado la fórmula.

$$\#muestra = Fr(Nyquist) * \text{Tiempo de la señal} \quad (3)$$

$Fr(Nyquist) = 8\text{Khz}$

Tiempo de la señal = Tiempo en el eje x de la señal pico a ser comparada.

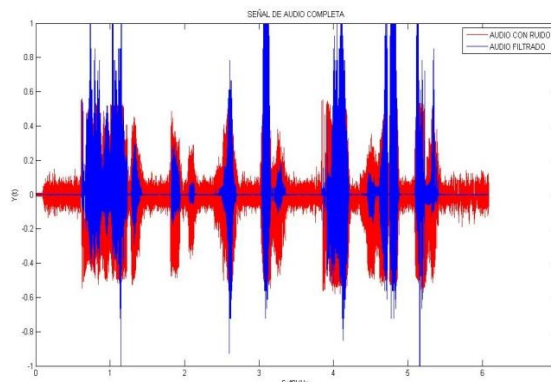


Fig. 11: Grafica de las señales originales

Después de calcular el desfase se determinó que por el procesamiento de la señal, la señal filtrada se ha recorrido 5 muestras o 625 micros segundos.

Una vez que se ha conseguido ajustar ambas señales, señal con ruido y señal filtrada respectivamente, se procede a tomar 20ms o 160 muestras de cada una de las señales como se lo muestra en la figura 12.

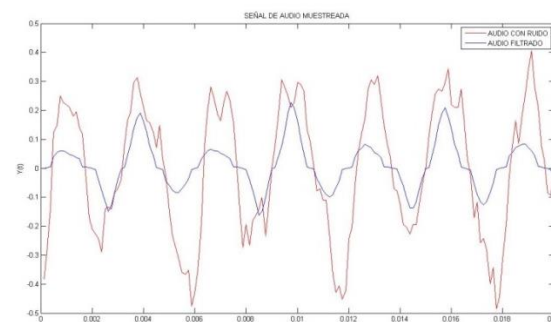


Fig. 12: Grafica de las muestras de las señales.

Es importante tomar muestras de señal con amplia información (picos altos de información)

Luego de tomar varias muestras y por ende varios cálculos se ha determinado que el valor promedio del dimensionamiento objetivo que nos de la correlación de la ganancia de la señal filtrada y señal con ruido es de 8,77dBs como se muestra en la tabla 4.

Prueba	Ganancia dBs	Tiempo de Muestra
1	10,67	1,1
2	7,26	2,1
3	7,08	3,15
4	9,088	4,15
5	9,78	5,15
<b>Ganancia Promedio</b>	<b>8,7756</b>	

Tabla 4: Resultados de la ejecución del programa MBSD.

## V. CONCLUSIONES

Se llegó a determinar que los filtros FIR son los más idóneos para la implementación en sistemas embebidos permitiendo manipular señales de audio en tiempo real, manipulando altas tasas de muestreo, esta característica es ideal ya que la tarjeta de desarrollo FPGA Spartan 3A presenta algoritmos dedicados a optimizar sistemas de audio.

Se llegó a establecer un sistema para el mejoramiento de calidad auditiva capaz de ofrecer las mismas ventajas y rendimientos que otros dispositivos establecidos en el mercado por empresas dedicadas a facilitar un ambiente de trabajo sin ruido.

Se llegó a establecer un rango de funcionamiento óptimo para cualquier tipo de sistema integrado en la tarjeta de programación, el cual indica que dentro del 65 % y 85 % de su rendimiento, el sistema implementado en el dispositivo de desarrollo tendrá una larga durabilidad operativa y brinda al usuario un óptimo desempeño.

En las pruebas de rendimiento cuantitativo, luego de los cálculos realizados se determinó que el valor promedio que nos da la correlación de la ganancia de la señal filtrada y señal con ruido es de 8,77dBs

## VI. REFERENCIAS

- [1] Centro del audífono. (2011, Enero). Centro del audífono.  
[http://www.centrodelaudifono.es/causa\\_pa.html](http://www.centrodelaudifono.es/causa_pa.html)
- [2] Cochlear. (2009). Sistema Núcleos 5. Hear now and always, 6-8.
- [3] Matrix Laboratory  
<http://www.mathworks.com/products/matlab>
- [4] Xilinx. (2008). Spartan-3A/3AN FPGA Starter Kit Board User Guide. San José California: Xilinx.
- [5] W. Yang, M. D. (1997). A modified bark. IEEE Speech Coding Workshop,.