

## ANALIZADOR DE SEÑALES DE BAJA FRECUENCIA

**Nombre completo Autor 1**, Institución, correo electrónico

**Nombre completo Autor 2**, Institución, correo electrónico

**Nombre completo Autor 3**, Institución, correo electrónico

**Resumen** - En estos tiempos que corren es indispensable en el diseño arquitectónico o en la acustización de recintos, la medición de parámetros acústicos pertinentes para llevar a cabo dichas tareas. Si bien en la actualidad se disponen de analizadores de espectro de baja frecuencia o analizadores de audio, los mismos no realizan de manera directa la medición de algunos parámetros como el tiempo de reverberancia discriminado por frecuencias, además se encuentran fuera del alcance desde el punto de vista económico. Esto hace inadecuado algunos analizadores comerciales. El presente proyecto pretende implementar el uso de la transformada rápida de Fourier en un sistema embebido, aplicando filtros digitales en la banda de frecuencias de audio para el desarrollo de un prototipo que permita medir el tiempo de reverberancia de un recinto discriminando las frecuencias, así como también la descomposición de la señal en sus componentes en frecuencia, con el objeto de luego poder proporcionar los datos necesarios para su acustización. Como así también la medición de otros parámetros como el piso de ruido y la posibilidad de generación de señales características de audio.

**Palabras clave:** *Transformada rápida de Fourier, acustización, sistema embebido, reverberancia.*

### 1. Introducción

El diseño acústico [3] de un recinto es de vital importancia en estos días, en donde se desempeñan trabajos vinculados con los procesos de comunicación, desde la grabación, reproducción hasta el análisis de patrones acústicos y el análisis de ruido acústico. Como así también en el diseño arquitectónico.

El presente proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema de adquisición de señales analógicas en el rango de frecuencias de 1 a 100khz, para su posterior análisis mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier y de filtros digitales embebidos en un sistema micro controlado, el cual podrá almacenar los mismo y presentar los resultados en una pantalla. Además, se prevé que disponga de distintas tecnologías de comunicación con el objeto de que los datos pueden ser enviados a una computadora para su almacenamiento y/o análisis.

El sistema consta de los siguientes bloques constitutivos, como se observa en la figura 1.

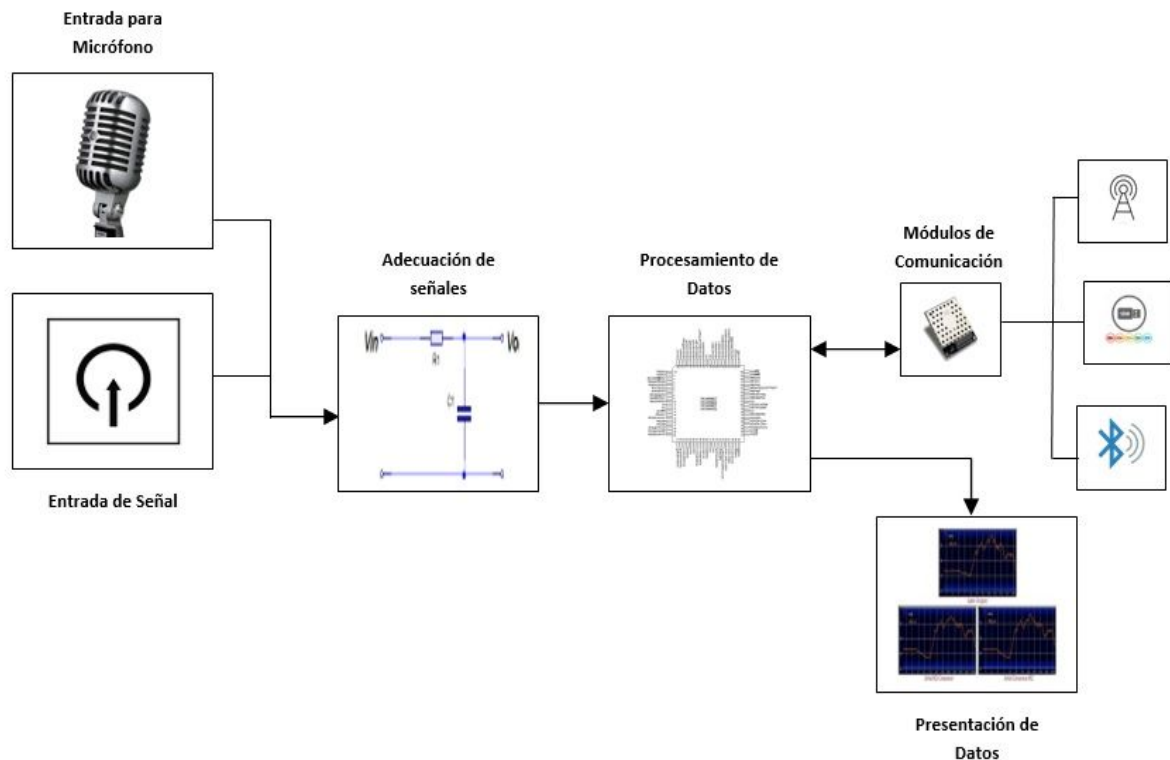


Figura 1. Sistema Completo

## 2. Estado del Arte

Actualmente en el mercado se pueden conseguir distintos modelos de analizadores de audio como el Phonic Paa6 Analizador De Audio 2-canales W/usb o un modelo más económico como el Tc Electronic Clarity M - Analizador De Espectro, ambos modelos presentan una limitación en cuanto a la versatilidad para la adquisición del tiempo de reverberancia, ya que en el caso del Phonic Paa6 si bien permite discriminar en frecuencias el tiempo de reberverancia, solo permite seleccionar entre diez frecuencias distintas[9], limitando el campo de medición solo a esos valores. Para la opción más económica Tc Electronic Clarity M no especifica la obtención del tiempo de reberverancia[10] de manera directa. Además, los instrumentos están más orientados al proceso de edición de audio profesional como masterizado, que como un instrumento de medición propiamente dicho. En la siguiente figura 2 se pueden observar ambos modelos.



Figura 2. Phonic Paa6 - Tc Electronic

### 3. Justificación

Como ya se mencionó anteriormente existen algunos instrumentos comerciales, los cuales son poco prácticos para la acustización de recintos e inviábiles desde el punto de vista económico. Dicho proyecto viene a suplir una necesidad que requieren los profesionales vinculados al diseño acústico, ya que con el correr del tiempo se pudo observar dicha necesidad desde la Facultad de Artes y Ciencias que le acercaron dicha inquietud los profesionales del medio recibidos y no en dicha institución.

### 4. Funcionamiento

El funcionamiento del sistema se puede resumir en la figura 3. En donde se puede observar el algoritmo de funcionamiento para la obtención del tiempo de reverberancia[3] y la respuesta espectral de la señal de entrada.



Figura 3.

En la figura se observa que el sistema presenta un bloque de configuración este es necesario para configurar el número de muestras a tomar para el cálculo del  $X_k$ , la frecuencia de muestreo, el nivel de disparo en db, el tipo de filtro empleado, etc. Una vez concluida la configuración del sistema se procede a la detección del piso de ruido y luego espera la ocurrencia de un evento impulsivo de audio, el cual inicia un temporizador para la cuenta del tiempo transcurrido, tras el cual se procede a realizar el cálculo de la transformada rápida de Fourier para la obtención de los  $X_k$  y su almacenamiento en la memoria, todo esto ocurre hasta que la intensidad de audio que ingresa sea menor en 20db al máximo detectado durante la ocurrencia del evento impulsivo. Una vez concluido se procede a presentar los datos en un display lcd o en la pantalla de un pc.

### 5. Entrada de Datos

El proyecto prevén dos entradas de señales analógicas de audio una proveniente de un micrófono y la otra proveniente de algún equipo de audio, como la salida para auriculares o la salida auxiliar. Si bien actualmente se trabajan en solo dos entradas el sistema es escalable permitiendo múltiples entradas de datos, tantos como la placa de procesamiento lo permita en este caso particular se pueden agregar como máximo 12 entradas de datos.

A continuación, se presentan algunas características de un micrófono profesional omnidireccional y de una salida de audio estándar en la tabla 1, como así también el micrófono empleado en la figura 3.

Tabla 1. Características

	Micrófono	Salida de audio
Impedancia de salida	2000Ω	32Ω
Rango de frecuencias	20Hz – 22Khz	14Hz – 20Khz
Voltaje de salida	29mv.	2v.
Sensibilidad	-38db	100db



Figura 3 Micrófono Profesional de audio

## 6. Adecuación de Señales

Las entradas de micrófono y la salida de un equipo de audio deben ser adecuadas a los niveles permitidos por las entradas de la placa microcontrolada[6], además deben ser amplificadas o atenuadas para tener a la entrada el máximo nivel de señal posible para poder realizar un conversión óptima por parte del convertor A/D del microcontrolador, estas fueron diseñadas en función de las características de salida de un micrófono profesional de audio, las cuales se observan en la tabla 1. Debido a estas fue necesario adecuar el nivel de salida de ambos a los niveles máximos permitidos por el convertor A/D del microcontrolador, el cual permite como máximo una tensión de 3.3 volts. Es por ello que se encuentra en proceso de implementar un control automático de ganancia controlado por voltaje del tal manera que el microcontrolador pueda controlar la ganancia en tiempo real mediante el empleo de uno de los convertores D/A de los cuales dispone el microcontrolador, el circuito propuesto es el que se puede observar en la siguiente figura 4.

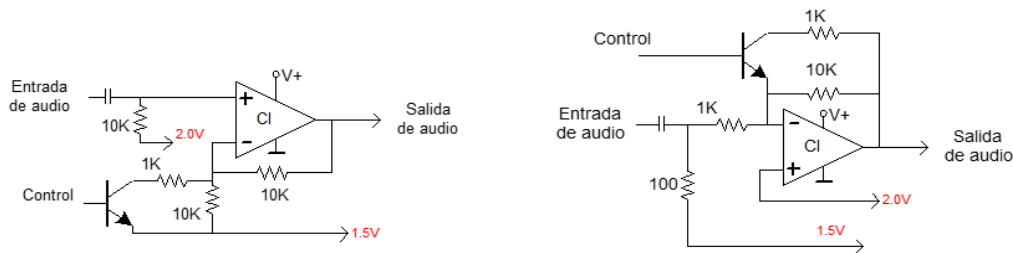


Figura 4 Control Automático de Ganancia.

## 7. Procesamiento de Datos

El sistema de procesamiento de datos está conformado en torno a un microcontrolador de 32 bits cortex M3 RISC ARM de Atmel-Microchip, el ATSAM3X8E[6]. El mismo se puede observar en la figura 7, como así también su estructura interna en la figura 8.



Figura 7

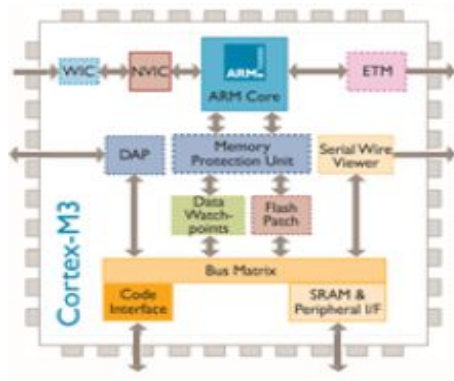


Figura 8

El mismo fue seleccionado debido a sus características internas y módulos especiales que dispone, como por ejemplo un convertor A/D de 1Mps y un DAC de 1Mps cuyas frecuencias de muestreo superan ampliamente a la frecuencia de muestreo establecida por Nyquist[1][2] para señales de audio, además de permitir la generación de señales analógicas a través del DAC, como tonos de muestras o señales características de audio. A continuación, se presentan algunas de las características más importantes del microcontrolador en la tabla 2[6].

Tabla 2 Características

CARACTERÍSTICA	VALOR
Max CPU Speed MHz	84
Program Memory Size (KB)	512
SRAM (KB)	96
SDIO/SD-CARD/eMMC	1
Operating Voltage Range (V)	1,62 a 3,6
SPI	4
I2C	2
Ethernet	10/100 Base-TX Mac
Number of USB Modules	1
ADC Input	16
Max ADC Resolution (Bits)	12

Max ADC Sampling Rate (ksps)	1000
Number of DACs	2
Max DAC Resolution (Bits)	12
Max DAC Sampling Rate (ksps)	1000
Internal Oscillator	4,8,12Mhz,32Khz
Max I/O Pins	103
Instruction Set	Thumbs-2

El sistema de procesamiento debe realizar determinadas tareas a cargo del microcontrolador las cuales se pueden visualizar a continuación:

- Procesamiento de los datos de entrada.
- Transformada Rápida de Fourier.
- Almacenamiento de datos.
- Comunicación.
- Presentación de datos.

### 7.1. Procesamiento de datos de entrada

En este caso el microcontrolador debe realizar la conversión de los datos de entrada analógicos en digitales, su posterior conversión a magnitudes en db según la respuesta característica del dispositivo de entrada, luego estos datos digitales son procesados por un filtro digital lineal en un caso y mediante un filtro digital ponderado acorde a la respuesta del oído humano en el otro [2]. En ambos casos se implementarán los filtros digitales del tipo FIR por el método de muestreo en frecuencia [1][6]. Estos datos en db se utilizan luego para detectar el piso de ruido y la ocurrencia de un evento auditivo impulsivo para luego dar arranque al conteo del tiempo de reverberancia, aquel en el cual a la entrada es 20db a 60db menos que el máximo detectado [3][4]. Una vez detectado el máximo a partir del piso de ruido en modo tiempo de reverberancia los datos digitales de entrada son procesados aplicando la transformada de Fourier para obtener sus respuestas en frecuencia y a la vez son almacenados en una memoria para luego discriminar el tiempo de reverberancia por frecuencia. A continuación, se presentan en la figura 9 el concepto de tiempo de reverberancia.

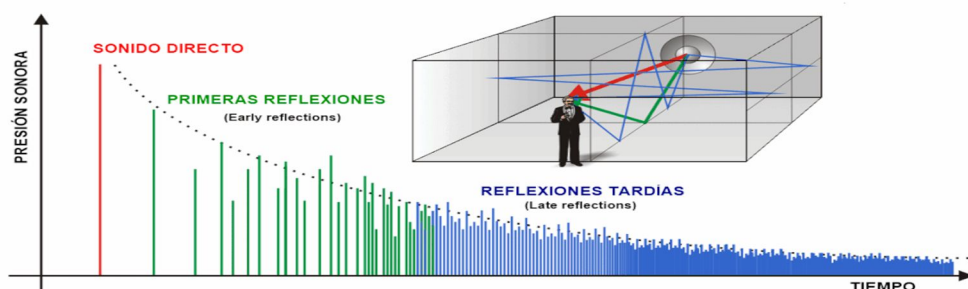


Figura 9

## 7.2. Transformada Rápida de Fourier

Con el objeto de obtener la respuesta en frecuencia de la señal de entrada se hace necesario la implementación de Transformada Rápida de Fourier [1][2], implementando el algoritmo diezmado en tiempo en base 2, ya que el mismo permite reducir la cantidad de cálculos. El proceso consiste en la toma de  $N/2$  muestras a las cuales se les aplican las ecuaciones de la transformada discreta de Fourier según el algoritmo las cuales son:

$$X_{real}[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n] \cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) + x[2n+1] \cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \cos\left(\frac{2\pi}{N} k\right) \quad (1)$$

$$X_{imag}[k] = -j \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n] \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) + x[2n+1] \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \sin\left(\frac{2\pi}{N} k\right) \quad (2)$$

$$X[k] = \sqrt{|X_{real}[k]|^2 + |X_{imag}[k]|^2} \quad (3)$$

Las mismas se expresaron en formato trigonométrico, debido a que es de más fácil implementación en el microcontrolador ya que se puede ingresar una tabla con los valores de las funciones seno y coseno, para el cálculo de las mismas. Al igual que para el cálculo de la anti transformada que se muestra a continuación:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \left\{ \cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \right\} \quad (4)$$

## 7.3. Almacenamiento de datos

Una vez calculadas las componentes en frecuencia de la señal de entrada  $X[k]$ , las mismas deben ser almacenadas en una memoria, la cual tiene dos opciones una en el propio microcontrolador y la segunda en la computadora, la cual consiste en almacenar los datos en un pc ya que la misma dispone de mayor capacidad. Los datos son enviados al pc a través de los distintos módulos de comunicación que dispone el proyecto. Además, esta última opción permite un posterior análisis de los mismos de manera más exhaustiva.

## 7.4. Comunicación

Con el objetivo de poder comunicar distintos dispositivos con el proyecto se implementarán diversas tecnologías de comunicación, a continuación, se detallan las mismas:

- A. USB: la placa dispone de un conector usb 2.0 del tipo micro usb B usb 2.0.[7] El cual puede ser utilizado para la conexión de la misma con la pc. Como se puede observar en la figura 10.

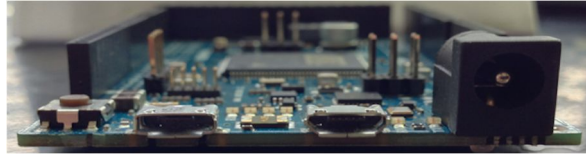


Figura 10.

- B. Bluetooth: con el objeto de poder tener una comunicación inalámbrica de corta distancia con dispositivos celulares o pc portátiles, se implementará un dispositivo bluetooth HC-05[8] el cual se puede observar en la figura 11. Al igual que sus características en la tabla 12[8].



Figura 11.

Tabla 12 Características

Característica	Especificación
bluetooth	v2.0 + EDR
Chip	CSR BC417143
Frecuencia	2,4Ghz, banda ISM
Modulación	GFSK
Potencia	4dbm
Alcance	5 a 10m
Velocidad	2,1Mbps-160Kbps-1Mbps
Seguridad	Autenticación y encriptación
Consumo de corriente	50mA.
Voltaje de alimentación	3,6 a 6V

- C. Spread Spectrum Frequency: con el objetivo de tener una comunicación inalámbrica de largo alcance previsto para recintos grandes como un estadio o teatro donde las distancias pueden ser del orden de unas pocas decenas de metros hasta unos cientos de metros. Para ello se seleccionó el módulo el AC4490 de Aerocom[6], que se puede observar en la siguiente figura 12.



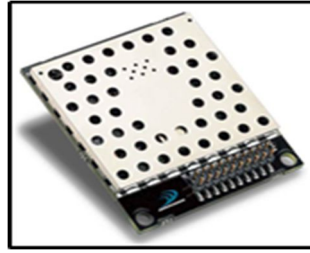


Figura 12.

El módulo selecciona presenta las siguientes características [6]:

- Posee modulación spread spectrum frequency hopping.
- Frecuencia de banda 902-928Mhz.
- Interface serial con baud rate de 1200 a 115200bps.
- 56 canales.
- Alcance vista libre 65km.
- Consumo de 1300mw.
- Tensión de alimentación 3,3V
- Buffer input output de 256 bytes.
- RF data rate 76,8 Kbps.
- Sensibilidad -100dbm.
- Interface conector de 20 pines.

La modulación spread spectrum y la banda de frecuencia que utiliza lo hace invisible a la modulación de la antena, con lo cual se reducen las posibles interferencias; Además dicho módulo puede ser configurado como:

- Punto a punto.
- Punto a multipunto.
- Cliente – Servidor.
- Peer to Peer.

El módulo presenta tres modos de operación las cuales pueden ser:

- Transmisión.
- Recepción.
- Mediante comandos AT.

La transmisión como la recepción se la conoce generalmente como modo transparente. El modo de comandos AT sirva para la configuración de parámetros y puede ser de forma inalámbrica; en caso de ser necesario. La modalidad empleada en el presente trabajo es la modalidad transparente durante la transmisión de los datos.

Si bien cada módulo encapsula los datos de acuerdo al protocolo de comunicación empleado, para un mayor control de los mismos y previendo la utilización de más de un sistema se optó por la creación de una trama de datos para todos los medios de comunicación empleados como se puede observar en la figura 13.

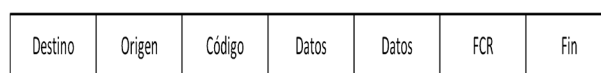


Figura 13.

La trama está compuesta por una cabecera destino y otro origen, las cuales me permiten direccionar los datos y que sean leídos solamente por el sistema direccionado.

El campo de código me permite controlar y/o solicitar información al sistema.  
El campo de datos es variable según el requerimiento de la base.  
El campo FCR es un campo para el control de errores no implementado aún.

## 7.5. Presentación de datos

La presentación de datos se hará de manera gráfica en un caso mediante un lcd el cual tendrá un menú para su configuración y empleo. Y un segundo modo que es el de presentar los datos mediante un software en la PC, con posibilidad de crear una app para el celular. A continuación, se presentan en la figura 14 un software de prueba desarrollado para la adquisición de los Xk.

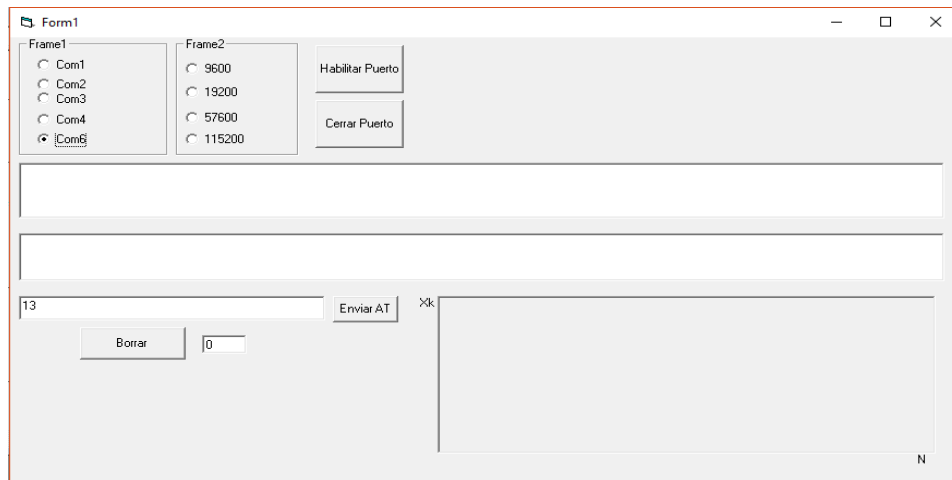


Figura 14.

## 8. Conclusiones

En el desarrollo del presente trabajo, la mayor complejidad hasta el momento se presentó en la optimización de la Transformada Rápida de Fourier en el microcontrolador. El sistema es capaz de discriminar entre  $n$  frecuencias seleccionadas por el usuario. El sistema presenta la suficiente rapidez como para muestrear los datos a una tasa de 56kbytes/seg. y realizar la anti transformada de Fourier, sin que se noten distorsiones excesivas en la reproducción del sonido. En la figura 15 se pueden observar los coeficientes de la transformada de Fourier obtenidos.

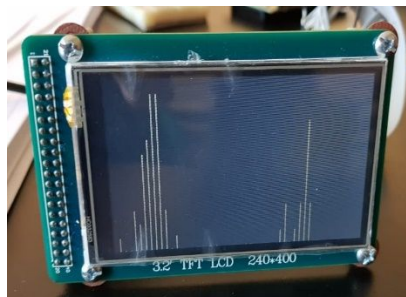


Figura 15.

En cuanto a la electrónica de soporte se construyó de forma modular a fin de poder actualizar la electrónica en caso de ser necesario.

La trama conformada para la comunicación funciona correcta sin detectar cortes en la comunicación ni errores de recepción, ya que el módulo inalámbrico posee una trama rf con corrección y detección de errores; sin embargo, a la trama conformada se le debe terminar la implementación de FCR, cuestión en la que se trabaja.

En cuanto al filtrado se encuentra en proceso de implementación un filtro pasa banda del tipo FIR, para la discriminación en frecuencia del tiempo de reverberancia en caso de ser necesario. Y de un filtro ponderado. Actualmente el ingreso de datos es transparente, es decir la respuesta es plana con respecto a la frecuencia.

La finalización del mismo permitirá continuar con otras líneas de investigación como la de procesamiento digital de señales, analizadores de espectro de baja frecuencia, diseño de filtros digitales y diseño de sistemas de modulación analógica y digital.

## 9. Referencias

- [1] J. Ángulo, B. García, I. Angulo, J. Vicente (2006). *“Microcontroladores Avanzados dsPIC”*. Ed. Thompson.
- [2] A.V.Oppenheim;A.S. Willsky (1998). *Señales y sistemas* (2.<sup>a</sup> ed.). Pearson Educación.
- [3] Carrión, A., (1998) *“Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos”*, Barcelona, Catalunya, Ediciones UPC.
- [4] Beraneck, L., (1959) *“Acoustics”*, Cambridge, Massachusetts, McGraw Hill Book Company.
- [5] Costas-Jussa M. R.; Barrobes H. D., (2012) *“Procesamiento de Audio”*, Barcelona, Ed. Eureka Media.
- [6] Hoja de datos módulo inalámbrico AC4490 de Aeroacom.
- [7] Hoja de datos del microcontrolador ATSAM3X8E.
- [8] Hoja de datos modulo bluetooth.
- [9] Hoja de datos del analizador de audio PHONIC PAA6.
- [10] Hoja de datos del analizador de audio Tc Electronic Clarity M.