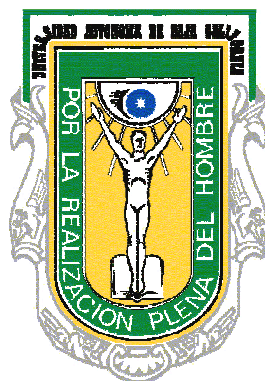


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Identificación De Cavidades Acústicas Utilizando
Métodos Clásicos De Procesamiento Digital De
Señales Y Métodos De Análisis Espectral Moderno”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

PEDRO AYALA MUÑOZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RICARDO JESÚS RENATO GUERRA FRAUSTRO

CO-DIRECTOR DE TESIS:

M.C. JOSÉ JAIME ESQUEDA ELIZONDO

Tijuana, B.C., México.

Septiembre del 2016

Universidad Autónoma de Baja California

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

COORDINACIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FOLIO No. 162

Tijuana, B. C., a 20 de noviembre de 2015

C. Pedro Ayala Muñoz
Pasante de: Maestro en Ciencias
Presente

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la
Opción TESIS

Es propuesto, por los C. Dr. Ricardo Jesús Renato Guerra Fraustro y MC. José
Jaime Esqueda Elizondo

Quienes serán los responsables de la calidad del trabajo que usted presente,
referido al tema: "Identificación De Cavidades Acústicas Utilizando Métodos
Clásicos De Procesamiento Digital De Señales Y Métodos De Análisis Espectral
Moderno"

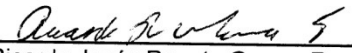
el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

- I.- Conceptos generales
- II.- Identificación de sistemas
- III.- SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) y reconocimiento de cavidades
acústicas: canal auditivo, caja acústica y botella
- IV.- RGB y reconocimiento de cavidades acústicas: canal auditivo, caja acústica y
envases

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICAS E INGENIERÍA


Dr. Ricardo Jesús Renato Guerra Fraustro
Director de Tesis


Dr. José Luis González Vázquez
Secretario


MC. José Jaime Esqueda Elizondo
Co-Director de Tesis


Dr. Luis Enrique Palafox Maestre
Director

Dedicatoria y agradecimientos

A mis padres Pedro Ayala Villanueva y Elizabeth Muñoz[†] por sus enseñanzas de valores y aptitudes que me han formado como ser humano, enseñanzas que me han permitido plantearme metas y trabajar sobre ellas con integridad y esfuerzo.

Al DR. Ricardo Jesús Renato Guerra Fraustro por su contribución en mi formación académica y la dirección de esta tesis.

Al M.C. José Jaime Esqueda Elizondo por contribuir a mi formación académica fungiendo como tutor y subdirector de tesis, por sus consejos y apoyo incondicional.

Al M.C Daniel García Rodríguez por su gran dedicación a mi formación y no solo en el contexto académico si no también humano.

Al DR. Cesar Ortega Corral por sus consejos y asesoría de manera incondicional.

A David Roa amigo y compañero, por permitir la colaboración mutua y por su apoyo en todo momento tanto en lo académico como en lo personal.

A Israel Chon Aguiar y Mario Alfredo Montoya alumnos de ingeniería en electrónica por su colaboración en el desarrollo de la fase inicial de la investigación.

Un agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme el valioso apoyo como becario, lo que me permitió cursar el posgrado como alumno de tiempo completo.

ABSTRACT

In this work principles of acoustic, digital signal processing and modern spectral analysis are used for the identification of acoustic cavities.

On one side a SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) will be made. In this technique a sinusoidal signal with rising frequency is injected, the captured signal is transformed with the FFT (Fast Fourier Transform), then the signal is compared with reference patterns saved in memory, the Pearson correlation coefficient is used.

On the other hand injecting and capturing the reflection of White Gaussian Noise, the signal is compared in three forms, the raw signal, the FFT and the PSD (Power Spectral Density) from an AR (Autoregressive) process, having a pattern for each form and comparing with the Pearson correlation coefficient.

A comparison is made between the different algorithms through an statistical and execution time analysis, comparison that will allow us the proper selection of the method that fits the required application.

The acoustic cavity of interest is the auditory channel, however tests are made on plastic bottles, and acoustic guitars. The obtained results will be used on the design of an auditory channel detection sensor, for the usage on context intelligence of hands-free earphones. Emphasis on the application is not made, since the interest is on the concept proof.

Palabras clave: acoustic, cavities, identification, recognition, white noise, autoregressive, SFRA, frequency, response, analysis.

RESUMEN

En este trabajo se utilizan principios de acústica, técnicas de *Procesamiento Digital de Señales y Análisis Espectral Moderno* para realizar el reconocimiento o identificación de cavidades acústicas.

Por un lado se realizará un análisis de respuesta a la frecuencia por barrido, SFRA (Sweep Frequency Response Analysis). Para esta técnica se inyecta una señal senoidal que va aumentando en frecuencia, se obtiene la TRF (Transformada Rápida de Fourier) de la señal capturada, para posteriormente ser comparada contra patrones de referencia guardados previamente en memoria, utilizando el índice de correlación de Pearson.

Por otro lado se compara el espectro de la señal reflejada al inyectar RGB (Ruido Blanco Gaussiano) contra patrones de referencia. La señal reflejada es capturada para ser transformada con la TRF, un modelo AR (Auto-regresivo) o bien señal cruda (sin transformación), una vez hecha la transformación o solo la captura según el caso se compara con patrones de referencia guardados en memoria obtenidos en una calibración a priori, utilizando el índice de correlación de Pearson.

Se realiza la comparación entre los distintos algoritmos mediante análisis estadístico y de tiempo de ejecución, comparación que permitirá seleccionar entre cada uno de los métodos según sean las necesidades de la aplicación.

La cavidad acústica de mayor interés de este estudio es el canal auditivo, sin embargo se realizan pruebas en envases contenedores de líquido y cajas de guitarras acústicas. Los resultados obtenidos serán de utilidad en el diseño de un sensor que detecte el canal auditivo para su aplicación en inteligencia contextual en auriculares manos libres. No se hace énfasis en la aplicación ya que el interés de este estudio es la prueba del concepto.

Palabras clave: acoustic, cavities, identification, recognition, white noise, autoregressive, SFRA, frequency, response, analysis.

Lista de acrónimos y símbolos

AEM	Análisis espectral moderno
a_k	Coeficientes autorregresivos
AR	Autorregresivo
ARMA	Autorregresivo con promedio móvil
b_k	Coeficientes de promedio móvil
CODEC	Codificador-decodificador
dB	Decibelio
DEP	Densidad espectral de potencia
DSK	DSP starter kit
DSP	Digital signal processor
FFT	Fast Fourier Transform
G&R	Gold and Rader
$H(z)$	Funcion de transferencia discreta
MA	Promedio móvil
MFLOPS	Millones de operaciones de punto flotante por segundo
MIPS	Millones de instrucciones por segundo
$P_{AR}()$	DEP de un modelo AR
$P_{ARMA}()$	DEP de un modelo ARMA
PDS	Procesamiento Digital de Señales
$P_{MA}()$	DEP de un modelo MA
PRBS	Secuencia binaria pseudo aleatoria
PSD	Densidad espectral de potencia
R	Matriz de autocorrelación
RGB	Ruido blanco gaussiano
R_{xx}	Autocorrelación
SFRA	Analisis de respuesta en frecuencia por barrido
SLIT	Sistema lineal invariante en el tiempo
SPL	Nivel de presión sonora (Sound pressure level)
TF	Función de transferencia
T_n	Matriz Toeplitz
TRF	Transformada Rápida de Fourier
TRS	TRS es un estándar de salida de audio
σ^2	Varianza
Φ_{xx}	Autocorrelación en tiempo continuo

Tabla de contenido

<u>Índice</u>	<u>Página</u>
Dedicatoria y agradecimientos	i
ABSTRACT.....	ii
RESUMEN.....	iii
Lista de acrónimos y símbolos.....	iv
Capítulo 1. Conceptos generales.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Conceptos de acústica.....	1
1.2.1 Acústica.....	1
1.2.2 Onda.....	2
1.2.2.1 Onda transversal y longitudinal.....	2
1.2.2.2 Compresión.....	2
1.2.2.3 Rarefacción.....	2
1.2.3 Velocidad del sonido	3
1.2.4 Reflexión	5
1.2.5 Absorción acústica	5
1.2.6 Eco	6
1.2.7 Interferencia	7
1.2.7.1 Interferencia constructiva	7
1.2.7.2 Interferencia destructiva.....	8
1.2.8 Impedancia acústica.....	8
1.2.9 Nivel de presión sonora (SPL).....	9
1.2.10 Referencias de potencia de sonido	9
1.2.11 Fisiología del oído	9
1.2.11.1 Dimensiones de la cavidad auditiva.....	10
1.2.12 Cajas resonantes	10
1.2.13 Micrófonos, bocinas y su acoplamiento.....	11
1.2.13.1 Micrófonos	11
1.2.13.1.1 Especificaciones de micrófonos.....	12
1.2.13.1.2 Micrófono electret	12
1.2.13.1.3 Micrófono de condensador	13
1.2.13.1.4 Micrófono inductivo	14
1.2.13.1.5 Acoplamiento para bocina	14

Tabla de contenido (Continuación...)

Capítulo 2. Identificación de sistemas.....	16
2.1 Introducción	16
2.2 Señales de prueba	17
2.2.1 Barrido en frecuencia	17
2.2.2 Ruido blanco gaussiano (RGB)	18
2.2.2.1 Método de Gold and Rader (G&R).....	19
2.3 Autocorrelación	21
2.4 Matriz de autocorrelación.....	24
2.5 Identificación y densidad espectral de potencia utilizando modelos paramétricos	25
2.5.1 Modelo Autorregresivo con Promedio Móvil (ARMA)	26
2.5.2 Modelo Autorregresivo (AR)	27
2.5.3 Modelo de Promedio Móvil (MA)	29
Capítulo 3. SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) y reconocimiento de cavidades acústicas: canal auditivo, caja acústica y botella.....	30
3.1 Introducción	30
3.2 Esquema de hardware	31
3.3 Esquema de procesamiento	35
3.4 El NI-ELVIS II+.....	36
3.4.1 Características y especificaciones del NI ELVIS II+	38
3.5 Resultados	39
3.5.1 Oído humano.....	39
3.5.2 Envases contenedores de líquido.....	40
3.5.3 Cajas acústicas de guitarras	41
3.5.4 Espacio libre y superficies	42
Capítulo 4. RGB y reconocimiento de cavidades acústicas: canal auditivo, caja acústica y envases.....	43
4.1 Introducción	43
4.2 Esquema de hardware	44
4.2.1 Esquema de hardware stand alone	44
4.2.2 Esquema de hardware de pruebas.....	45
4.3 Esquema de procesamiento	47
4.3.1 Esquema de procesamiento stand-alone	47
4.3.2 Esquema de procesamiento de pruebas	48

Tabla de contenido (Continuación...)

4.4	El procesador digital de señales DSK6713.....	50
4.4.1	Características y especificaciones del DSK6713.....	51
4.4.2	Diagrama a bloques interno del DSK6713	51
4.5	Resultados	52
4.5.1	Oído humano.....	52
4.5.1.1	Oído masculino	52
4.5.1.1.1	Oído masculino y señales crudas	52
4.5.1.1.2	Oído masculino y FFT.....	54
4.5.1.1.3	Oído masculino y DEP AR(10)	56
4.5.1.2	Oído femenino	58
4.5.1.2.1	Oído femenino y señales crudas	58
4.5.1.2.2	Oído femenino y FFT	60
4.5.1.2.3	Oído femenino y DEP AR(10).....	62
4.5.2	Envases contenedores de líquido.....	64
4.5.2.1	Envases de POWERADE	64
4.5.2.1.1	Envase de POWERADE y señales crudas	64
4.5.2.1.2	Envases de POWERADE y FFT	66
4.5.2.1.3	Envases de POWERADE y DEP AR(10).....	68
4.5.2.2	Envases de FUZE TEA.....	70
4.5.2.2.1	Envases de FUZE TEA y señales crudas	70
4.5.2.2.2	Envases de FUZE TEA y FFT	72
4.5.2.2.3	Envases de FUZE TEA y DEP AR(10)	74
4.5.2.3	Envases de GATORADE	76
4.5.2.3.1	Envases de GATORADE y señales crudas	76
4.5.2.3.2	Envases de GATORADE y FFT	78
4.5.2.3.3	Envases de GATORADE y DEP AR(10).....	80
4.5.3	Cajas acústicas de guitarras	82
4.5.3.1	Cajas acústicas y señales crudas.....	82
4.5.3.2	Cajas acústicas y FFT	84
4.5.3.3	Cajas acústicas y DEP AR(10)	86
4.5.4	Índice de correlación entre distintas cavidades acústicas.	88
4.5.5	Identificación paramétrica.....	91

Tabla de contenido (Continuación...)

4.5.6	Tiempo de ejecución.	92
Conclusiones y trabajo a futuro.		94
Apéndice A. Hoja de datos del NI-ELVIS.....		96
Apéndice B. Hoja de datos LM358.....		98
Apéndice C. Hoja de datos micrófono DB-C9752.....		100
Bibliografía.....		102

Lista de figuras

Figura 1.1 Espectro de frecuencias de sonido.	2
Figura 1.2 Propagación de las ondas transversales.	2
Figura 1.3 Propagación de las ondas longitudinales.....	3
Figura 1.4 Velocidad del sonido en el aire en función de la temperatura.....	4
Figura 1.5 Relación entre la onda incidente y reflejada en una superficie especular.	5
Figura 1.6 Esquema de absorción acústica.	5
Figura 1.7 Eco del grito de una persona al ser reflejado el sonido.....	6
Figura 1.8 Dos ondas que al interferir constructivamente forman una onda de mayor amplitud.....	7
Figura 1.9 Dos ondas que al interferir de manera destructiva forman una onda de menor tamaño.	8
Figura 1.10 Fisiología del oído humano [3]	10
Figura 1.11 La guitarra es un instrumento acústico con caja resonante.	11
Figura 1.12 Micrófono SHURE TM para voz.[6].....	12
Figura 1.13 Estructura de un micrófono electret.[7]	13
Figura 1.14 Preamplificador para micrófono electret con el CI LM358. [5].....	13
Figura 1.15 Micrófono de condensador. [5].....	14
Figura 1.16 Estructura de un micrófono inductivo. [5]	14
Figura 1.17 Amplificador para acoplamiento de bocina con el CI LM358.	15
Figura 2.1 Chirp lineal.	17
Figura 2.2 Espectrograma de un chirp lineal.....	18
Figura 2.3 Distribución de la densidad de probabilidad del RGB.	18
Figura 2.4 Densidad de probabilidad acumulada del RGB.	18
Figura 2.5 RGB generado mediante el método de G&R.	19
Figura 2.6 Impulso al hacer la autocorrelación del RGB.	20
Figura 2.7 Densidad espectral de potencia del RGB.	20
Figura 2.8 Histogramas de cuatro secuencias de RGB.	21
Figura 2.9 Conservación de la periodicidad de una señal al aplicar la autocorrelación.....	22
Figura 2.10 Secuencia de una señal senoidal con ruido.....	22
Figura 2.11 Espectro de la secuencia (2.7).....	23
Figura 2.12 Autocorrelación de la secuencia (2.7).....	23
Figura 2.13 Espectro de la autocorrelación de la secuencia (2.7).....	24
Figura 2.14 Esquema de identificación paramétrico con un modelo AR [15]	25
Figura 2.15 Espectro cualitativo de un modelo ARMA[15]	27
Figura 2.16 Espectro cualitativo de un modelo AR[15].	28
Figura 2.17 Espectro cualitativo de un modelo MA [15].	29
Figura 3.1 Esquema de hardware.	31
Figura 3.2 Montaje de pruebas con el ELVIS.....	32

Lista de figuras (Continuación...)

Figura 3.3 Sensor para pruebas en oído y envases.....	32
Figura 3.4 Colocación del sensor en el oído.	33
Figura 3.5 Montaje del sensor en prueba a envases.	33
Figura 3.6 Sensor para pruebas en cajas acústicas.	34
Figura 3.7 Colocación del sensor para pruebas en cajas acústicas.....	34
Figura 3.8 Colocación de sensor sobre superficie laminada (izquierda), hacia el espacio libre (centro), y sobre papel periódico (derecha).	35
Figura 3.9 Esquema de procesamiento utilizando SFRA.....	35
Figura 3.10 Interfaz de pruebas en LabVIEW.	36
Figura 3.11 Sistema típico con el NI-ELVIS II[17]	37
Figura 3.12 Vista de planta del NI-ELVIS[17].....	37
Figura 3.13 Respuesta en frecuencia de la cavidad auditiva.	39
Figura 3.14 Respuesta en frecuencia de botellas contenedoras de líquidos.	40
Figura 3.15 Respuesta en frecuencia de cajas acústicas.	41
Figura 3.16 Respuesta del sensor al espacio libre y sobre una superficie laminada.	42
Figura 4.1 Esquema de hardware DSK modo standalone.	44
Figura 4.2 Esquema de hardware DSK etapa de pruebas.....	45
Figura 4.3 Montaje de pruebas con el DSP.	46
Figura 4.4 Esquema de procesamiento standalone.....	47
Figura 4.5 Esquema de procesamiento de pruebas.....	49
Figura 4.6 Pantalla del CodeComposer Studio 3.1.	50
Figura 4.7 Procesador digital de señales DSK6713.....	50
Figura 4.8 Diagrama interno del DSK6713.	51
Figura 4.9 Señales crudas capturadas en oído humano masculino.....	52
Figura 4.10 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en oído humano masculino.	53
Figura 4.11 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en oído humano masculino.....	54
Figura 4.12 Histograma de los índices de correlación de las FFT en oído humano masculino.	55
Figura 4.13 DEP con un modelo AR(10) de la señal en oído humano masculino.	56
Figura 4.14 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en oído humano masculino.....	57
Figura 4.15 Señales crudas capturadas en oído humano femenino.	58
Figura 4.16 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en oído humano femenino.	59
Figura 4.17 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en oído humano femenino.	60
Figura 4.18 Histograma de los índices de correlación de las FFT en oído humano femenino.	61

Lista de figuras (Continuación...)

Figura 4.19 DEP con un modelo AR(10) de la señal en oído humano femenino..	62
Figura 4.20 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en oído humano femenino.	63
Figura 4.21 Señales crudas capturadas en envases de POWERADE.....	64
Figura 4.22 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en envases de POWERADE.	65
Figura 4.23 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en envases de POWERADE.	66
Figura 4.24 Histograma de los índices de correlación de las FFT en envases de POWERADE.	67
Figura 4.25 DEP con un modelo AR(10) de la señal en un envase de POWERADE.	68
Figura 4.26 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en envases de POWERADE.....	69
Figura 4.27 Señales crudas capturadas en envases de FUZE TEA.	70
Figura 4.28 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en envases de FUZE.	71
Figura 4.29 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en envases de FUZE TEA.....	72
Figura 4.30 Histograma de los índices de correlación de las FFT en envases de FUZE.....	73
Figura 4.31 DEP con un modelo AR(10) de la señal en un envase de FUZE TEA.	74
Figura 4.32 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en envases de FUZE TEA.	75
Figura 4.33 Señales crudas capturadas en envases de GATORADE.	76
Figura 4.34 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en envases de GATORADE.....	77
Figura 4.35 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en envases de GATORADE.....	78
Figura 4.36 Histograma de los índices de correlación de las FFT en envases de GATORADE.....	79
Figura 4.37 DEP con un modelo AR(10) de la señal en un envase de GATORADE.	80
Figura 4.38 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en envases de GATORADE.	81
Figura 4.39 Señales crudas capturadas en cajas acústicas.	82
Figura 4.40 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en cajas acústicas.	83
Figura 4.41 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en cajas acústicas.	84

Lista de figuras (Continuación...)

Figura 4.42 Histograma de los índices de correlación de las FFT en cajas acústicas.	85
Figura 4.43 DEP con un modelo AR(10) de la señal en cajas acústicas.	86
Figura 4.44 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en cajas acústicas.....	87
Figura 4.45 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal promedio de distintas cavidades, espacio libre y sobre una superficie laminada.	88
Figura 4.46 Diagrama de dispersión de los índices de correlación obtenidos al comparar distintas cavidades acústicas, el sensor orientado al espacio libre y sobre una superficie laminada.	90
Figura 4.47 Autocorrelación de cada una de las cavidades acústicas bajo prueba.	91
Figura 4.48 Tiempo de ejecución de la FFT y la DEP AR(10)	92
Figura 4.49 Tiempo de ejecución de la DEP AR en función del orden.....	93

Lista de tablas

Tabla 1.1 Velocidad del sonido en gases, líquidos y sólidos. [2].....	4
Tabla 1.2 Referencias de potencia de sonido. [2]	9
Tabla 1.3 Dimensiones promedio de la cavidad auditiva [4]	10
Tabla 3.1 Índices correlación de Pearson entre las curvas de las respuesta en el oído.	39
Tabla 3.2 Índices de correlación de Pearson entre las curvas de tres envases....	40
Tabla 3.3 Índice de correlación de Pearson entre dos cajas acústicas.....	41
Tabla 4.1 Índice de correlación de señales crudas en oído humano masculino. ..	53
Tabla 4.2 Índice de correlación de la FFT en oído humano masculino.	55
Tabla 4.3 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en oído humano masculino.	57
Tabla 4.4 Índice de correlación de señales crudas en oído humano femenino....	59
Tabla 4.5 Índice de correlación de la FFT en oído humano femenino.	61
Tabla 4.6 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en oído humano femenino.	63
Tabla 4.7 Índice de correlación de señales crudas en envases de POWERADE. 65	
Tabla 4.8 Índice de correlación de la FFT en envases de POWERADE.....	67
Tabla 4.9 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en envases de POWERADE.	69
Tabla 4.10 Índice de correlación de señales crudas en envases de FUZE TEA... 71	
Tabla 4.11 Índice de correlación de la FFT en envases de FUZE TEA.	73
Tabla 4.12 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en envases de FUZE TEA.....	75
Tabla 4.13 Índice de correlación de señales crudas en envases de GATORADE.77	
Tabla 4.14 Índice de correlación de la FFT en envases de GATORADE.....	79
Tabla 4.15 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en envases de GATORADE.	81
Tabla 4.16 Índice de correlación de señales crudas en cajas acústicas.	83
Tabla 4.17 Índice de correlación de la FFT en cajas acústicas.....	85
Tabla 4.18 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en cajas acústicas.	87
Tabla 4.19 Índice de correlación de las FFT promedio de distintas cavidades.	89
Tabla 4.20 Tiempo de ejecución de la FFT y la DEP AR(10).....	92
Tabla 4.21 Tiempo de ejecución de la DEP AR en función del orden.....	93

Capítulo 1. Conceptos generales

“Sound is a ubiquitous component of our environment from which there is no escape. Even in the darkness of a deep underground cavern, the potholer hears the sound of the operation of his or her body. In the dark depths of the ocean, creatures communicate by sound, which is the only form of wave that propagates over long distances in water. Only in the reaches of cosmic space, and in high vacuums created on Earth, are atoms so isolated that the chance of interaction, and hence the existence of sound, is negligible.” F. Fahy [1].

1.1 Introducción

Como preámbulo a los experimentos y análisis en los siguientes capítulos, primero se abordan de manera breve los conceptos generales de acústica, fisiología del oído humano y caja de resonancia, conceptos que son necesarios para comprender el fenómeno físico que es base para el desarrollo de esta tesis.

1.2 Conceptos de acústica

Es importante revisar o recordar algunos conceptos básicos sobre acústica. En este apartado se abordaran de manera breve, sin embargo están disponibles las referencias en el caso que desee ahondar en cada uno de ellos.

1.2.1 Acústica

La acústica es la rama de la física que se encarga de estudiar la generación, propagación y recepción del sonido, el cual es una onda mecánica producida por la vibración de un cuerpo que se propaga de manera longitudinal en forma de compresiones y rarefacciones a través de la materia en cualquiera de sus estados físicos, ya sea sólido, líquido o gaseoso, en el vacío no puede darse esta propagación ya que hay ausencia de materia [2].

El sonido se encuentra en el rango de frecuencias audibles, si la frecuencia se encuentra por debajo del rango audible se le llama infrasonido, y si se encuentra por encima se le denomina ultrasonido. En la Figura 1.1 se muestra el espectro de frecuencias de sonido donde se pueden apreciar los rangos correspondientes a cada una de sus clasificaciones.

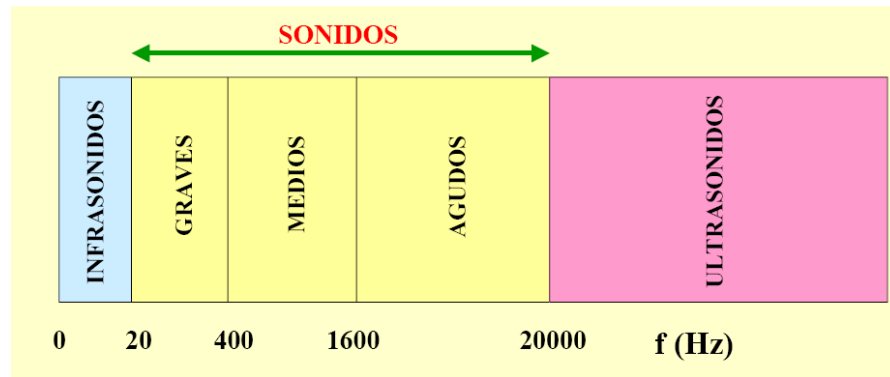


Figura 1.1 Espectro de frecuencias de sonido.

1.2.2 Onda

Una onda mecánica consiste en la propagación de una perturbación a través de un medio, implicando un transporte de energía sin transporte de materia. El medio de propagación puede ser de naturaleza distinta como el aire, agua, madera, e incluso metales entre otros medios. Hay dos tipos de onda, transversal y longitudinal.

1.2.2.1 Onda transversal y longitudinal

En una onda transversal los elementos del medio se mueven en dirección perpendicular a la dirección de propagación. Una ola en un estanque o una onda en una cuerda son ejemplos de ondas transversales [2]. En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo de onda transversal, la cual corresponde a la variación de presión atmosférica.

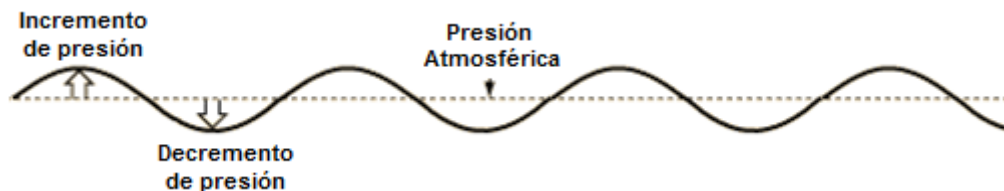


Figura 1.2 Propagación de las ondas transversales.

En una onda longitudinal los elementos del medio se mueven en dirección paralela a la dirección de propagación en forma de compresiones y rarefacciones, a estas ondas también se le llaman ondas de presión u ondas de compresión, el sonido es un ejemplo de onda longitudinal. [2]

1.2.2.2 Compresión

Es cuando hay mucha cercanía entre las moléculas de aire debido a una excitación mecánica, creándose una región de alta densidad. [2]

1.2.2.3 Rarefacción

Es cuando las moléculas en un elemento de aire se separan y la densidad y presión del aire en esta son más bajas de lo normal. La rarefacción sigue a la

compresión previamente producida [2]. En la Figura 1.3 se muestra la manera en que se propagan las moléculas de aire asociadas con el sonido.

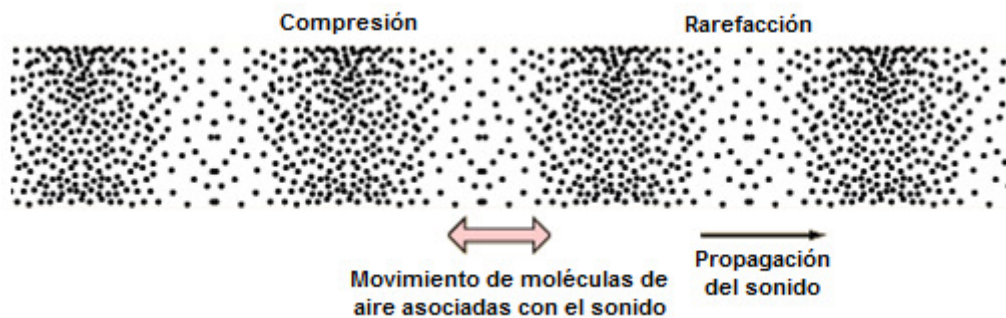


Figura 1.3 Propagación de las ondas longitudinales.

1.2.3 Velocidad del sonido

La velocidad del sonido varía en función de la temperatura del medio de propagación. Para una temperatura de 20 °C considerada como temperatura normal la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s, se puede decir el sonido recorre aproximadamente una distancia de 1 kilómetro en un tiempo de 3 segundos.

La velocidad del sonido en el aire contra las variaciones de temperatura obedece a la relación [2]

$$v = \left(331 \frac{m}{s}\right) \sqrt{1 + \frac{T_c}{273^{\circ}C}} \quad (1.1)$$

donde: v es la velocidad del sonido, T_c =Temperatura del medio, 331m/s es la velocidad del sonido en el aire a 0°C. En la Figura 1.4 se muestra la curva de la velocidad del sonido en el aire cuando hay variaciones de temperatura, esta curva se obtiene utilizando la ecuación (1.1), en la cual puede verse que tiene un comportamiento lineal y una pendiente suave. De otra manera se dice que no es grande el cambio de la velocidad del sonido a pequeñas variaciones de temperatura.

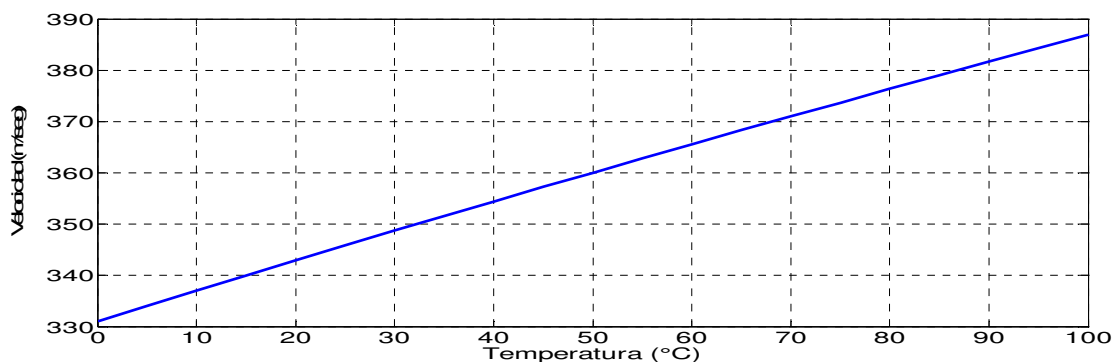


Figura 1.4 Velocidad del sonido en el aire en función de la temperatura.

Podría decirse que si nos encontramos en el Polo Norte (condiciones de extremo frío) el sonido viajara más lentamente que en el Ecuador (condiciones de calor extremo). También podría decirse que si usted se encuentra en este momento a 3 km de la playa y la temperatura es de 20 centígrados, se escucharía el quiebre de una ola grande después de 9 segundos aproximadamente.

Como ya se mencionó anteriormente, la velocidad del sonido varía con la temperatura, así como en los distintos medios de propagación. En la Tabla 1.1 se muestra la velocidad del sonido en algunos gases, líquidos y sólidos.

Tabla 1.1 Velocidad del sonido en gases, líquidos y sólidos. [2]

Velocidad del sonido en distintos medios	
Medio	v(m/s)
Gases	
Aire (20°C)	343
Aire (0°C)	331
Hidrogeno (0°C)	1286
Helio (0°C)	972
Líquidos a 25°C	
Glicerol	1904
Agua de mar	1533
Agua	1493
Keroseno	1324
Sólidos	
Vidrio Pyrex	5640
Acero	5950
Aluminio	6420
Plomo	1960

1.2.4 Reflexión

La reflexión es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial. Ejemplos comunes son la reflexión de la luz, el sonido y las ondas en el agua.

Una onda mecánica es reflejada al encontrarse con la interface del medio de propagación con otro medio de distintas propiedades dinámicas [1]. En la Figura 1.5 se muestra la relación entre la onda incidente y reflejada en una superficie especular.

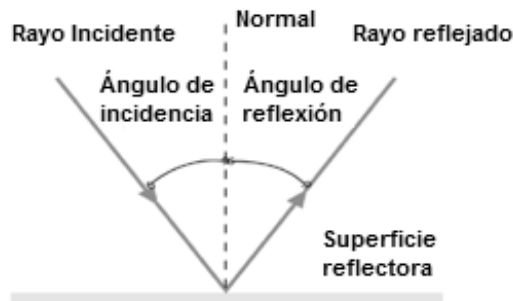


Figura 1.5 Relación entre la onda incidente y reflejada en una superficie especular.

1.2.5 Absorción acústica

La absorción acústica es cuando al incidir una onda sobre una superficie parte de la energía se refleja y otra parte es absorbida, de la energía absorbida una parte se transmite y otra es transformada en calor dentro del material en la Figura 1.6 se muestra un esquema de absorción acústica.

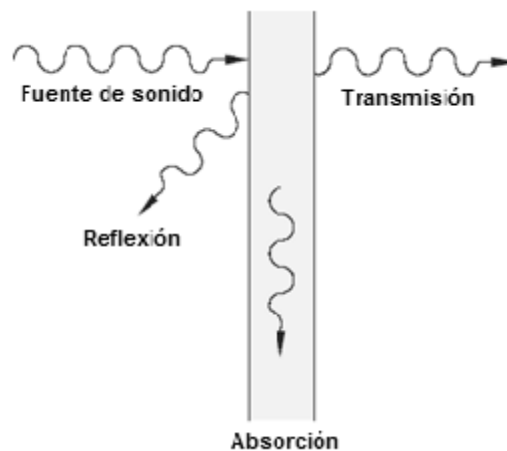


Figura 1.6 Esquema de absorción acústica.

1.2.6 Eco

Es un fenómeno acústico producido cuando una onda se refleja y regresa hacia su emisor. Puede referirse tanto a ondas sonoras como a electromagnéticas. En el caso del oído humano, para que sea percibido es necesario que el eco supere la persistencia acústica, en caso contrario el cerebro interpreta el sonido emitido y el reflejado como un mismo sonido. El mínimo retardo necesario entre ambos sonidos varía desde alrededor de 100 ms para sonidos secos hasta varios segundos para sonidos complejos, como la música. Si el sonido ha sido deformado hasta hacerse irreconocible, se denomina reverberación en vez de eco.

En la Figura 1.7 se muestra el fenómeno del eco donde una persona está hablando y su voz se refleja en una superficie y regresa hacia él con un retardo de tiempo, el retardo de tiempo puede ser o no percibido por el oído dependiendo de la distancia de la superficie reflectora.

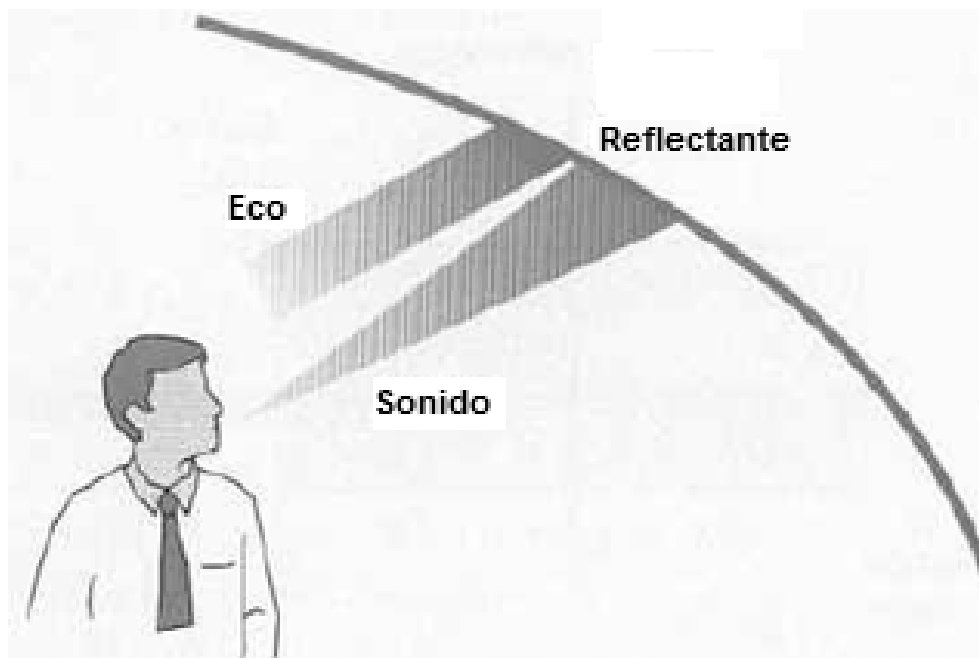


Figura 1.7 Eco del grito de una persona al ser reflejado el sonido.

1.2.7 Interferencia

Se le dice interferencia cuando la combinación de dos o más ondas que se superponen en una misma región del espacio produce una onda resultante de mayor tamaño, amplitud o la anulación de las mismas.

1.2.7.1 Interferencia constructiva

La interferencia constructiva se produce cuando dos o más ondas que viajan en la misma dirección se superponen formando una onda de mayor amplitud. En la Figura 1.8 se muestran dos ondas senoidales en fase con distinta amplitud, las cuales al interferirse forman una senoidal resultante con mayor amplitud.

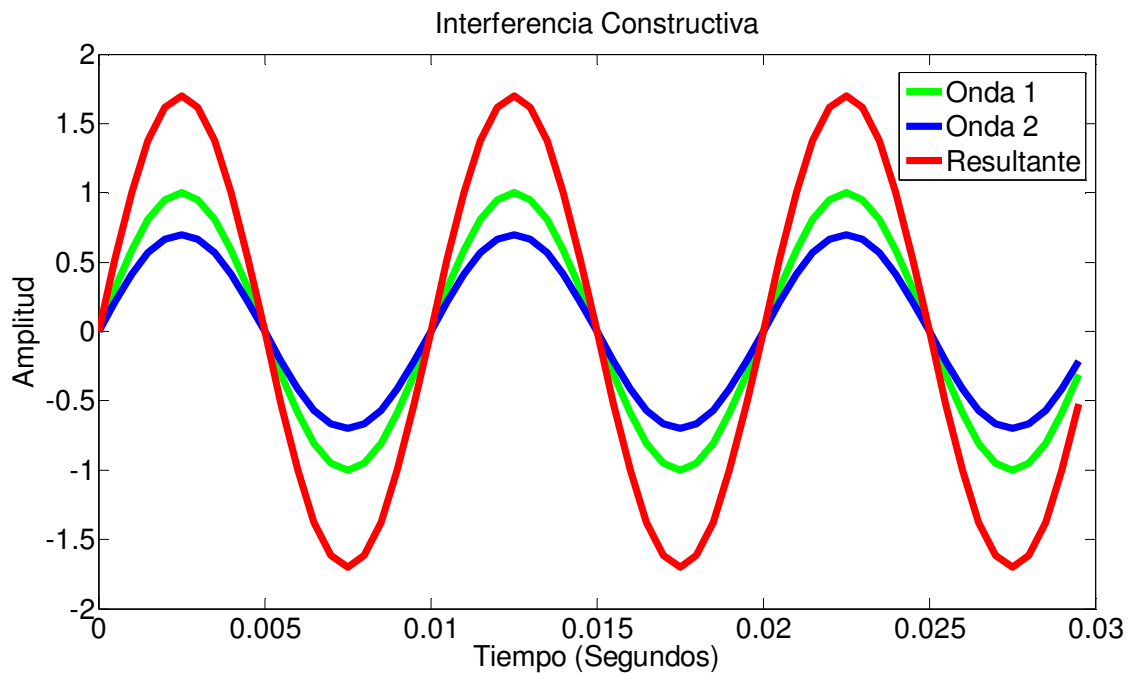


Figura 1.8 Dos ondas que al interferir constructivamente forman una onda de mayor amplitud.

1.2.7.2 Interferencia destructiva

Se produce cuando dos o más ondas viajando en dirección opuesta se superponen formando una onda de menor amplitud o, se anulan al tener ambas la misma amplitud. En la Figura 1.9 se muestran dos ondas senoidales con un ángulo de fase de 180 grados y distinta amplitud, las cuales al interferir forman una senoidal resultante con menor amplitud.

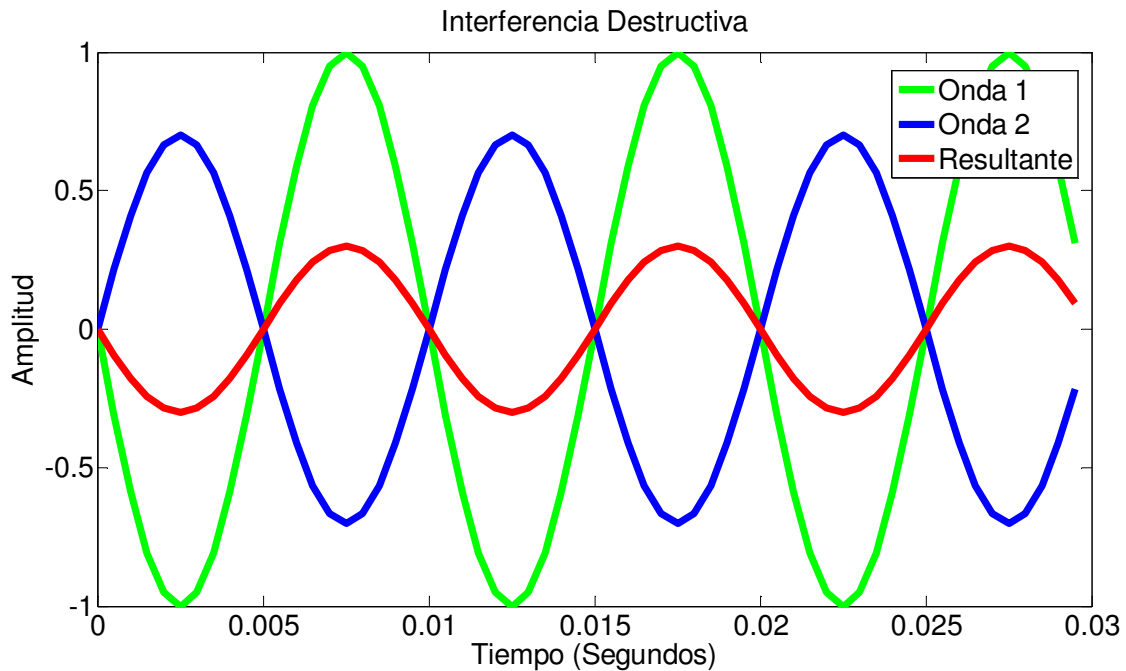


Figura 1.9 Dos ondas que al interferir de manera destructiva forman una onda de menor tamaño.

1.2.8 Impedancia acústica

Todos los sistemas acústicos simples tienen analogía con sistemas mecánicos, pueden ser representados por circuitos eléctricos en los cuales el movimiento del fluido es equivalente al flujo de corriente y la analogía eléctrica de la diferencia de presión a través de un elemento acústico es el voltaje en la parte correspondiente al circuito eléctrico. Así también como los sistemas eléctricos tienen impedancia eléctrica que es el cociente entre la tensión y la intensidad de corriente $Z=V/I$ se tiene que la impedancia acústica es el cociente entre presión y el flujo de volumen acústico $Z=p/U$. En otras palabras se puede decir que la impedancia acústica es la resistencia a la propagación de las ondas sonoras.

1.2.9 Nivel de presión sonora (SPL)

Es usual describir presiones e intensidades de sonido utilizando escalas logarítmicas conocidas como niveles de sonido. Una de las razones de esto es que hay un amplio rango de presiones e intensidades de sonido en el ambiente acústico; las intensidades audibles van desde aproximadamente 10-12 hasta los 10 W/m². Al utilizar una escala logarítmica se reduce el rango de números requerido para describir este amplio rango de intensidades y es también consistente con el hecho de que los humanos comparan el volumen relativo de dos sonidos por la proporción de sus intensidades.

La escala logarítmica más utilizada para describir niveles de sonido es el la escala del decibelio (dB). EL nivel de presión de sonido SPL está definido por:

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P_e}{P_{ref}} \right) \text{dB} \quad (2.2)$$

donde P_e es la presión medida y P_{ref} es la presión de referencia del sonido, usualmente se utiliza $P_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$ que es la presión a la que el oído humano empieza a percibir los sonidos llamado el umbral de audición.

1.2.10 Referencias de potencia de sonido

Es importante tener algunas referencias de la potencia de sonido. En la Tabla 1.2 se muestra el SPL correspondiente a algunos sonidos que el ser humano ha escuchado.

Tabla 1.2 Referencias de potencia de sonido. [2]

Fuente de sonido	Potencia de sonido (dB)
Avión jet cercano	150
Martillo hidráulico; ametralladora	130
Sirena; concierto de rock	120
Conversación normal	50
Zumbido de mosquito	40
Susurro humano	30
Umbral de audición	0

1.2.11 Fisiología del oído

Una de las aplicaciones propuestas en esta tesis es la detección de la cavidad auditiva con utilidad para auriculares manos libres, así que es necesario conocer de manera general la fisiología del oído humano, la Figura 1.10 muestra las partes que lo componen.

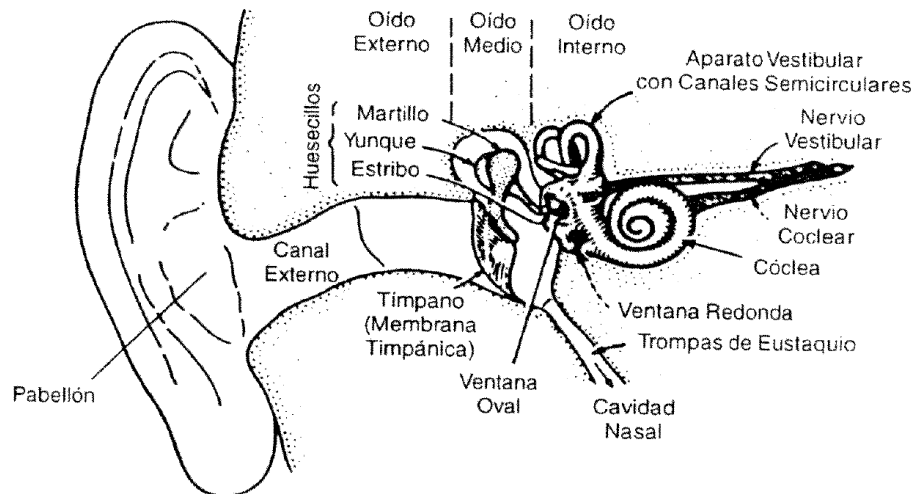


Figura 1.10 Fisiología del oído humano [3]

La región concerniente a este trabajo es el oído externo (canal auditivo y tímpano) que puede considerarse una cavidad acústica.

Al entrar el sonido por el canal auditivo e incidir en las paredes y el tímpano, parte de la energía del sonido se transmite, otra parte se refleja y la restante se absorbe[4]. Se tiene el interés de captar solamente la energía reflejada.

En el oído externo se encuentran el pabellón auditivo y el canal auditivo que tienen como función captar el sonido y llevarlo a la parte media e interna atravesando la membrana timpánica.

1.2.11.1 Dimensiones de la cavidad auditiva

Debido a la variación de las dimensiones antropométricas entre distintos individuos, es necesario conocer el promedio de estas, y de esta manera poder emplear una medida estándar para toda población. En la Tabla 1.3 se muestran algunas cantidades promedio referentes al oído.

Tabla 1.3 Dimensiones promedio de la cavidad auditiva [4]

Diámetro promedio	0.7 cm
Longitud promedio	2.7 cm
Frecuencia de resonancia	≈3.2kHz
Umbral del dolor	120 dB

1.2.12 Cajas resonantes

Las cajas resonantes forman parte de algunos instrumentos musicales acústicos principalmente de cuerda y percusión, su finalidad es la de amplificar o modular un sonido. Uno de los factores que más influyen al timbre del instrumento,

así como la madera, son su estructura y morfología jugando un papel importante para la calidad. Los instrumentos que cubren rangos de sonidos más graves, como el contrabajo, el violonchelo o el bombo, necesitan una caja de resonancia con mayores dimensiones que los instrumentos con rangos de sonidos agudos. En la Figura 1.11 se muestra una guitarra acústica que es uno de los instrumentos de cuerdas que cuenta con caja resonante.



Figura 1.11 La guitarra es un instrumento acústico con caja resonante.

1.2.13 Micrófonos, bocinas y su acoplamiento

Para emitir y captar señales acústicas, pueden utilizarse dos elementos básicos, el micrófono y la bocina. A continuación se definen y se muestran algunos tipos de ellos. También se muestran dos configuraciones de amplificadores operacionales; para micrófono electret y para bocina.

1.2.13.1 Micrófonos

Un micrófono es un transductor electro-acústico que convierte las vibraciones o variaciones de presión de sonido en correspondientes variaciones de corriente eléctrica. La amplitud del voltaje CA generado por el micrófono es proporcional a la intensidad del sonido, mientras la frecuencia de la señal de salida corresponde a la frecuencia del sonido [6]. En la Figura 1.12 se muestra un micrófono para voz marca SHURETM con presentación comercial.[5]



Figura 1.12 Micrófono SHURE™ para voz.[6]

1.2.13.1.1 Especificaciones de micrófonos

Siendo el micrófono un sensor es importante mencionar las principales especificaciones que deben ser consideradas, mismas que pueden ser encontradas en las hojas de datos del fabricante para el modelo elegido. Estas especificaciones son:

1. Sensibilidad (dB)
2. Respuesta en frecuencia (Hz)
3. Directividad
 - a) Omnidireccional
 - b) Bidireccional
 - c) Cardioide
 - d) Supercardioide
 - e) Hipercardioide
4. Impedancia (Ω)

En el Apéndice D pueden ser consultadas las especificaciones del micrófono de condensador electret DB-C9752, utilizado en el desarrollo de los experimentos de esta tesis.

1.2.13.1.2 Micrófono electret

Es un tipo de micrófono de condensador, que elimina la necesidad de una fuente de polarización utilizando un material permanentemente cargado. Un electret es un material dieléctrico estable con una carga electrostática permanente. En la Figura 1.13 se muestra la forma en que está construido un micrófono electret.

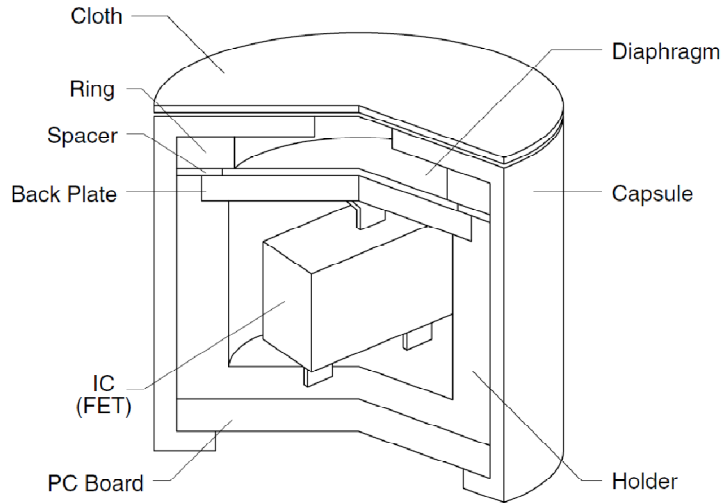


Figura 1.13 Estructura de un micrófono electret.[7]

Para amplificar las señales obtenidas por el micrófono es necesario utilizar amplificadores y filtros, los cuales brindan la ganancia y discriminación de frecuencias según sea la necesidad de la aplicación. En la Figura 1.14 se muestra una configuración de un circuito a base de amplificador operacional como preamplificador de micrófono.

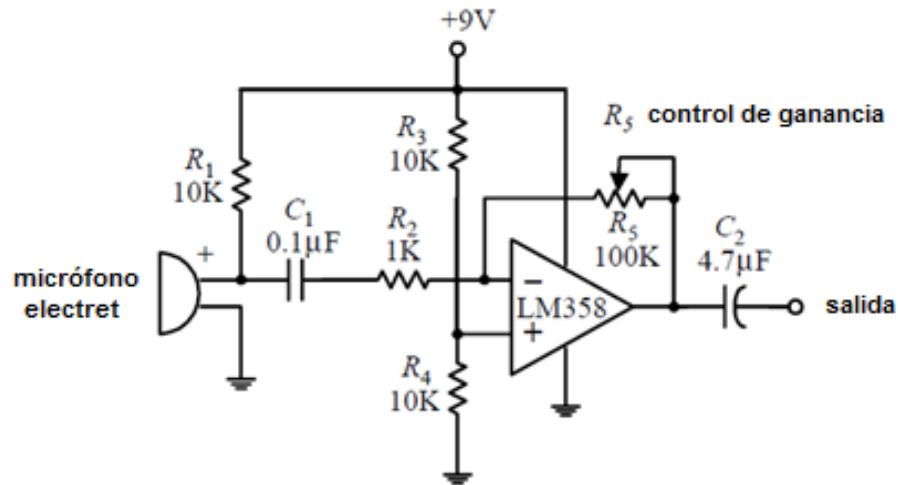


Figura 1.14 Preamplificador para micrófono electret con el CI LM358. [5]

1.2.13.1.3 Micrófono de condensador

A los micrófonos de condensador también se les llama micrófonos de capacitor o micrófonos electrostáticos, está formado por un diafragma y una placa rígida. Las dos actúan como las placas de un capacitor, al incidir el sonido sobre el diafragma se genera un movimiento incrementando o disminuyendo la distancia entre las placas y esto se traduce en variaciones de capacitancia [5]. En la Figura 1.15 se muestra la estructura de un micrófono de condensador.

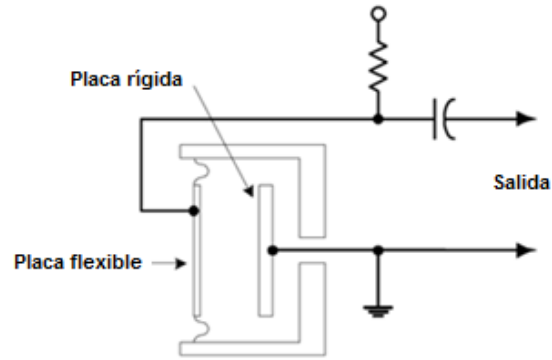


Figura 1.15 Micrófono de condensador. [5]

1.2.13.1.4 Micrófono inductivo

A los micrófonos inductivos también se les llama micrófonos de bobina móvil o micrófonos dinámicos, está formado por un diafragma, una bobina y un imán permanente. El diafragma está fijo a la bobina que está devanada alrededor del imán permanente al igual que en una bocina. Al incidir el sonido sobre el diafragma este vibra haciendo mover a la bobina la cual produce un cambio de corriente debido a inducción electromagnética [5]. En la Figura 1.16 se muestra la estructura de un micrófono de bobina.

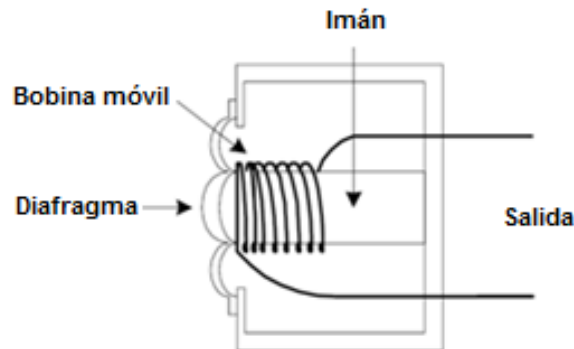


Figura 1.16 Estructura de un micrófono inductivo. [5]

1.2.13.1.5 Acoplamiento para bocina

Para reproducir las señales de prueba se utiliza una bocina, por lo que es necesario hacer un acoplamiento, se utiliza un amplificador operacional como seguidor de voltaje para excitar la bobina de una bocina. En la Figura 1.17 se muestra una configuración de circuito a base de amplificador operacional para acoplamiento de bocina con el integrado LM358.

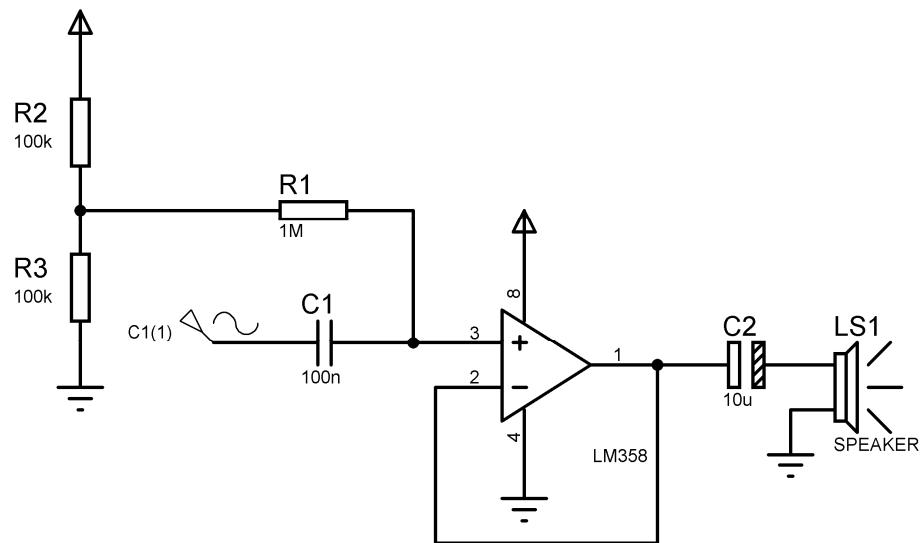


Figura 1.17 Amplificador para acoplamiento de bocina con el CI LM358.

Capítulo 2. Identificación de sistemas

2.1 Introducción

La identificación de sistemas es el área de teoría de sistemas que estudia metodologías para la estimación de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de mediciones observadas a la entrada y salida del sistema. Es necesario recurrir a la identificación de sistemas cuando se complica el modelado teórico al utilizar las leyes de la física.

El término identificación de sistemas fue acuñado por Lofti Zadeh en 1962, como: “Identificación es la determinación, en base a la entrada y la salida, de un sistema, dentro de una clase de sistemas especificada, al cual el sistema probado es equivalente”[8].

Existen distintos tipos de modelos para los sistemas; modelos mentales, intuitivos o verbales, que carecen de formalismo matemático, modelos no paramétricos y modelos paramétricos o matemáticos, en este último los sistemas se pueden clasificar en determinísticos o estocásticos, dinámicos o estáticos y continuos o discretos.

En la etapa de prueba de concepto, utilizando la FFT, se realiza una identificación no-paramétrica al obtener solamente la respuesta en frecuencia, y en la etapa final se utilizan los modelos AR (Auto-regresivo), MA (Promedio Móvil) y ARMA (Auto-regresivo de Promedio Móvil) para la identificación paramétrica, obteniendo como resultado una ecuación de diferencias, y a partir de esta, su función de transferencia. Estos modelos serán descritos en secciones subsecuentes.

2.2 Señales de prueba

Para realizar la identificación de un sistema es necesario utilizar señales de prueba, las cuales deben de cumplir con una serie de características; tener una componente de corriente directa conocida y adecuada dentro del rango de operación, así como ser rica en contenido espectral. [9]

Algunas de las señales de prueba más utilizadas son: secuencia binaria, PRBS (Secuencia Binaria Pseudoaleatoria), pulsos múltiples, senoidales, y RGB entre otras. En esta tesis solamente se utiliza la señal senoidal, haciendo un barrido en frecuencia para la identificación no-paramétrica y el RGB para la identificación paramétrica.[10]

2.2.1 Barrido en frecuencia

Se utiliza esta señal para hacer un análisis de la respuesta en frecuencia por el método de barrido en frecuencia SFRA (Sweep Frequency Response Analysis). Se genera una señal senoidal con amplitud pico de 5V y una componente de DC de 0V, se incrementa la frecuencia linealmente, 100 Hz cada segundo de manera discreta en el rango de 100 a 10KHz. Otra forma en la que se puede realizar el barrido en frecuencias es generando un chirp lineal[11]. En la Figura 2.1 se muestra un segmento de un chirp lineal.

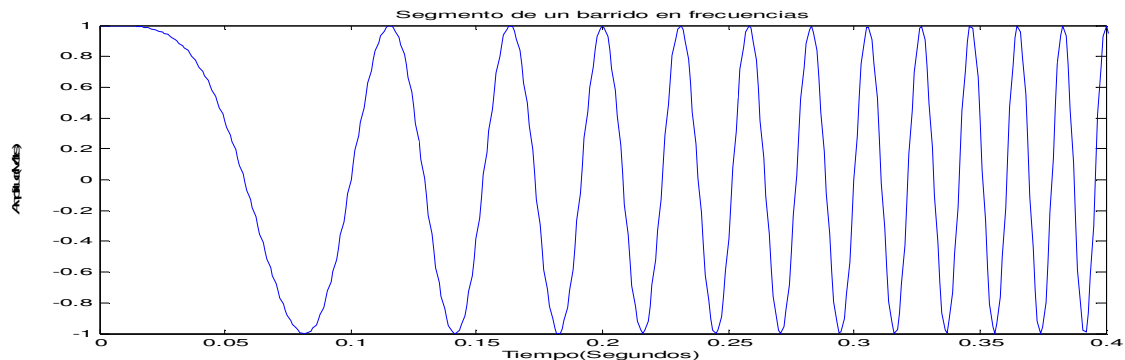


Figura 2.1 Chirp lineal.

En la Figura 2.2 se muestra el espectrograma de un chirp lineal, donde puede apreciarse el comportamiento de la secuencia, como va incrementando la frecuencia al transcurrir el tiempo, y también se puede hacer una estimación de la tasa de cambio.

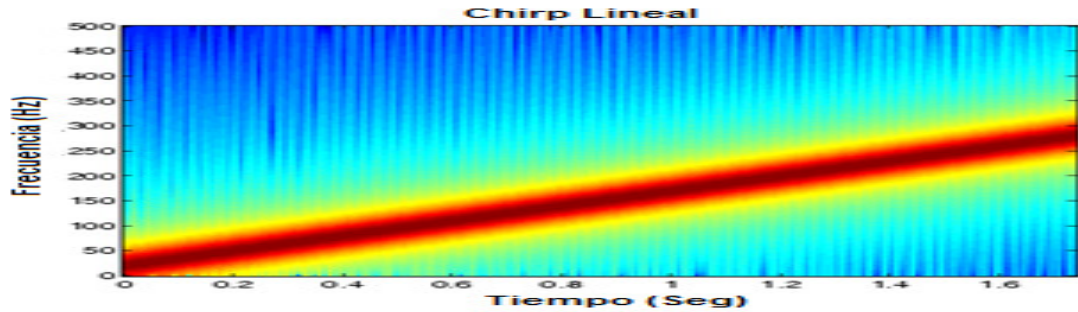


Figura 2.2 Espectrograma de un chirp lineal.

2.2.2 Ruido blanco gaussiano (RGB)

El ruido blanco gaussiano es un proceso estocástico con una distribución de frecuencias normal o gaussiana, su densidad espectral de potencia (DEP) es constante y su función de autocorrelación es un impulso. Si la DEP del RGB no es plana se dice que el ruido está coloreado (correlacionado) [12][10][13]. En la Figura 2.3 se muestra la distribución de la densidad de probabilidad del RGB.

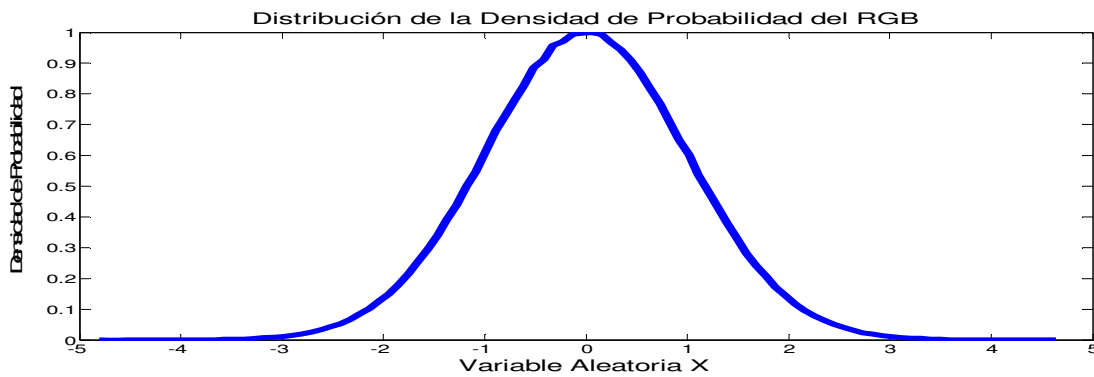


Figura 2.3 Distribución de la densidad de probabilidad del RGB.

En la Figura 2.4 se muestra la densidad de probabilidad acumulada del RGB, la cual se puede apreciar que en segmentos la curva se comporta de manera exponencial.

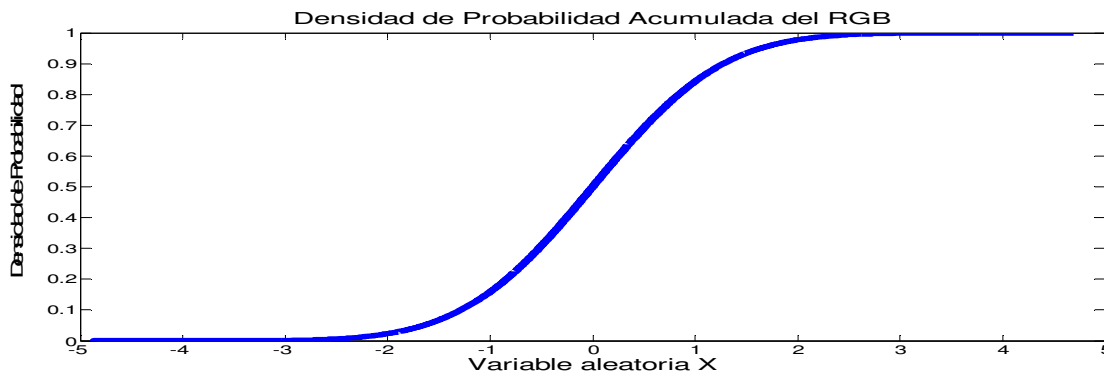


Figura 2.4 Densidad de probabilidad acumulada del RGB.

Las características con las que cuenta el RGB, permiten que pueda ser utilizado como secuencia de entrada en sistemas SLIT, para la identificación de estos mediante modelos paramétricos, ya que es posible excitar un sistema en todo su ancho de banda. A continuación se presenta el método de Gold and Rader (G&R) para la generación de secuencias de RGB.

2.2.2.1 Método de Gold and Rader (G&R)

El método de Gold and Rader es un algoritmo sencillo y eficaz para generar una secuencia de RGB [14]. A continuación se presenta el procedimiento para generar el RGB mediante este método.

Procedimiento:

1. Proponer la varianza σ de la secuencia
2. Generar una secuencia pseudoaleatoria $G(n)$ con distribución uniforme

$$0 \leq G(n) \leq 1$$

3. Utilizando la ecuación (2.1) calcular los coeficientes $R(n)$ de cada una de la muestras de RGB $y(n)$

$$R(n) = \sigma \sqrt{2 \ln \left(\frac{1}{G(n)} \right)} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.1)$$

4. Calcular $y(n)$ utilizando las ecuaciones (2.2) y (2.3), para obtener la secuencia final que corresponde al RGB

$$y(n) = R(n) \cos(2\pi G(n+1)) \quad n \in \text{pares} \quad (2.2)$$

$$y(n+1) = R(n) \sin(2\pi G(n+1)) \quad n \in \text{pares} \quad (2.3)$$

En la Figura 2.5 se muestra una secuencia de 50 muestras de RGB generado, utilizando el método de G&R.

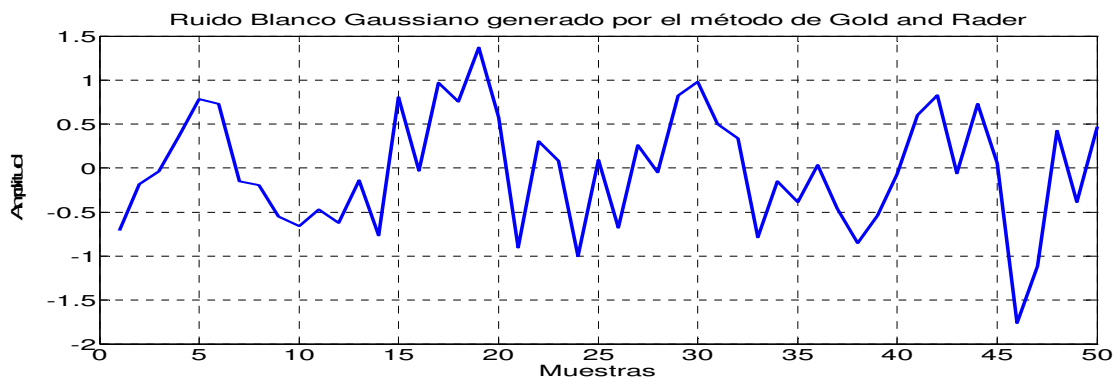


Figura 2.5 RGB generado mediante el método de G&R.

En la Figura 2.6 se muestra la autocorrelación de la señal de ruido generada, en la cual se puede ver el impulso al centro de la secuencia, una de las propiedades mencionada anteriormente.

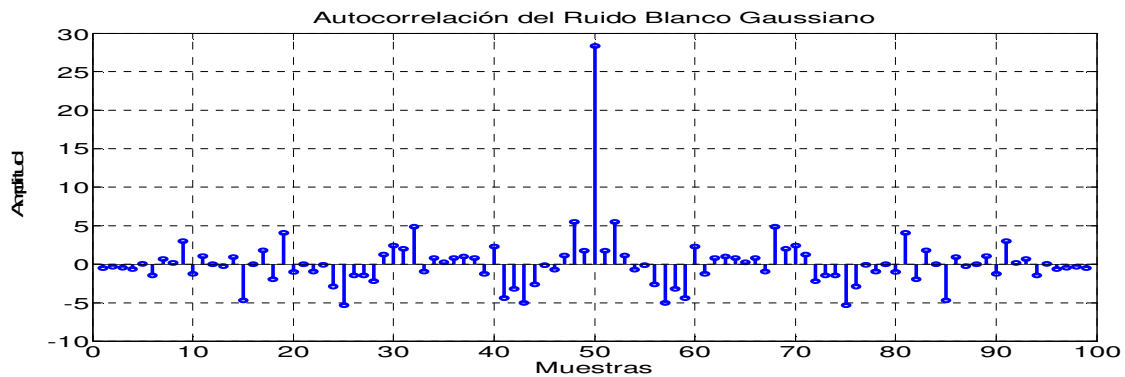


Figura 2.6 Impulso al hacer la autocorrelación del RGB.

En la Figura 2.7 se muestra la densidad espectral de potencia para 10,000 muestras generadas de RGB, que se aproxima a un espectro plano, esto quiere decir que la distribución de frecuencias en el espectro es uniforme.

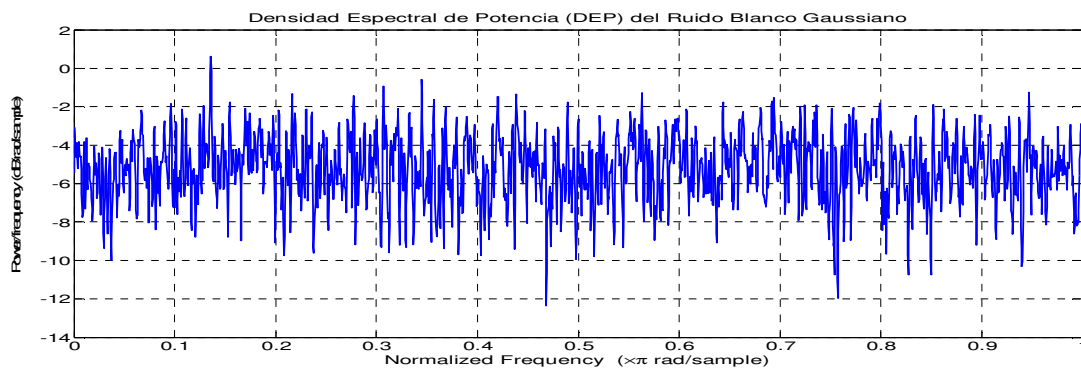


Figura 2.7 Densidad espectral de potencia del RGB.

En la Figura 2.8 se muestran los histogramas de cuatro secuencias de RGB generadas con el método de G&R, en cada una de las secuencias se va aumentando el número de muestras N , en estos se puede apreciar que conforme va aumentando N el histograma va adoptando una distribución normal o gaussiana más definida.

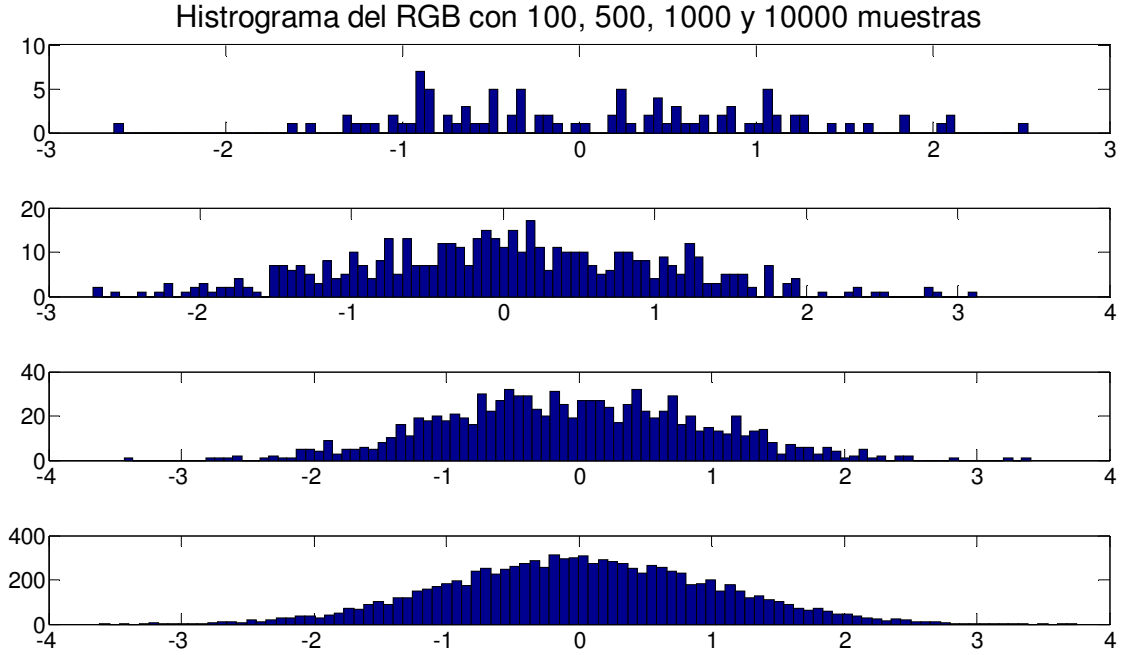


Figura 2.8 Histogramas de cuatro secuencias de RGB.

2.3 Autocorrelación

La correlación cruzada es la similitud entre dos señales en función de su desplazamiento en el tiempo. A la correlación cruzada de una señal consigo misma se le llama autocorrelación. Una de las aplicaciones más comunes de la autocorrelación es la detección de periodicidad o repetición en una señal, sin embargo otra aplicación interés de esta tesis es la obtención del espectro de una señal utilizando métodos paramétricos como el Modelo AR (Auto-regresivo), Modelo MA (Moving-Average) y Modelo ARMA (Auto-regresive with moving average).[15] [16]

La función de autocorrelación en tiempo continuo está definida por:

$$\Phi_{xx}(\tau) = \frac{1}{t-\tau} \int_0^{t-\tau} x(t)x(t+\tau) \quad (2.5)$$

Donde τ es el desplazamiento en el tiempo.

La secuencia discreta para la obtención de la correlación está dada por:

$$R_{xx} = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x(n)x(n+m) \quad [m = 0,1,2, \dots M < N] \quad (2.6)$$

Donde:

N = número total de muestras

m = desplazamiento

M = número total de desplazamientos ($M < N$)

En la Figura 2.9 se muestra la secuencia de autocorrelación de una señal senoidal, en la cual se puede apreciar que esta conserva su periodicidad.

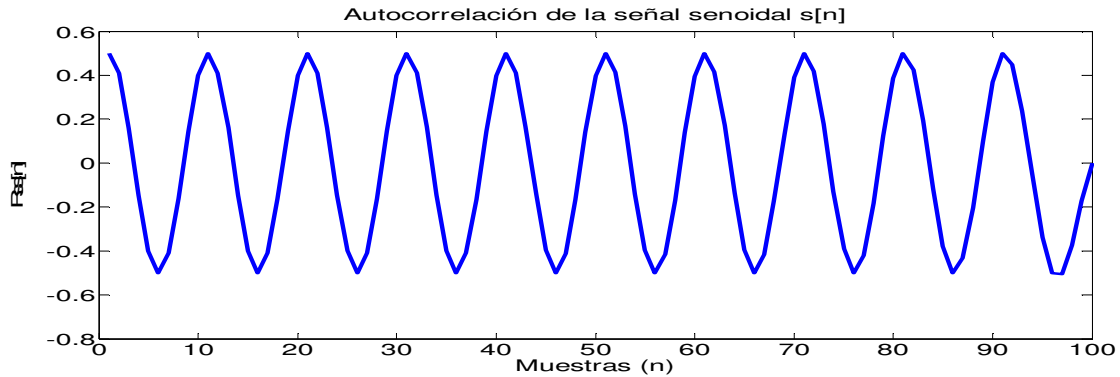


Figura 2.9 Conservación de la periodicidad de una señal al aplicar la autocorrelación.

Para mostrar como al aplicarle la autocorrelación a una señal antes de aplicar la TRF mejora la estimación del espectro, se genera una secuencia senoidal de 100 muestras, amplitud 1, frecuencia de 1kHz, frecuencia de muestreo de 10kHz, sumándole RGB con varianza 5.40, para posteriormente mostrar gráficos. La secuencia está dada por

$$x(n) = A \sin(2\pi fnT) + w(n) \quad (2.7)$$

En la Figura 2.10 se muestra la señal generada con la secuencia (2.7), aunque esta no es muy marcada, puede apreciarse una periodicidad inmersa en el ruido.

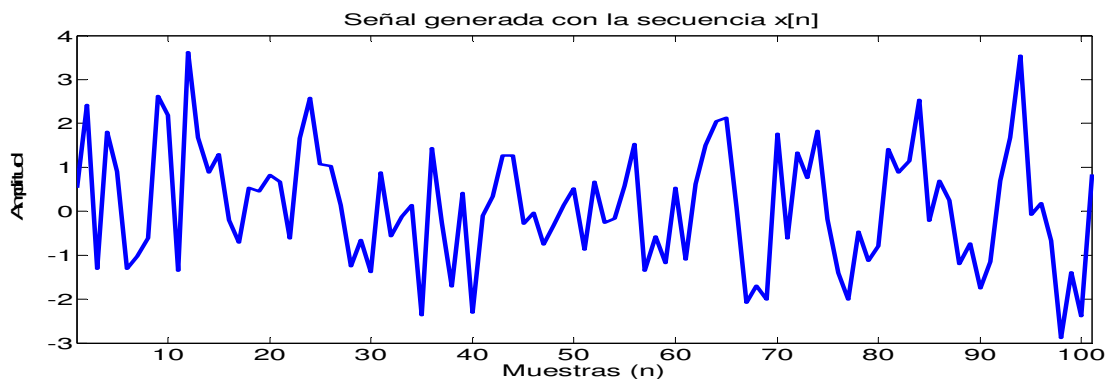


Figura 2.10 Secuencia de una señal senoidal con ruido.

En la Figura 2.11, utilizando la TRF, se presenta el espectro de la señal mostrada en la Figura 2.10, en la que se puede ver un nivel relativamente alto de ruido por debajo de los 0.45 volts.

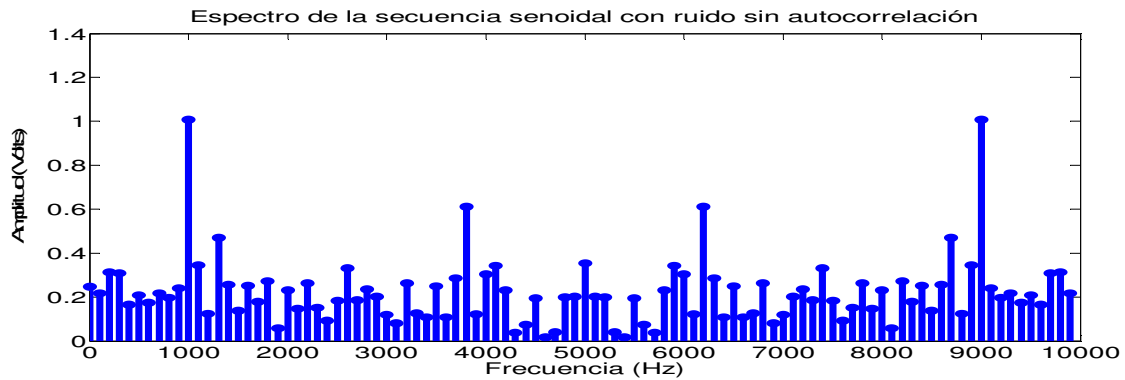


Figura 2.11 Espectro de la secuencia (2.7).

En la Figura 2.12 se muestra la secuencia de autocorrelación R_{xx} de (2.7), donde puede observarse un impulso con amplitud considerablemente mayor a las demás muestras debido al RGB y una periodicidad a través de toda la secuencia debida a la señal senoidal.

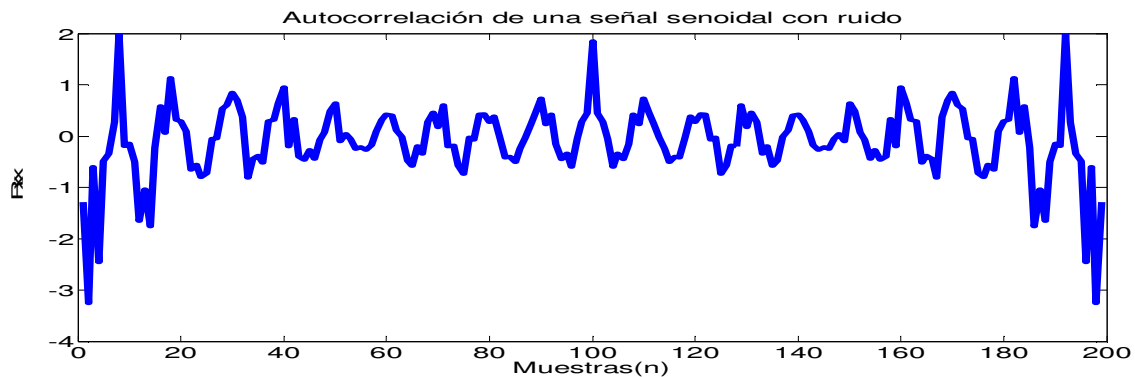


Figura 2.12 Autocorrelación de la secuencia (2.7).

En la Figura 2.13, mediante el uso de la TRF, se presenta el espectro de la señal de autocorrelación mostrada en la Figura 2.11, donde puede apreciar que hay un menor nivel de ruido y la componente fundamental está más marcada.

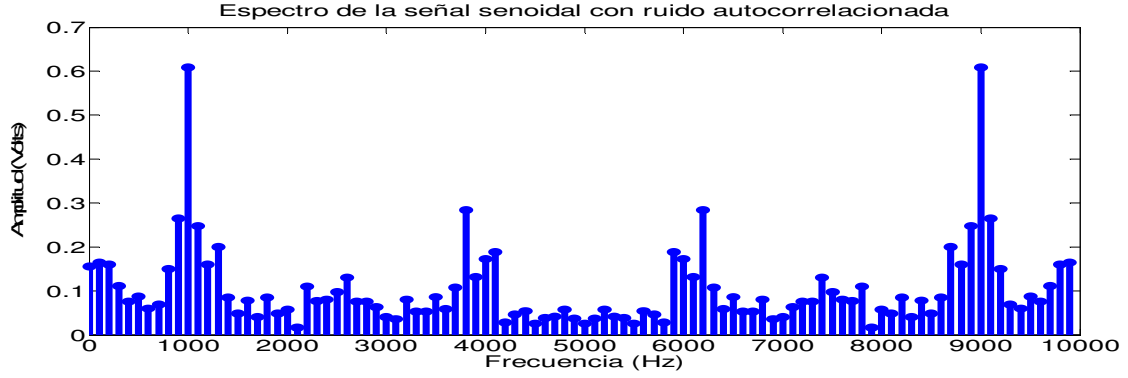


Figura 2.13 Espectro de la autocorrelación de la secuencia (2.7).

2.4 Matriz de autocorrelación

En los modelos paramétricos (AR, MA, ARMA), es común la utilización de matrices de autocorrelación para algunos de los métodos de obtención de parámetros, de ahí la importancia de mostrar algunos conceptos relacionados.

Una matriz de autocorrelación está definida por una matriz Toeplitz simétrica de la forma:

$$R = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_{N-1} \\ r_1 & r_0 & r_1 & \dots & \vdots \\ r_2 & r_1 & r_0 & \dots & r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & r_1 \\ r_{N-1} & \dots & r_2 & r_1 & r_0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Una matriz Toeplitz es una matriz cuadrada $T_n = [t_{r,c}; r, c = 0, 1, \dots, n-1]$ donde $t_{r,c} = t_{r-c}$, i.e. una matriz Toeplitz:

$$T_n = \begin{bmatrix} a_0 & a_{-1} & a_{-2} & \dots & a_{-(n-1)} \\ a_1 & a_0 & a_{-1} & \ddots & \vdots \\ a_2 & a_1 & a_0 & \ddots & a_{-2} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & a_{-1} \\ a_{n-1} & \dots & a_2 & a_1 & a_0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Una matriz Toeplitz Simétrica es una matriz cuadrada $T_n = [t_{|r,c|}; r, c = 0, 1, \dots, n-1]$ donde $t_{r,c} = t_{r-c}$, i.e. una matriz de la forma:

$$T_n = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} \\ a_1 & a_0 & a_1 & \ddots & \vdots \\ a_2 & a_1 & a_0 & \ddots & a_2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & a_1 \\ a_{n-1} & \dots & a_2 & a_1 & a_0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

donde la r_n es el n -ésimo elemento de la autocorrelación.

2.5 Identificación y densidad espectral de potencia utilizando modelos paramétricos

En esta sección se aborda de manera general algunos modelos paramétricos para la identificación de sistemas y la obtención de la DEP. Se presentan los modelos ARMA, AR y MA, se muestran sus funciones de transferencia y sus secuencias discretas, así como la matriz expandida de estas últimas. También se muestran las ecuaciones para obtener la densidad espectral de potencia (DEP) utilizando cada uno de los modelos.

En la Figura 2.14 se muestra el esquema general de identificación paramétrica de un sistema con un modelo autorregresivo.

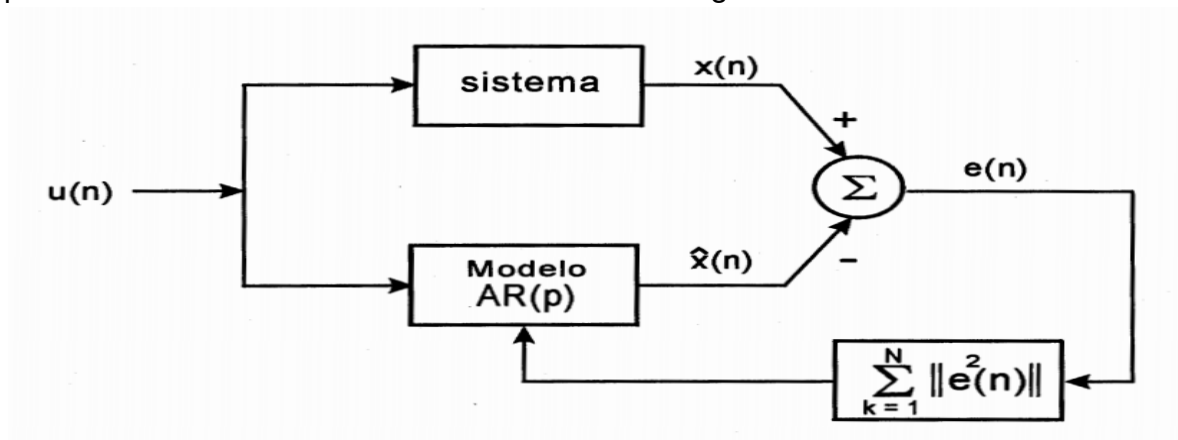


Figura 2.14 Esquema de identificación paramétrico con un modelo AR [15]

2.5.1 Modelo Autorregresivo con Promedio Móvil (ARMA)

Un modelo ARMA es un modelo con función de transferencia de la forma:

$$H(z) = \frac{X(z)}{U(z)} = \frac{\sum_{r=0}^q b_r z^{-r}}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (2.14)$$

El cual en el numerador está compuesto por un modelo de Promedio Móvil MA con orden q y en el denominador corresponde a un modelo Autorregresivo AR con orden p. La secuencia discreta que describe al modelo ARMA está dada de la forma:

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + \sum_{r=0}^q b_r u(n-r) \quad (2.15)$$

Al expandir la serie en (2.15) se puede formar un sistema de ecuaciones, la utilidad de este sistema de ecuaciones radica en la posibilidad de obtener los parámetros autorregresivos y de media móvil para conocer tanto la entrada como la salida de un sistema, y de esta manera poder determinar la función de transferencia al sustituir estos parámetros en (2.14)

$$\begin{bmatrix} x(0-1) & x(0-2) & \dots & x(0-p) & u(0-0) & u(0-1) & \dots & u(0-q) \\ x(1-1) & x(1-2) & \dots & x(1-p) & u(1-0) & u(1-1) & \dots & u(1-q) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-1) & x(N-2) & \dots & x(N-p) & u(N-0) & u(N-1) & \dots & u(N-q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \\ \vdots \\ -a_p \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Una vez se determinan la varianza y los parámetros es posible obtener la DEP mediante la ecuación:

$$P_{ARMA}(f) = \sigma^2 \frac{|1 + \sum_{k=1}^q b_k e^{-j2\pi f k}|^2}{|1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j2\pi f k}|^2} \quad (2.17)$$

En la Figura 2.15 se muestra el espectro cualitativo de un modelo ARMA, se puede ver como contribuye el modelo AR con picos marcados y el modelo MA con curvaturas suavizadas.

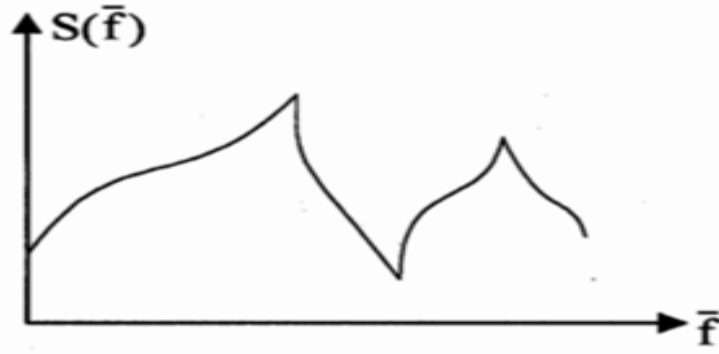


Figura 2.15 Espectro cualitativo de un modelo ARMA[15]

2.5.2 Modelo Autorregresivo (AR)

Un modelo AR es un modelo con función de transferencia todo polos (All-Poles) de la forma:

$$H(z) = \frac{X(z)}{U(z)} = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (2.18)$$

Donde el orden de la función de transferencia está determinado por p. La secuencia discreta está dada por:

$$x(n) = u(n) - \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) \quad (2.19)$$

Al reacomodar la ecuación (2.19) se tiene la siguiente secuencia:

$$u(n) - x(n) = \sum_{k=1}^p a_k x(n-k) \quad (2.20)$$

Que al realizar su expansión nos resulta en un sistema de ecuaciones como el siguiente:

$$\begin{bmatrix} x(0-1) & x(0-2) & \dots & x(0-p) \\ x(1-1) & x(1-2) & \dots & x(1-p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(n-1) & x(n-2) & \dots & x(n-p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(1) \\ a(2) \\ \vdots \\ a(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(0) - x(0) \\ u(1) - x(1) \\ \vdots \\ u(n) - x(n) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Al conocer la entrada $u(n)$ y la salida $x(n)$ este sistema de ecuaciones facilita la determinación de los parámetros autorregresivos.

Una de las utilidades del modelo Autorregresivo es la determinación de la DEP de una señal, para esto es necesario el uso de la autocorrelación y las ecuaciones de Yule-Walker. Anteriormente en (2.6) se mostró la secuencia para la autocorrelación y en (2.8) como se forma la matriz de autocorrelación. Las ecuaciones de Yule-Walker obedecen a la forma:

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 & \dots & r_p \\ r_1 & r_0 & r_1 & \dots & r_{p-1} \\ r_2 & r_1 & r_0 & \dots & r_{p-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_p & r_{p-1} & r_{p-2} & \dots & r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^2 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Que es un sistema de ecuaciones de orden p. Dado que en ocasiones no se conoce el parámetro de varianza, conviene modificar o reacomodar el sistema a la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} 1 & r_1 & r_2 & \dots & r_p \\ 0 & r_0 & r_1 & \dots & r_{p-1} \\ 0 & r_1 & r_0 & \dots & r_{p-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & r_{p-1} & r_{p-2} & \dots & r_{p-p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma^2 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_p \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Una vez se determinan la varianza y los parámetros autorregresivos es posible obtener la DEP mediante la ecuación:

$$P_{AR}(f) = \frac{\sigma^2}{|1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j2\pi f k}|^2} \quad (2.24)$$

En la Figura 2.16 se muestra el espectro cualitativo de un modelo AR, el cual las componentes espectrales están muy marcadas.

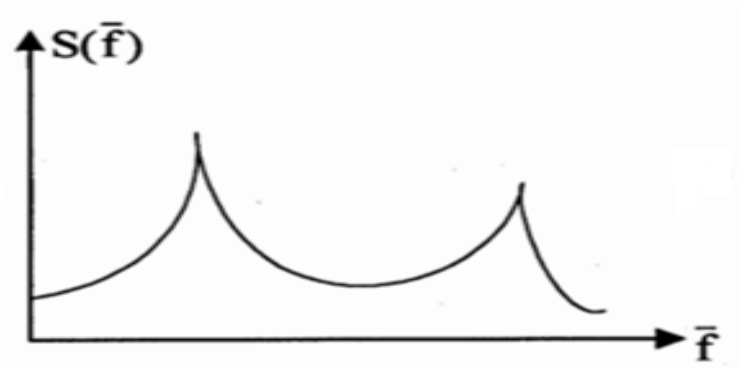


Figura 2.16 Espectro cualitativo de un modelo AR[15].

2.5.3 Modelo de Promedio Móvil (MA)

Un modelo MA es un modelo con función de transferencia todo ceros (All-Zeros) de la forma:

$$H(z) = \frac{X(z)}{U(z)} = \sum_{r=0}^q b_r z^{-r} \quad (2.25)$$

Donde el orden de la función de transferencia está determinado por q . La secuencia discreta está dada por:

$$x(n) = \sum_{r=0}^q b_r u(n-r) \quad (2.26)$$

Al realizar la expansión de (2.25) nos resulta en un sistema de ecuaciones como el siguiente:

$$\begin{bmatrix} u(0-0) & u(0-1) & u(0-2) & \dots & u(0-q) \\ u(1-0) & u(1-1) & u(1-2) & \dots & u(1-q) \\ u(2-0) & u(2-1) & u(2-2) & \dots & u(2-q) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(N-0) & u(N-1) & u(N-2) & \dots & u(N-q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Una vez se determinan la varianza y los parámetros es posible obtener la DEP mediante la ecuación:

$$P_{MA}(f) = \sigma^2 \left| 1 + \sum_{k=1}^q b_k e^{-j2\pi f k} \right|^2 \quad (2.28)$$

En la Figura 2.17 se muestra el espectro cualitativo de un modelo MA, se pueden ver que las componentes espectrales no están muy marcadas como en el caso del modelo AR, si no que se ven curvas suavizadas debido al promediado.

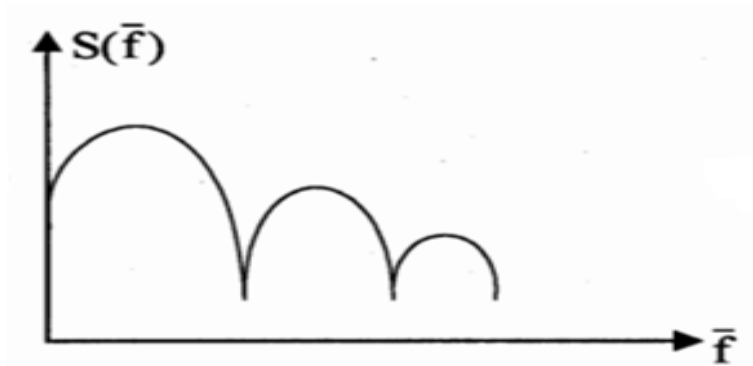


Figura 2.17 Espectro cualitativo de un modelo MA [15].

Capítulo 3. SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) y reconocimiento de cavidades acústicas: canal auditivo, caja acústica y botella.

3.1 Introducción

Se utilizan principios de acústica, técnicas clásicas y también de análisis espectral moderno para hacer una identificación paramétrica y no paramétrica de tres tipos de cavidades acústicas, el canal auditivo humano, cajas acústicas y envases contenedores de líquido.

Haciendo uso del concepto de impedancia acústica [1], se sabe que una cavidad tiene una curva de respuesta en frecuencia particular en función de su forma, materiales, medio de propagación etc. Se busca aprovechar este fenómeno para identificar las distintas cavidades.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para la identificación de las cavidades anteriormente mencionadas, se utiliza el método de SFRA, el modelo Auto-regresivo (AR-Autoregressive), el modelo de promedio móvil (MA) y el cálculo del Coeficiente de Correlación de Pearson, en combinación con cada una de las técnicas, se hace una comparación de la respuesta o modelo obtenido contra patrones de referencia.

SFRA utiliza un esquema de pruebas distinto al modelo AR y MA. Cada uno de los esquemas así como sus detalles son abordados posteriormente en este capítulo.

Este trabajo tiene una posible aplicación en auriculares manos libres para la detección de colocación del dispositivo en la cavidad auditiva y en la manufactura de cajas para guitarras acústicas en pruebas de replicado.

Para la identificación utilizando SFRA se utiliza el software de instrumentación virtual LABVIEW y la plataforma de prototipo y pruebas NI-ELVIS.

3.2 Esquema de hardware

En la Figura 3.1 se muestra la parte correspondiente al esquema de hardware (parte física). La parte física está formada por una primera etapa de generación/emisión de señales de prueba se utiliza LabVIEW con interfaz al generador de funciones del NI-ELVIS II+ utilizando como salida el conector FGEN BNC, una sub-etapa de acoplamiento a una bocina de imán permanente que consiste en un preamplificador con operacionales, la segunda etapa es la de recepción formada por una sub-etapa de acoplamiento con amplificador operacional para micrófono electret al osciloscopio del NI-ELVIS II+, este último hace la adquisición a través del conector de entrada CH 0 BNC y transmite los datos de las mediciones al programa de LabVIEW donde se realiza el procesamiento.

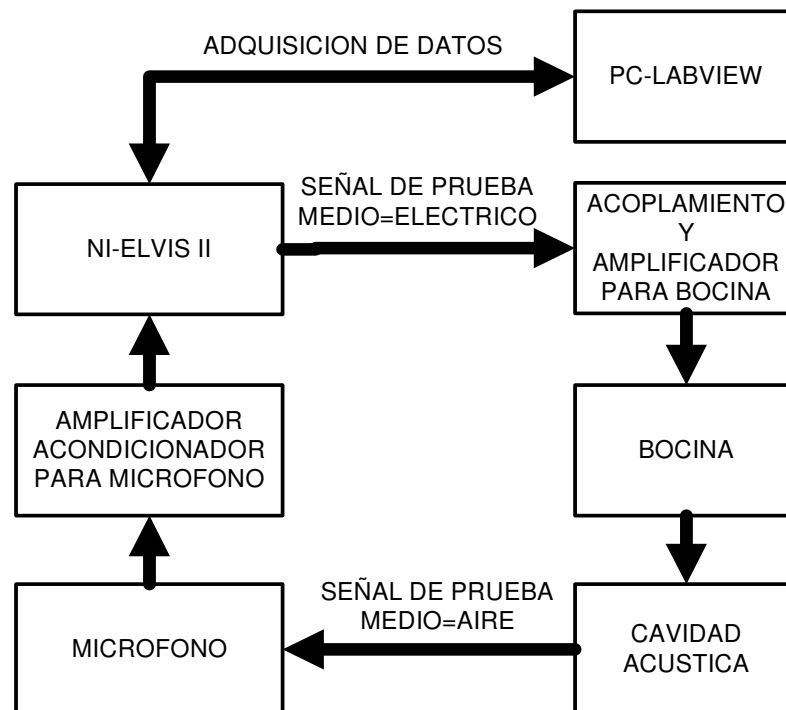


Figura 3.1 Esquema de hardware.

En la Figura 3.2 se muestra el montaje de pruebas a la izquierda la PC muestra la interfaz de pruebas desarrollada, en medio se tiene el NI-ELVIS y la derecha 3 botellas (cavidades acústicas).

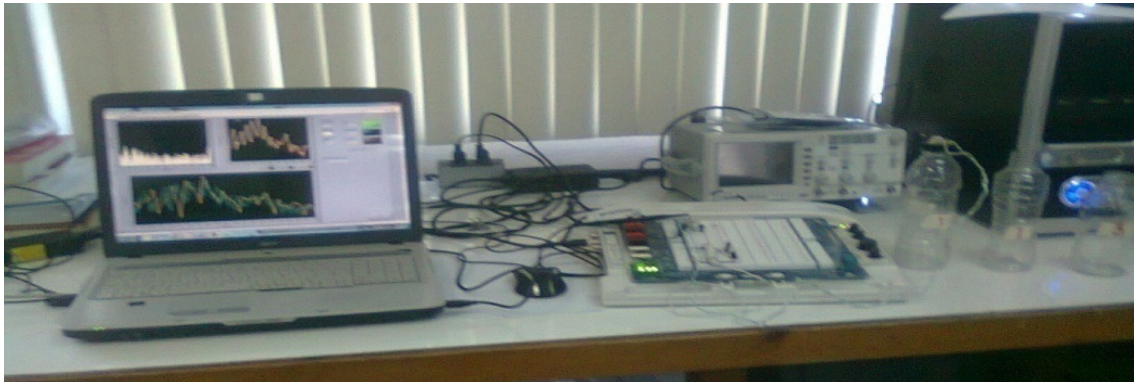


Figura 3.2 Montaje de pruebas con el ELVIS.

Como ya se mencionó anteriormente, el sensor consiste en un micrófono electret, una bocina y una tapa de envase líquido. En la Figura 3.3 se puede apreciar la estructura del sensor que se utiliza para las pruebas en el oído y envases.

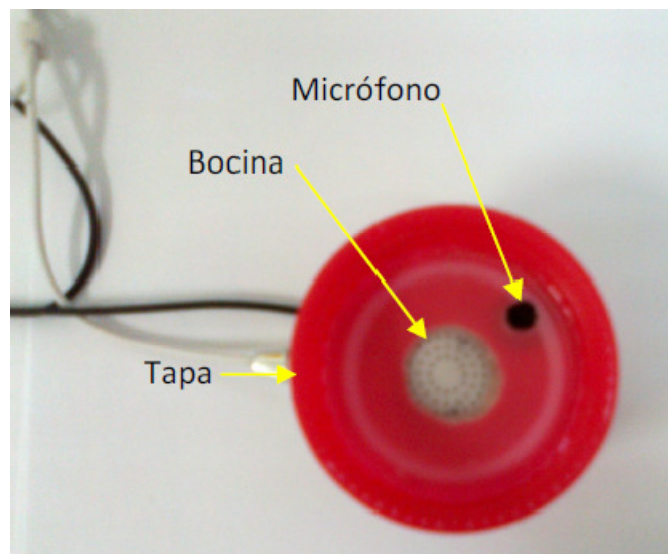


Figura 3.3 Sensor para pruebas en oído y envases.

En la Figura 3.4 se muestra la forma en que se coloca el sensor en el oído para hacer la prueba y reconocimiento. El sensor queda concéntrico al pabellón del oído.



Figura 3.4 Colocación del sensor en el oído.

En la Figura 3.5 se muestra la forma en que se coloca el sensor en los envases contenedores de líquido.



Figura 3.5 Montaje del sensor en prueba a envases.

En la Figura 3.6 se muestra el sensor construido utilizando el sensor de la Figura 3.3 acoplado a una pieza de cartón que fue recortada de manera semicircular en uno de sus extremos para ser adaptada a la geometría de la guitarra y quedar concéntrica a la boca de la caja.

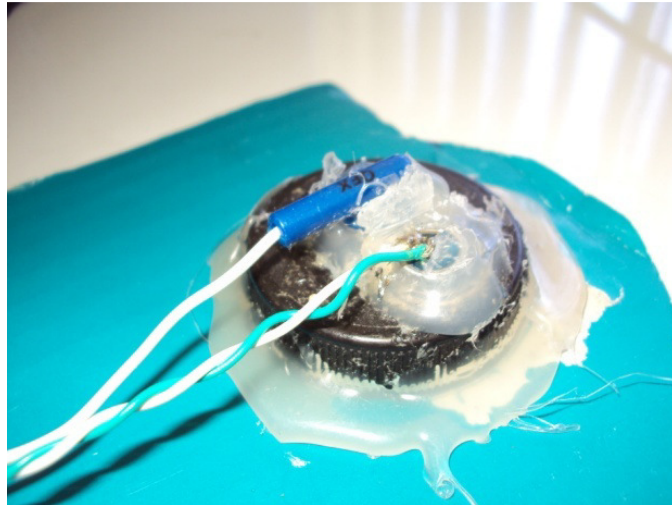


Figura 3.6 Sensor para pruebas en cajas acústicas.

En la Figura 3.7 se muestra la forma en que se coloca el sensor para hacer las pruebas en las cajas acústicas de las guitarras.



Figura 3.7 Colocación del sensor para pruebas en cajas acústicas.

Se hacen también pruebas adicionales con el sensor orientado hacia el espacio libre, sobre una superficie laminada, y sobre un periódico. En la Figura 3.8 se muestra la manera en que se posiciona el sensor de las tres distintas formas.



Figura 3.8 Colocación de sensor sobre superficie laminada (izquierda), hacia el espacio libre (centro), y sobre papel periódico (derecha).

3.3 Esquema de procesamiento

En la Figura 3.9 se muestra el esquema de procesamiento. En esta parte se genera la señal senoidal a 100Hz y se hace un incremento de frecuencia de 100Hz cada 60 milisegundos hasta llegar a los 10KHz, la señal es emitida hacia la cavidad acústica mediante la bocina y al captar el eco con el micrófono y hacer la adquisición con el NI-ELVIS, se hace la medición de amplitud y frecuencia y se envía los datos a un arreglo, al tener todas las mediciones cargadas en el arreglo se saca el índice de correlación con la curva de respuesta en frecuencia ya conocida y deseada la cual se encuentra guardada en un archivo de texto [5] y que es cargado a un segundo arreglo, una vez obtenido el índice de correlación se compara contra un umbral deseado preestablecido y se obtiene como salida un valor lógico 1/0 (ES/NO_ES).

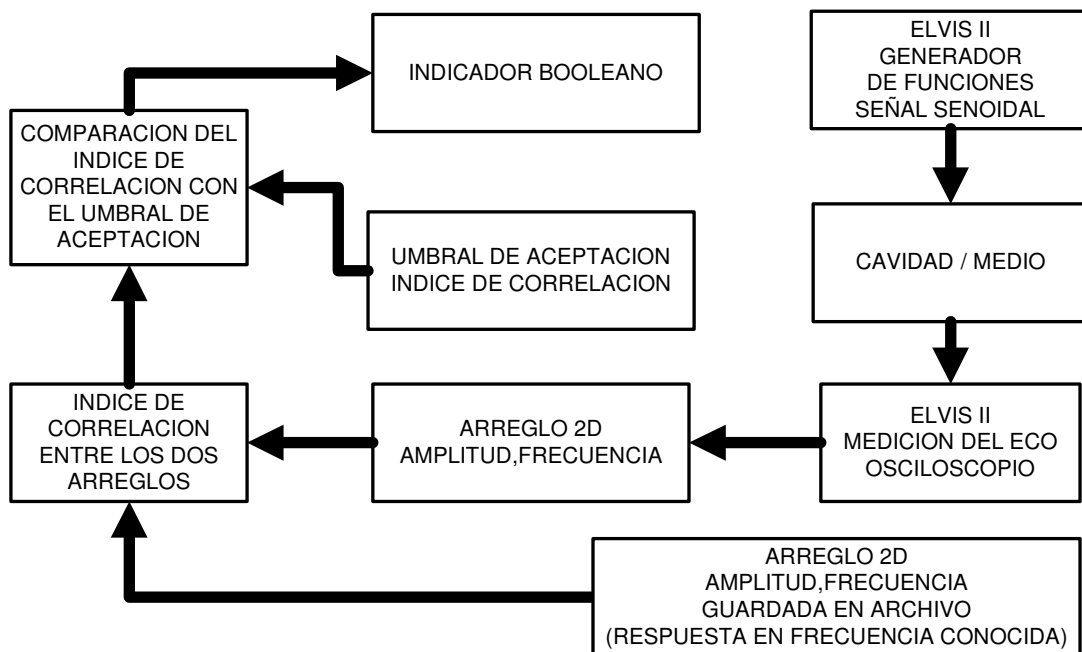


Figura 3.9 Esquema de procesamiento utilizando SFRA.

En la Figura 3.10 se muestra la interfaz de pruebas. En la gráfica superior derecha se muestra el espectro de la señal capturada, mostrando solamente la fundamental. En la gráfica superior derecha se muestra la respuesta en frecuencia de la señal capturada y de la señal de referencia simultáneamente. En la gráfica inferior se muestran las respuestas en frecuencia de cada una de las señales de referencia de manera simultánea. En la parte derecha de la interfaz se muestran los índices de correlación y el umbral de aceptación, así como unos indicadores que señalan cuál de los patrones de referencia corresponde a la respuesta obtenida, también cuenta con una campo donde podemos asignarle un nombre a la prueba para que sea guardada en un archivo con formato de texto.

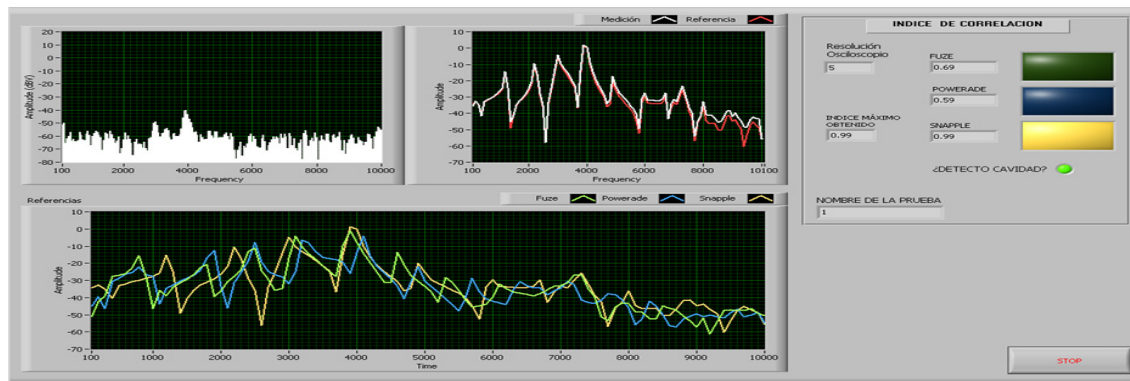


Figura 3.10 Interfaz de pruebas en LabVIEW.

3.4 EI NI-ELVIS II+

Se utiliza NI-ELVIS II+ (NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite), ya que es una plataforma que integra distintas herramientas como osciloscopio, fuente de poder, y generador de funciones, tablilla de conexiones entre otras, herramientas necesarias para el desarrollo de las pruebas, además sus características son configurables desde LabVIEW ya que este cuenta con los controladores necesarios para manejar la plataforma. En la Figura 3.11 se muestra el montaje típico de un sistema con el NI-ELVIS II.

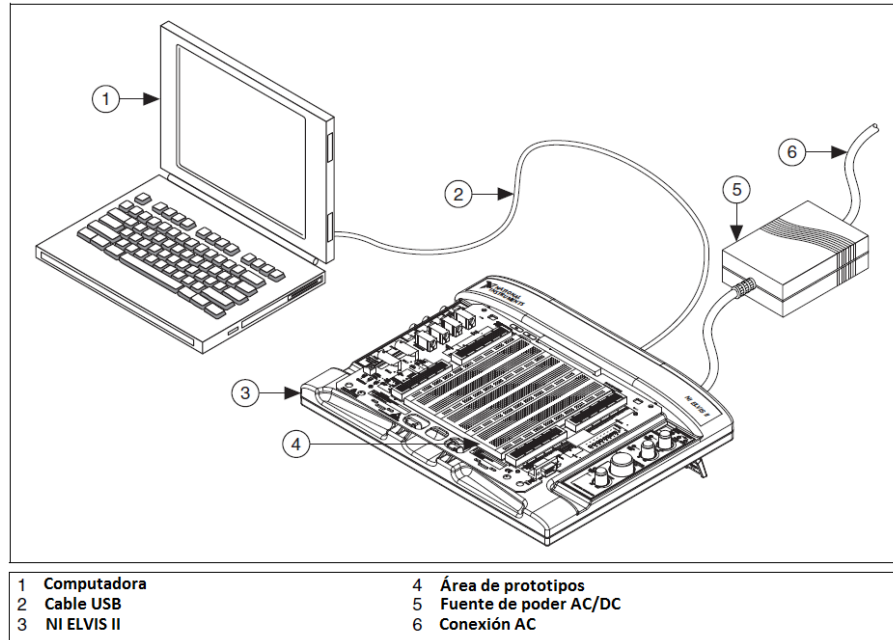


Figura 3.11 Sistema típico con el NI-ELVIS II[17]

En la Figura 3.12 se muestra la vista de planta del NI-ELVIS, con globos se indican cada una de sus partes.

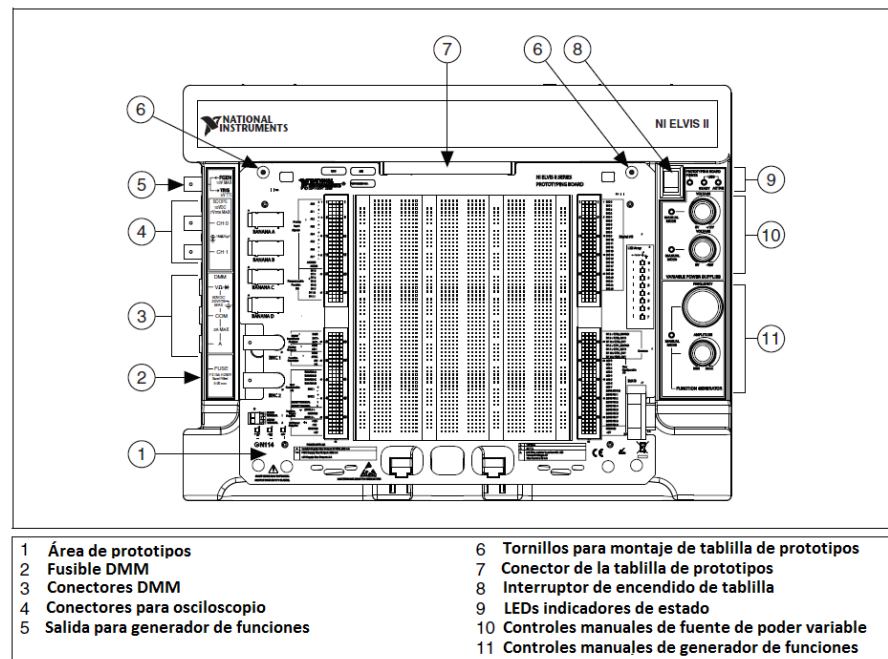


Figura 3.12 Vista de planta del NI-ELVIS[17].

3.4.1 Características y especificaciones del NI ELVIS II+

El NI-ELVIS cuenta con distintas características que permite su utilización en distintas aplicaciones de precisión y velocidad. Entre algunas de sus características e instrumentos se encuentran [17]:

- Generador de funciones arbitrarias.
- Analizador de Bode.
- Multímetro digital.
- Fuente de voltaje variable.
- Osciloscopio.
- Generador de funciones.
- 24 entradas/salidas digitales.
- 8 canales analógicos en modo diferencial o 16 en modo RSE, ADC con resolución de 16 bits, entre 1-1.25 MS/s de tasa de muestreo máxima.
- Generador de funciones con DAC de 12 bits y frecuencia de muestreo máxima de 2.8 MS/s.

3.5 Resultados

En esta sección se muestran los resultados, divididos por grupos, en el siguiente orden: el oído humano masculino, oído femenino, envases de Powerade, Fuze y Gatorade, y por último las cajas resonantes. La señal es presentada en el dominio de la frecuencia mediante la FFT.

3.5.1 Oído humano

En la Figura 3.13 se muestran las respuestas en frecuencia correspondientes a 4 canales auditivos de distintas personas utilizando la técnica SFRA, las respuestas en todos los sujetos de prueba es parecida. Se dice que la respuesta es casi igual, aunque existen algunas diferencias en la amplitud de picos y valles, así como la distinta localización de estos en el eje de la frecuencia.

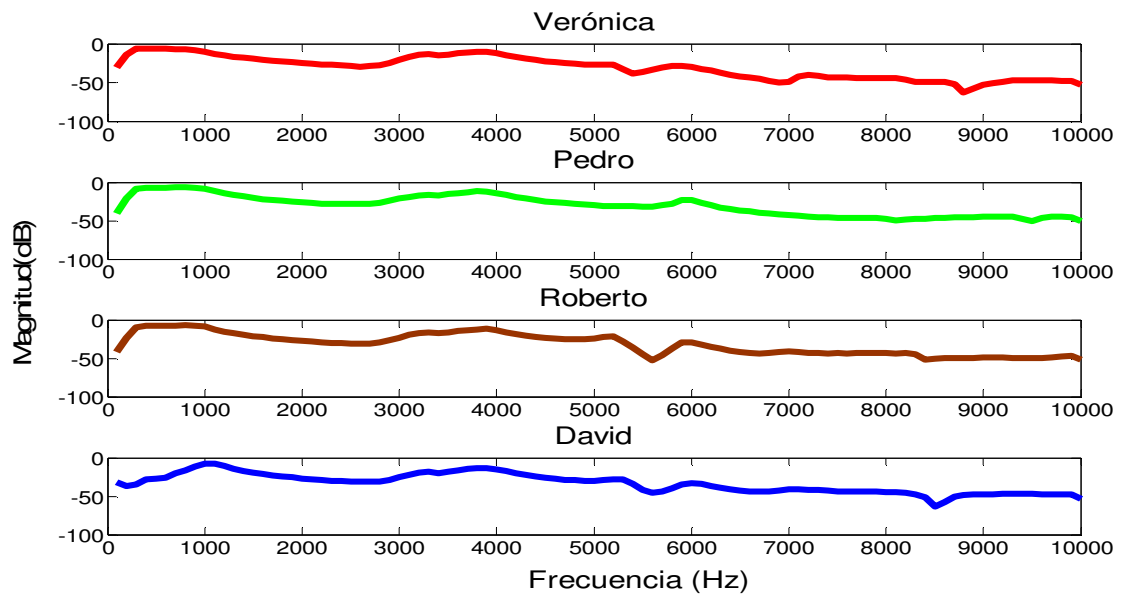


Figura 3.13 Respuesta en frecuencia de la cavidad auditiva.

En la Tabla 3.1 se muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre cada una de las curvas mostradas en la Figura 3.13.

Tabla 3.1 Índices correlación de Pearson entre las curvas de las respuesta en el oído.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Verónica-Pedro	0.9643
Verónica-Roberto	0.9617
Verónica-David	0.9015
Pedro-Roberto	0.9540
Pedro-David	0.8921
Roberto-David	0.9245

3.5.2 Envases contenedores de líquido

En la Figura 3.14 se muestra la respuesta en frecuencia de tres envases contenedores de líquidos.

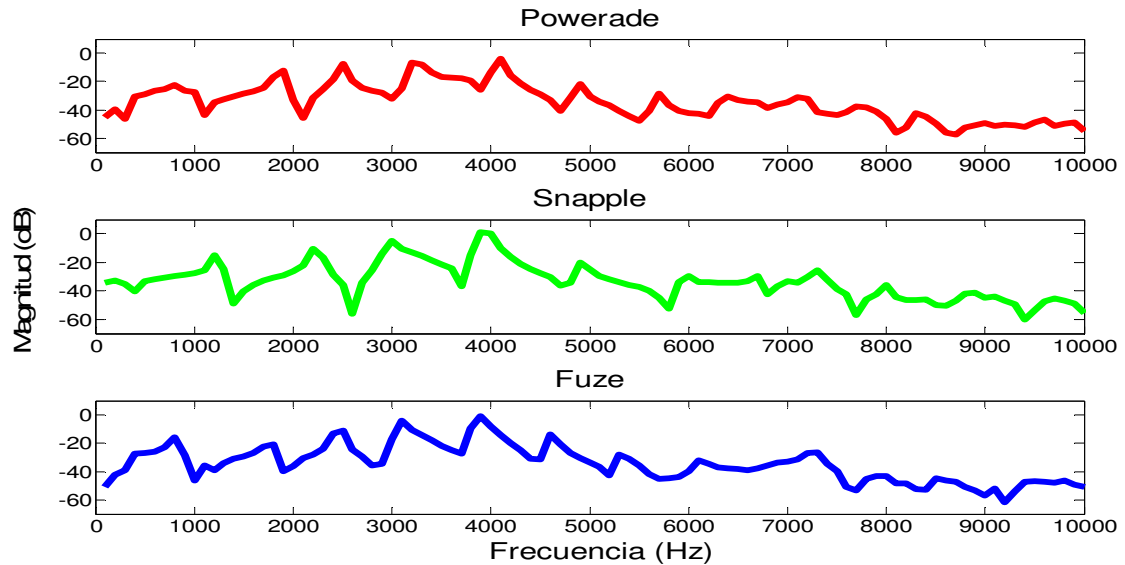


Figura 3.14 Respuesta en frecuencia de botellas contenedoras de líquidos.

En la Tabla 3.2 se muestran los coeficientes de correlación de Pearson entre cada una de las curvas mostradas en la Figura 3.14.

Tabla 3.2 Índices de correlación de Pearson entre las curvas de tres envases.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Powerade-Snapple	0.6329
Powerade-Fuze	0.7751
Snapple-Fuze	0.7253

3.5.3 Cajas acústicas de guitarras

En la Figura 3.15 se muestra la respuesta en frecuencia de dos cajas acústicas distintas, en las que se puede ver una respuesta casi idéntica.

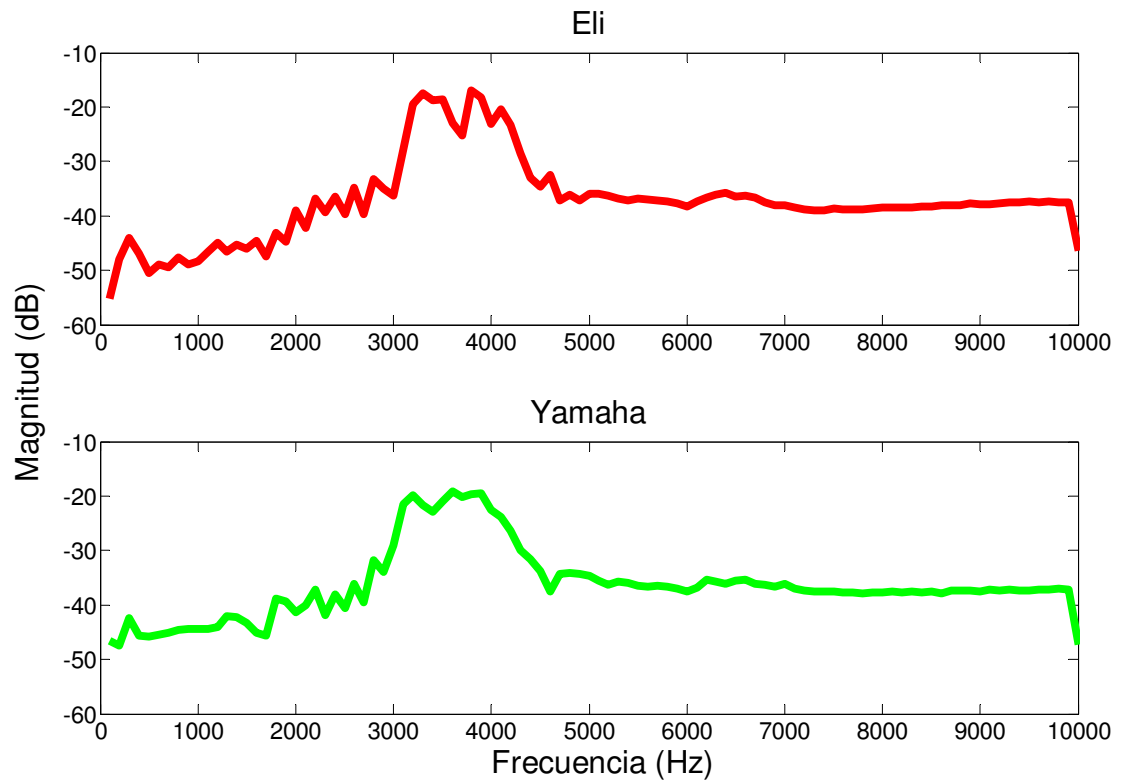


Figura 3.15 Respuesta en frecuencia de cajas acústicas.

En la Tabla 3.3 se muestra el índice de correlación de Pearson entre las curvas de la Figura 3.15 correspondientes a las cajas acústicas.

Tabla 3.3 Índice de correlación de Pearson entre dos cajas acústicas.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Eli-Yamaha	0.9585

3.5.4 Espacio libre y superficies

En la Figura 3.16 se muestra la respuesta que se obtiene al orientar el sensor con los esquemas planteados anteriormente y mostrados en la Figura 3-14.

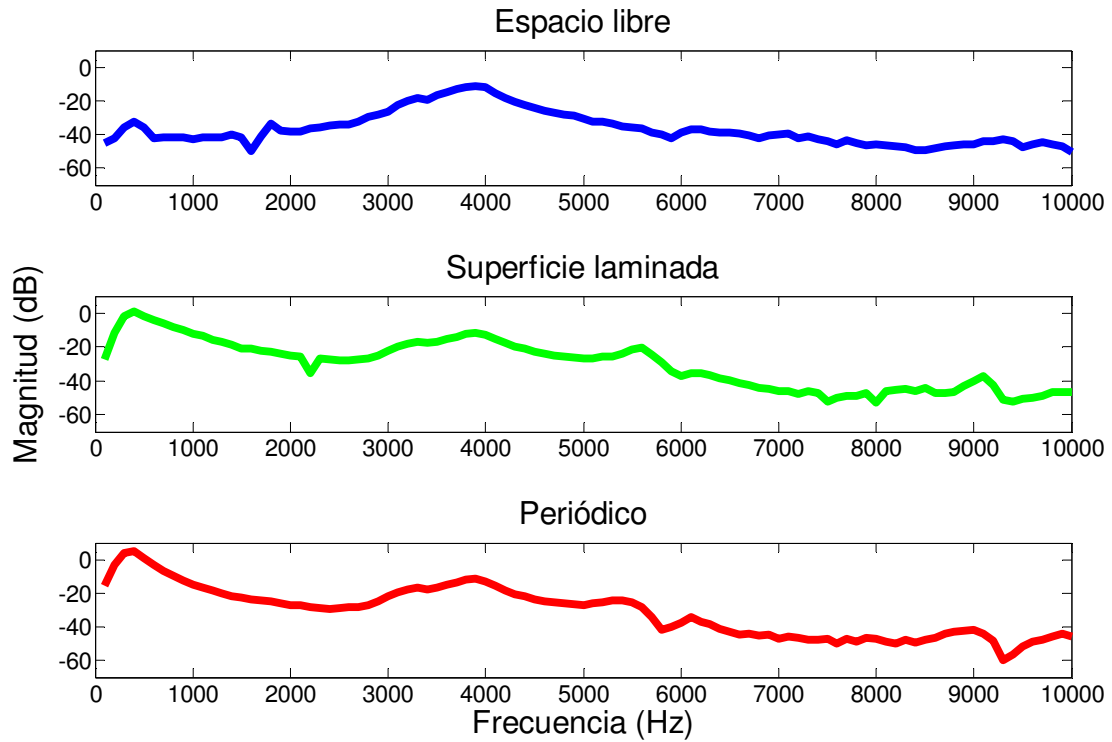


Figura 3.16 Respuesta del sensor al espacio libre y sobre una superficie laminada.

Capítulo 4. RGB y reconocimiento de cavidades acústicas: canal auditivo, caja acústica y envases.

4.1 Introducción

En este apartado se hace una comparación respaldada con análisis estadístico y análisis de tiempo de ejecución, entre tres métodos distintos para la detección de cavidades acústicas mediante índice de correlación de Pearson de señales de RGB reflejadas, crudas, FFT, y PSD de un modelo AR por el método de Yule Walker.

De manera general, se inyecta ruido blanco gaussiano a la cavidad acústica, y la señal reflejada se captura para ser comparada con un patrón promediado previamente guardado en memoria o archivo. Las señales son comparadas tanto en el dominio del tiempo (crudas) así como en el dominio de la frecuencia (FFT y Modelo AR), esto quiere decir que el patrón de referencia promedio debe ser guardado en estas tres formas distintas. Para comparar las señales se utiliza el índice de correlación de Pearson.

Se utiliza la plataforma de análisis MATLAB y el procesador digital de señales DSP DSK6713 de Texas Instruments. Para la programación del DSP se utiliza el Code Composer Studio (CCSTUDIO) en su versión 3.1.

4.2 Esquema de hardware

En esta sección se presentan los esquemas de hardware de pruebas y stand-alone.

4.2.1 Esquema de hardware stand alone

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama correspondiente al hardware del sistema implementado en el DSK.

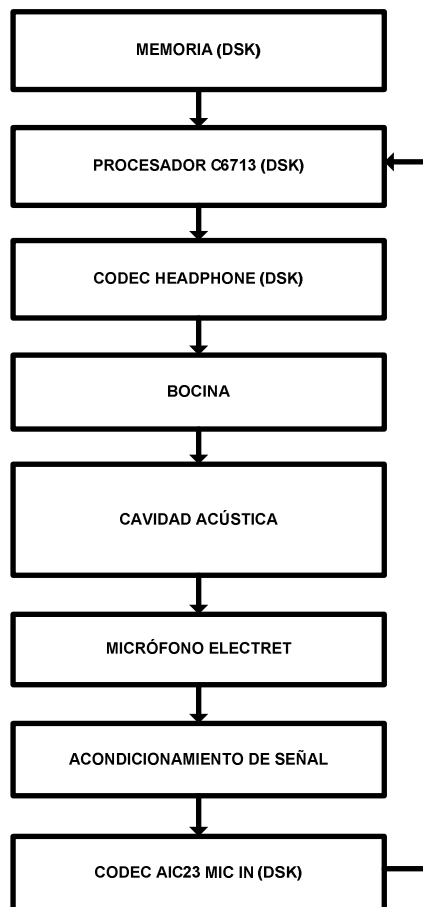


Figura 4.1 Esquema de hardware DSK modo stand alone.

El esquema está formado por una primera etapa de generación/emisión de señales de prueba, como ya se menciona anteriormente la señal es una secuencia de RGB que es generada con el software Matlab utilizando el método de G&R y es guardado en un archivo de cabecera, el cual se manda a llamar al inicio de la ejecución del programa del DSP. Para la emisión de la señal se utiliza la bocina dinámica de auricular conectada de manera directa a la salida HEADPHONE del CODEC de audio AIC23 del DSK. La segunda etapa es de recepción, formada por una sub-etapa de acoplamiento con amplificador operacional para micrófono electret como el que se muestra en la Figura 1.17, del cual la salida es conectada a la entrada MIC IN del CODEC.

4.2.2 Esquema de hardware de pruebas

En la etapa de pruebas, antes de implementar la aplicación en el DSP de manera “stand alone”, se utilizó un esquema de hardware y procesamiento distinto, este esquema se muestra en la Figura 4.2, donde se puede ver la similitud con el de la Figura 4.1, el DSK se comunica con la computadora vía USB, el programa anfitrión es el mismo CCSTUDIO.

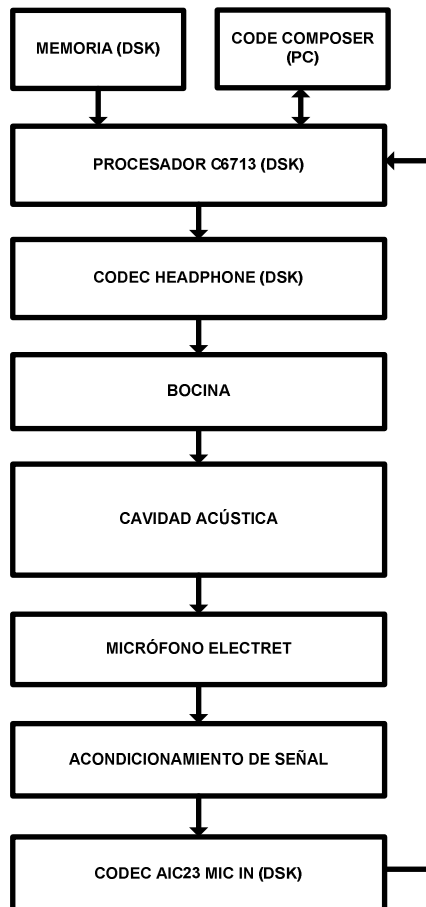


Figura 4.2 Esquema de hardware DSK etapa de pruebas.

En la Figura 4.3 se muestra el esquema de pruebas para guitarras completo de manera física. De derecha a izquierda se puede ver una guitarra acústica (cavidad acústica) con el sensor montado, el circuito acondicionador de señal para el micrófono frente al DSK, una fuente de poder y la computadora.



Figura 4.3 Montaje de pruebas con el DSP.

4.3 Esquema de procesamiento

En esta sección se muestran los esquemas de procesamiento del sistema a implementar en el DSK de manera stand-alone o autónoma, y el esquema de procesamiento de pruebas que utiliza el DSK y el CCSTUDIO, este último para extraer los datos.

4.3.1 Esquema de procesamiento stand-alone

En la Figura 4.4 se muestra el esquema de procesamiento implementado en el DSK en modo “stand alone”.

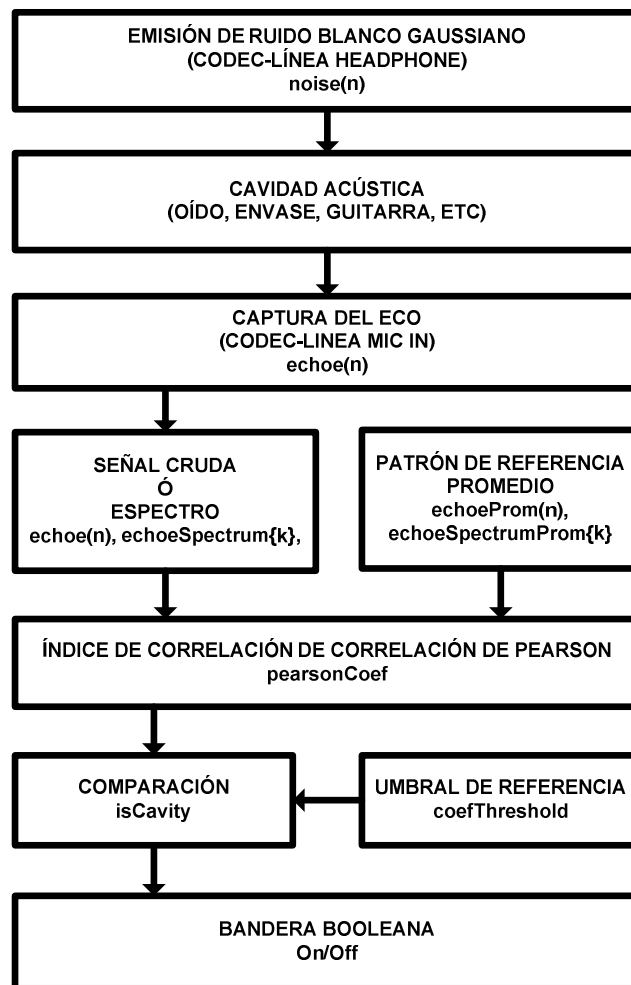


Figura 4.4 Esquema de procesamiento standalone.

Se tiene un vector con 1000 muestras de una señal RGB, que es generada de manera externa utilizando MATLAB y exportada a un archivo de cabecera, el cual se manda a llamar al inicio del programa, la generación externa de la señal ahorra costo de procesamiento que puede ser traducido a ahorro de energía, el RGB es emitido por la bocina y el eco capturado por el micrófono ambos vía CODEC a una frecuencia de muestreo de 8 kHz, la señal capturada es guardada en un vector, si el modo de comparación es de señales crudas se mantiene la

señal original, si el modo de comparación es mediante espectros se obtiene la FFT ó la DEP de un proceso AR(10) según sea el caso. Una vez que se tiene la señal o espectro de la señal capturada se hace la comparación con el patrón promedio contenido en memoria, el cual es obtenido de manera empírica y cargado en el programa de la misma manera que el RGB, para esta comparación se hace el cálculo del Índice de Correlación de Pearson y se compara con un umbral de aceptación ya establecido, si el índice de correlación es igual o superior al umbral un indicador booleano o bandera adopta el estado verdadero (1 lógico) de caso contrario permanece en falso (0 lógico). Es preciso mencionar que ambos vectores a comparar ya sean señales crudas ó espectros son normalizados.

4.3.2 Esquema de procesamiento de pruebas

En la Figura 4.5 se muestra el esquema de procesamiento del sistema de pruebas. Es similar al de la Figura 4.4 con la diferencia que el DSK solo funge como tarjeta de adquisición de datos y los datos son exportados por CCSTUDIO a un archivo .dat, el archivo de datos es entonces importado a MATLAB donde se hace la comparación. En esta etapa además de la comparación se hace un análisis estadístico para determinar cuál de los métodos de comparación mencionados anteriormente es más fiable para esta aplicación. Se hacen pruebas en 40 cavidades auditivas (20 hombres y 20 mujeres), 3 guitarras, 8 envases de Fuze Tea, 8 envases de Powerade y 8 envases de Gatorade. El análisis estadístico consiste en obtener el índice de correlación de todos los sujetos de prueba del mismo grupo con la señal o espectro promedio obtenido de estos mismos, se calcula la media, la desviación estándar y se muestran histogramas.

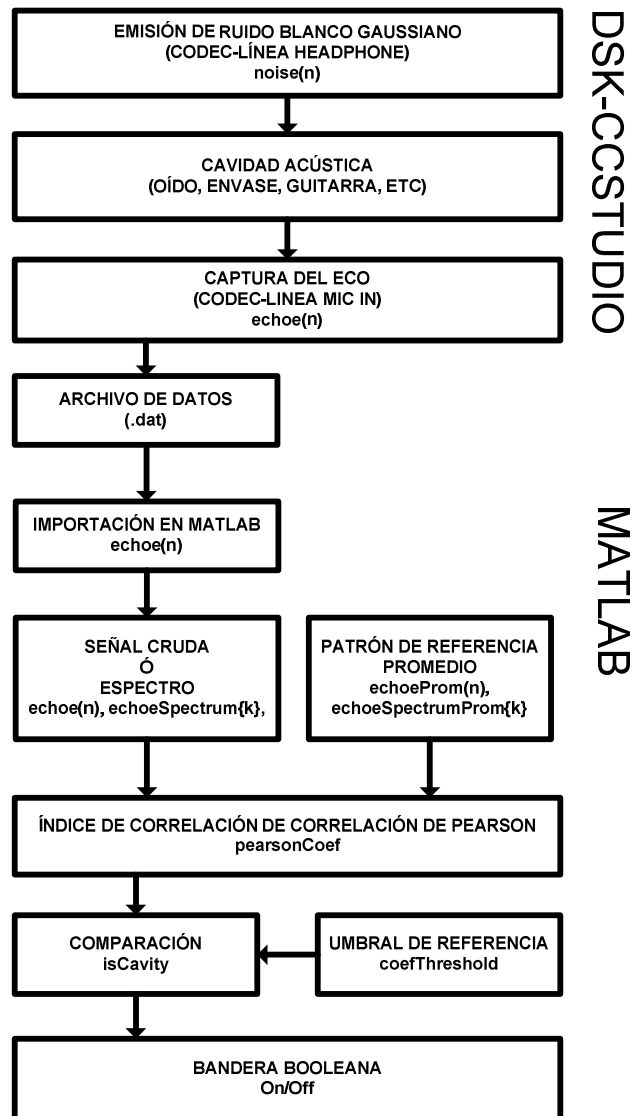


Figura 4.5 Esquema de procesamiento de pruebas.

En la Figura 4.6 se muestra la pantalla del CCSTUDIO, en la parte superior se puede ver la señal de prueba y en la parte inferior la señal reflejada y capturada, en este caso por simple inspección puede notarse que la señal reflejada pierde componentes de alta frecuencia de la señal emitida.

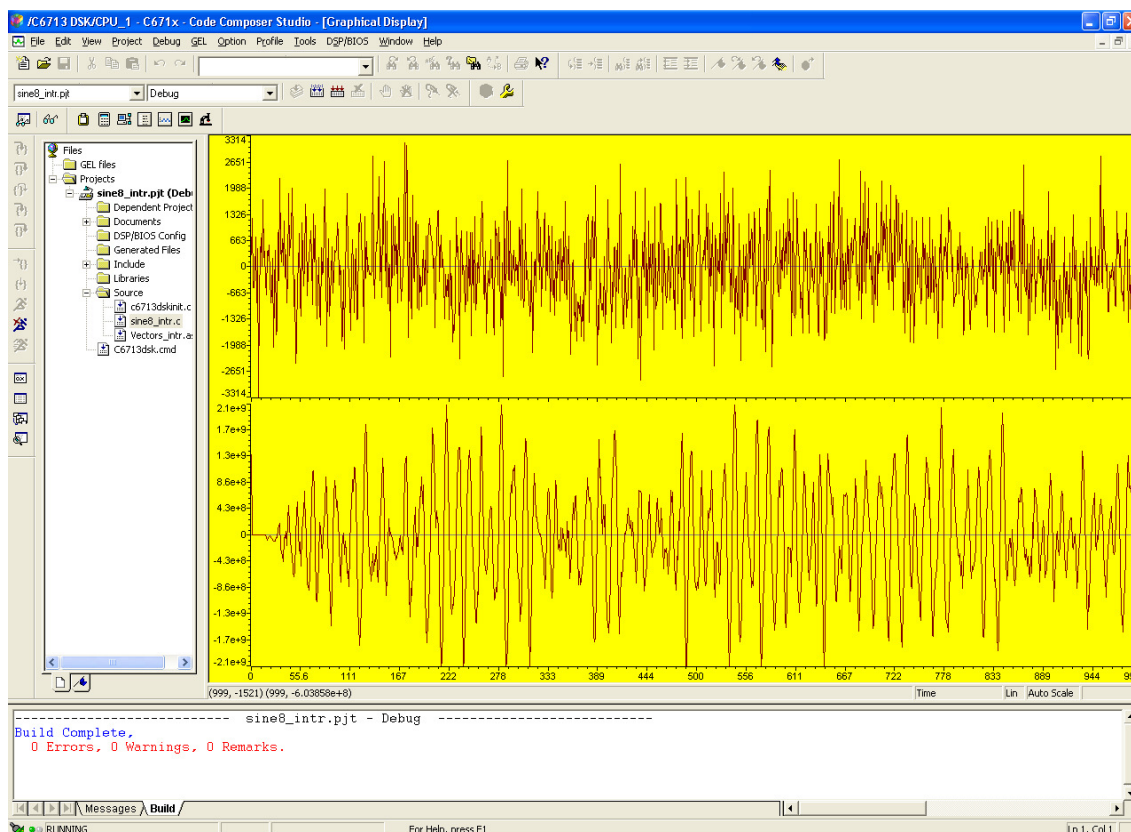


Figura 4.6 Pantalla del CodeComposer Studio 3.1.

4.4 El procesador digital de señales DSK6713

Se utiliza la tarjeta de evaluación DSK6713 de SPECTRUM DIGITAL[18], que contiene un procesador digital de señales de punto flotante de la serie C6000 con arquitectura VelociTI de Texas Instruments. En la Figura 4.7 se muestra la tarjeta de evaluación.



Figura 4.7 Procesador digital de señales DSK6713.

4.4.1 Características y especificaciones del DSK6713

El DSK cuenta con distintos dispositivos que lo hacen un buen candidato para distintas aplicaciones. Entre las características principales se incluyen:

- Un procesador de 32 Bits de punto flotante TMS320C6713 operando a 225 MHz
- Arquitectura VelociTI
- Un códec estéreo AIC23 configurable entre 8-96 KHz
- 1800 MIPS y 1350 MFLOPS
- 16 Mbytes de memoria DRAM síncrona
- 512 Kbytes de memoria flash no volátil
- Interface USB
- Alimentación de +5V
- Entradas y salidas de audio TRS de 3.5mm
- Otras características

4.4.2 Diagrama a bloques interno del DSK6713

En la Figura 4.8 se muestra el diagrama a bloques interno del DSK6713. Véase próximo a la esquina superior izquierda el bloque correspondiente al audio, se tiene el CODEC AIC23 así como 2 entradas y 2 salidas de audio (MIC IN, LINE IN, LINE OUT, HP OUT respectivamente) TRS de 3.5mm, en la parte inferior se observa un bloque de 4 diodos emisores de luz de montaje superficial de color verde y un bloque de 4 DIP switches.

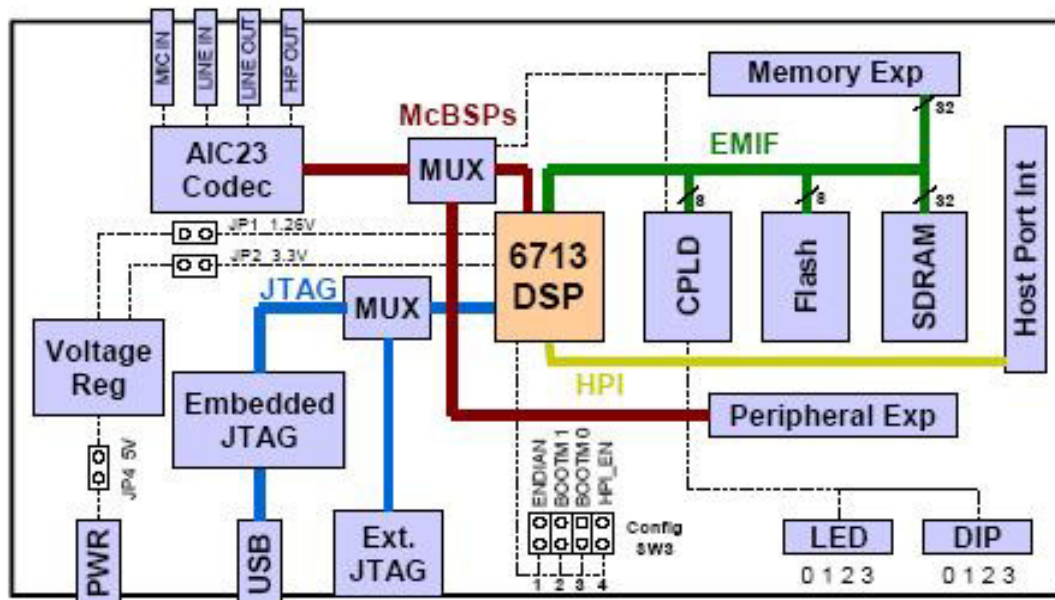


Figura 4.8 Diagrama interno del DSK6713.

4.5 Resultados

A continuación se muestran los resultados, divididos por grupos. El orden en que se muestran es el oído humano masculino y femenino sucesivamente, los envases de Powerade, Fuze y Gatorade, y por último las cajas resonantes. Se tienen las gráficas de la señal en el dominio del tiempo (señal cruda), el espectro FFT y la DEP AR(10) sucesivamente.

4.5.1 Oído humano

En esta sección se muestran las pruebas y resultados obtenidos en oídos de sujetos humanos de ambos géneros.

4.5.1.1 Oído masculino

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas en oídos masculinos.

4.5.1.1.1 Oído masculino y señales crudas

En la Figura 4.9 se muestran las gráficas de señales crudas reflejadas en el oído humano masculino de 8 sujetos de prueba y la señal promediada de todas las señales en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X número de muestra.

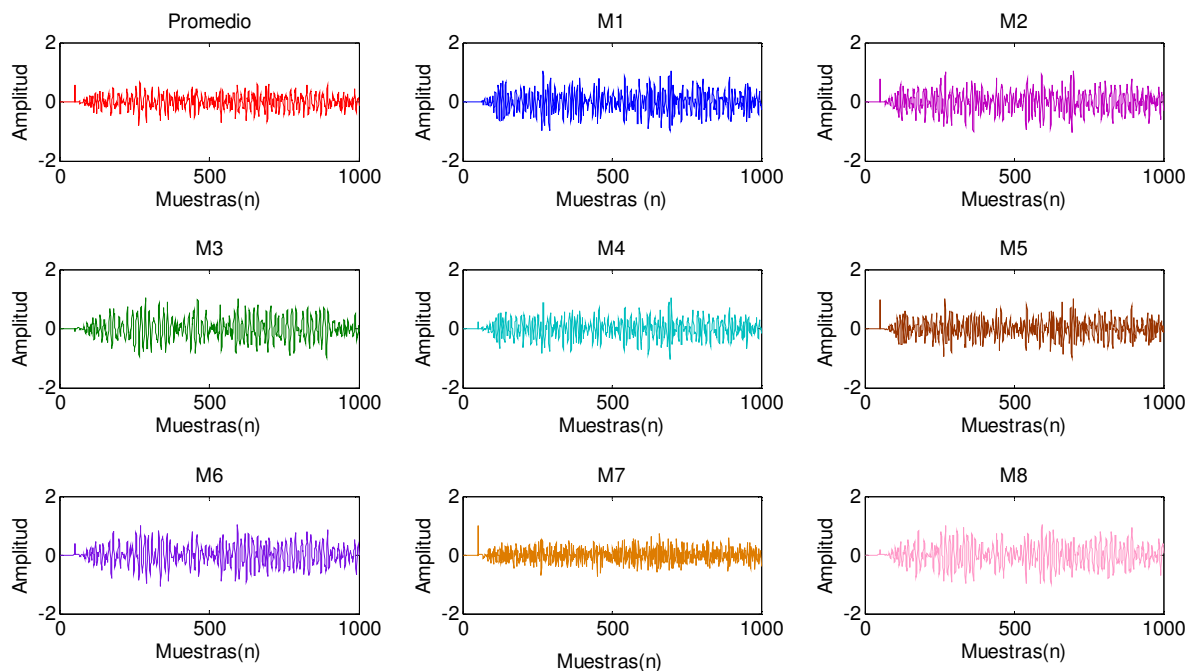


Figura 4.9 Señales crudas capturadas en oído humano masculino.

En la Tabla 4.1 se muestran los índices de correlación de las señales crudas de todos los sujetos de prueba con la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.1 Índice de correlación de señales crudas en oído humano masculino.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – M1	0.7894
Promedio – M2	0.8729
Promedio – M3	0.3321
Promedio – M4	0.8771
Promedio – M5	0.8536
Promedio – M6	0.8401
Promedio – M7	0.3489
Promedio – M8	0.8181
Media	0.7165
Desviación Estándar	0.2339

En la Figura 4.10 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.1, donde puede verse por simple inspección que dos de los sujetos de prueba (M7 y M3) están alejados de la media.

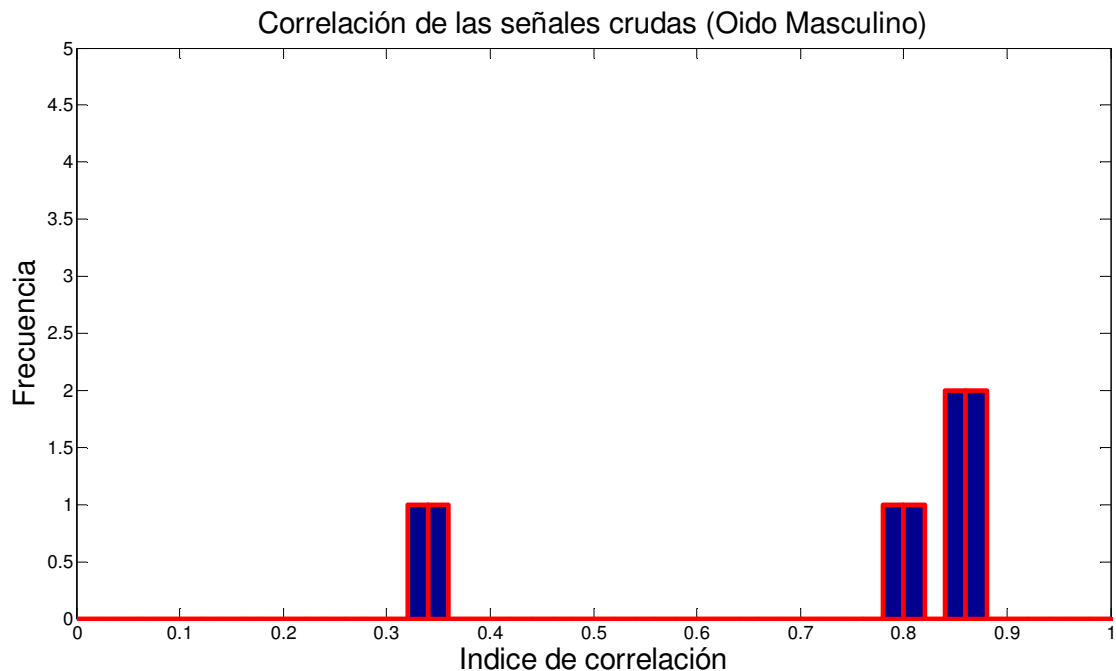


Figura 4.10 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en oído humano masculino.

4.5.1.1.2 Oído masculino y FFT

En la Figura 4.11 se muestran las gráficas de las FFT de las señales reflejadas en el oído humano masculino, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

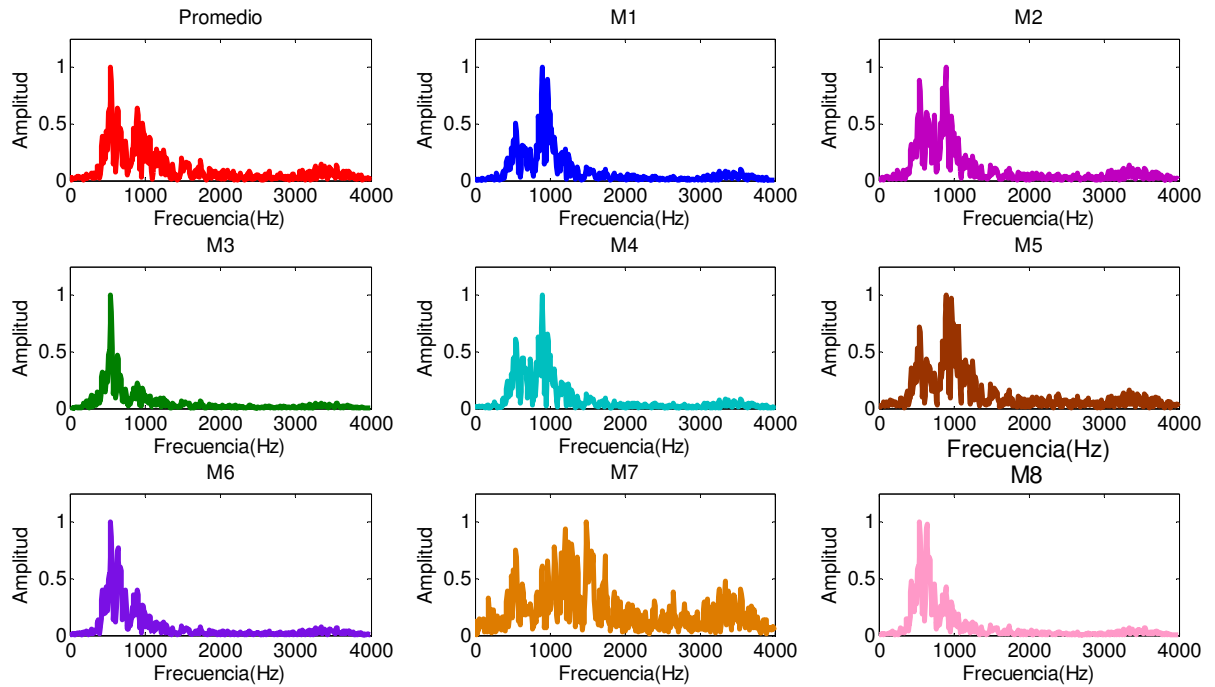


Figura 4.11 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en oído humano masculino.

En la Tabla 4.2 se muestran los índices de correlación de las FFT de las señales de todos los sujetos de prueba con la FFT de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.2 Índice de correlación de la FFT en oído humano masculino.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – M1	0.8435
Promedio – M2	0.9450
Promedio – M3	0.8929
Promedio – M4	0.9157
Promedio – M5	0.8888
Promedio – M6	0.9351
Promedio – M7	0.6065
Promedio – M8	0.9169
Media	0.8680
Desviación Estándar	0.1103

En la Figura 4.12 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.2, donde puede verse por simple inspección que solo uno de los sujetos de prueba (M7) está alejado de la media.

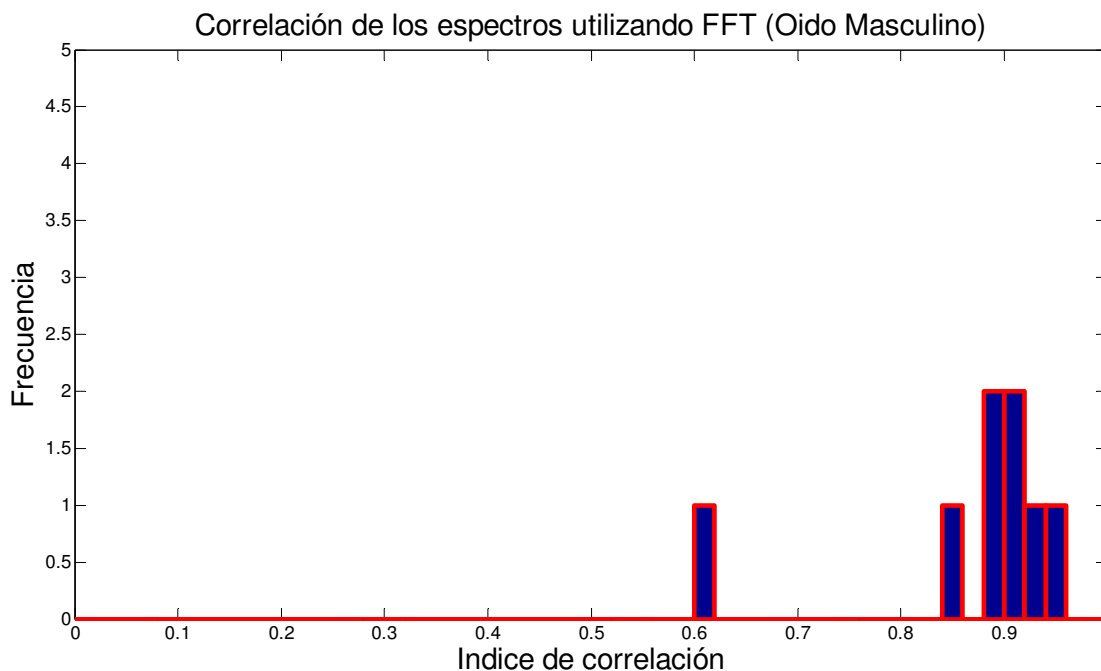


Figura 4.12 Histograma de los índices de correlación de las FFT en oído humano masculino.

4.5.1.1.3 Oído masculino y DEP AR(10)

En la Figura 4.13 se muestran las gráficas de la DEP con un modelo AR(10) de las señales reflejadas en el oído humano masculino, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

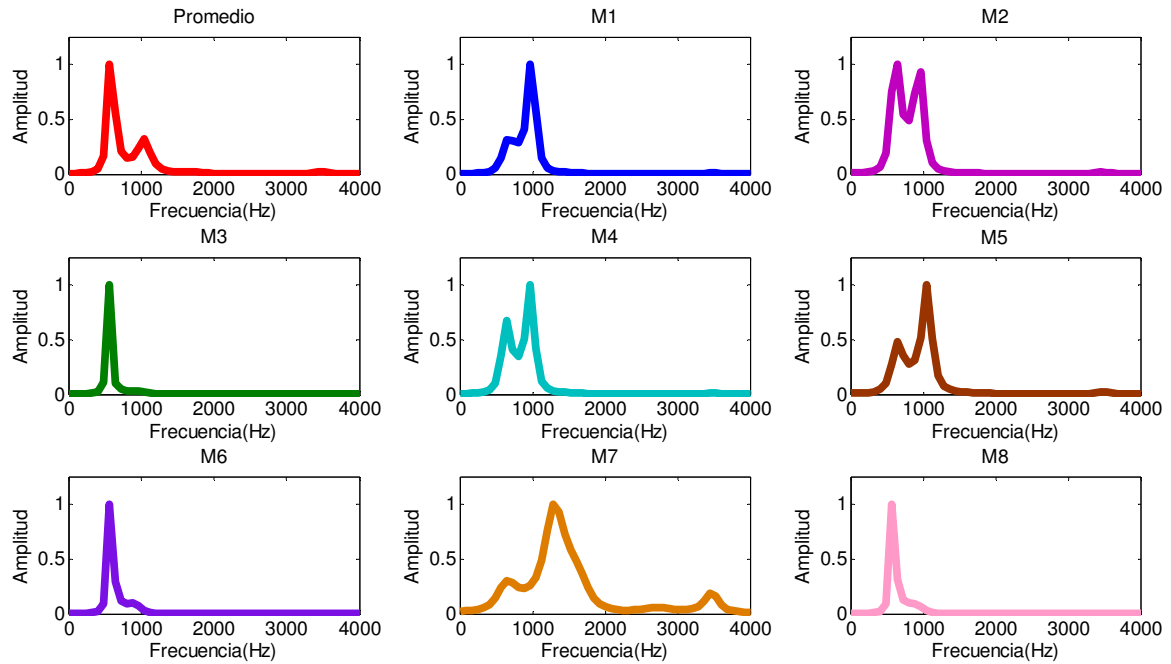


Figura 4.13 DEP con un modelo AR(10) de la señal en oído humano masculino.

En la Tabla 4.3 se muestran los índices de correlación de las DEP AR(10) de las señales de todos los sujetos de prueba con la DEP AR(10) de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.3 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en oído humano masculino.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – M1	0.4784
Promedio – M2	0.7767
Promedio – M3	0.8613
Promedio – M4	0.6425
Promedio – M5	0.6238
Promedio – M6	0.9304
Promedio – M7	0.1953
Promedio – M8	0.9315
Media	0.6800
Desviación Estándar	0.2531

En la Figura 4.14 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.3, donde puede verse por simple inspección que todos los índices de correlación están muy dispersos.

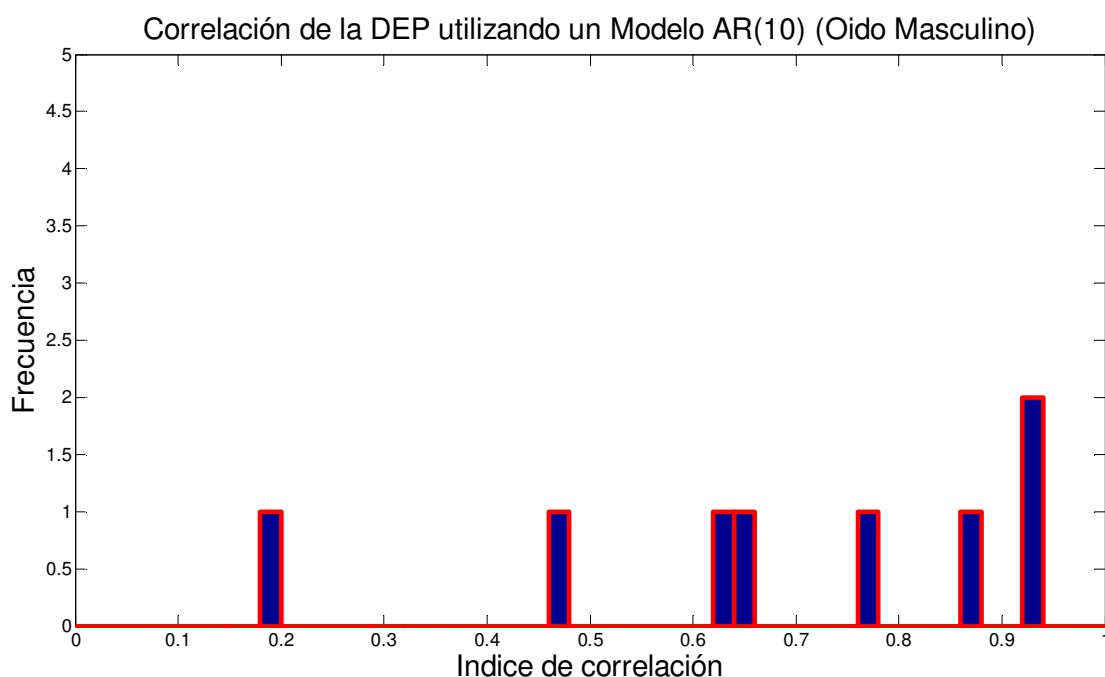


Figura 4.14 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en oído humano masculino

4.5.1.2 Oído femenino

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas en oídos femeninos.

4.5.1.2.1 Oído femenino y señales crudas

En la Figura 4.15 se muestran las gráficas de señales crudas reflejadas en el oído humano femenino de 8 sujetos de prueba y la señal promediada de todas las señales en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X número de muestra.

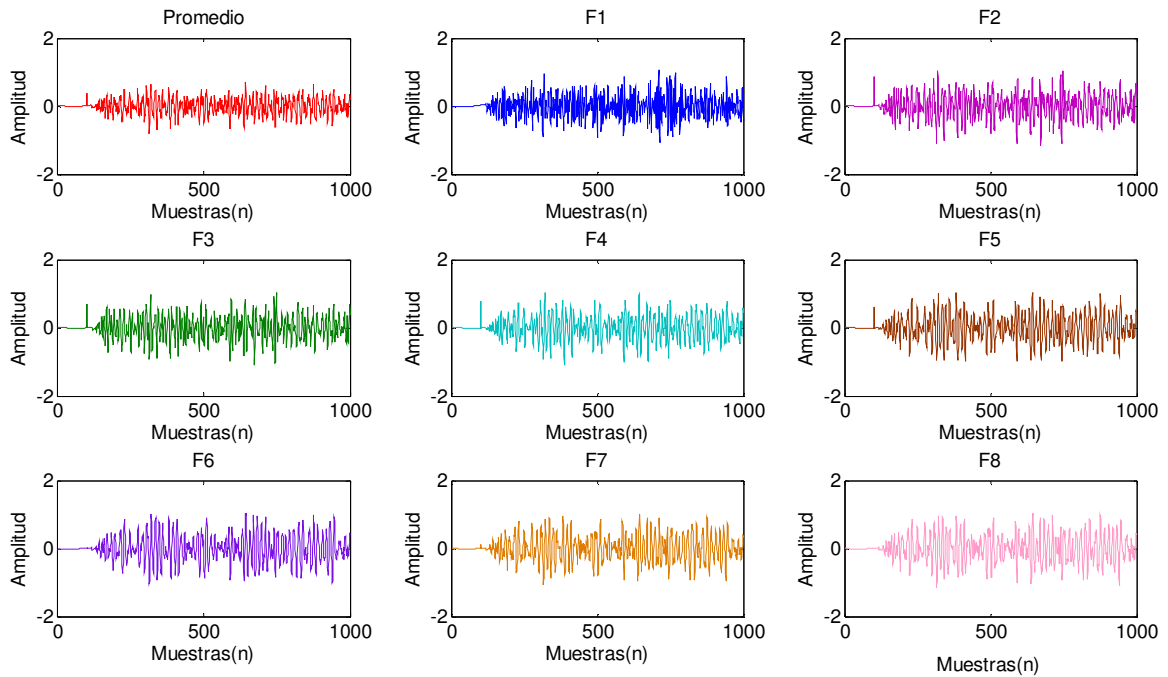


Figura 4.15 Señales crudas capturadas en oído humano femenino.

En la Tabla 4.4 se muestran los índices de correlación de las señales crudas de todos los sujetos de prueba con la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.4 Índice de correlación de señales crudas en oído humano femenino.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – F1	0.4629
Promedio – F2	0.8869
Promedio – F3	0.8264
Promedio – F4	0.9064
Promedio – F5	0.9219
Promedio – F6	0.8118
Promedio – F7	0.7813
Promedio – F8	0.7991
Media	0.7996
Desviación Estándar	0.1457

En la Figura 4.16 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.4, donde puede verse por simple inspección que uno de los sujetos de prueba (F1) está bastante alejado de la media y los demás están concentrados cerca de ella.

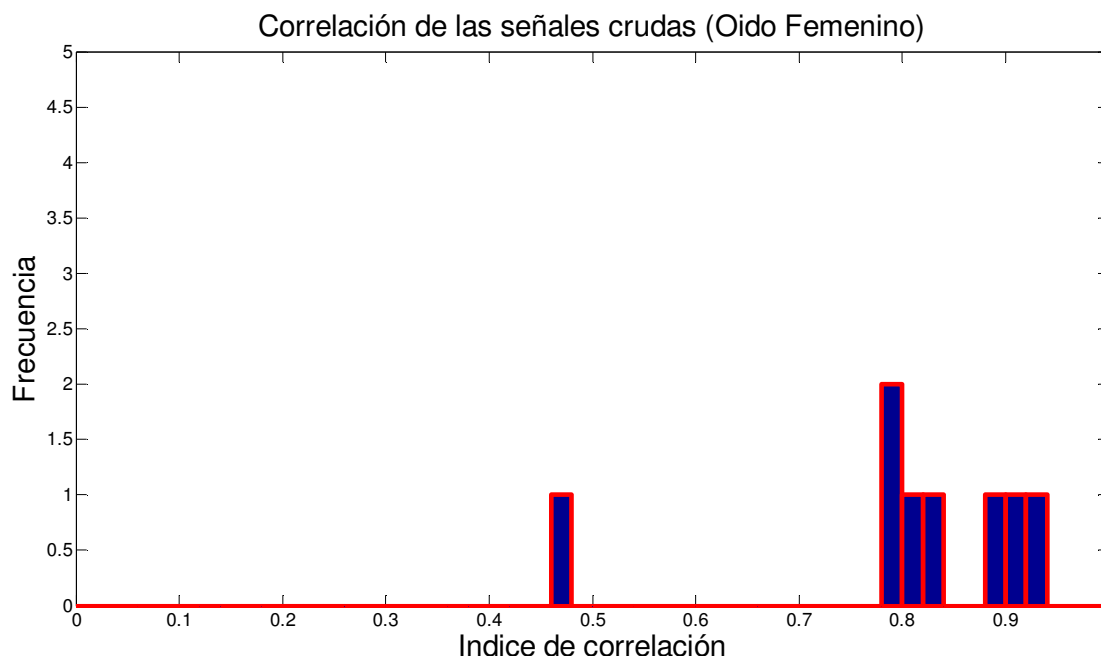


Figura 4.16 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en oído humano femenino.

4.5.1.2.2 Oído femenino y FFT

En la Figura 4.17 se muestran las gráficas de las FFT de las señales reflejadas en el oído humano femenino, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

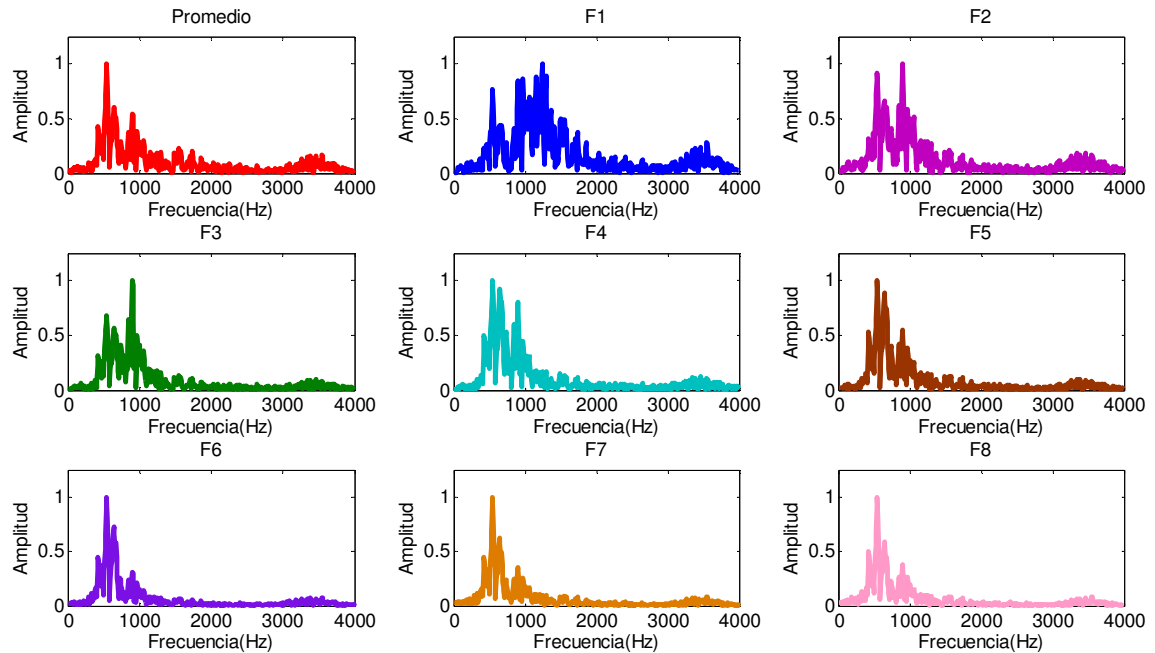


Figura 4.17 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en oído humano femenino.

En la Tabla 4.5 se muestran los índices de correlación de las FFT de las señales de todos los sujetos de prueba con la FFT de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.5 Índice de correlación de la FFT en oído humano femenino.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – F1	0.6457
Promedio – F2	0.9371
Promedio – F3	0.9040
Promedio – F4	0.9566
Promedio – F5	0.9663
Promedio – F6	0.9435
Promedio – F7	0.9686
Promedio – F8	0.9647
Media	0.9108
Desviación Estándar	0.1092

En la Figura 4.18 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.5, donde puede verse por simple inspección que solo uno de los sujetos de prueba (F1) está alejado de la media.

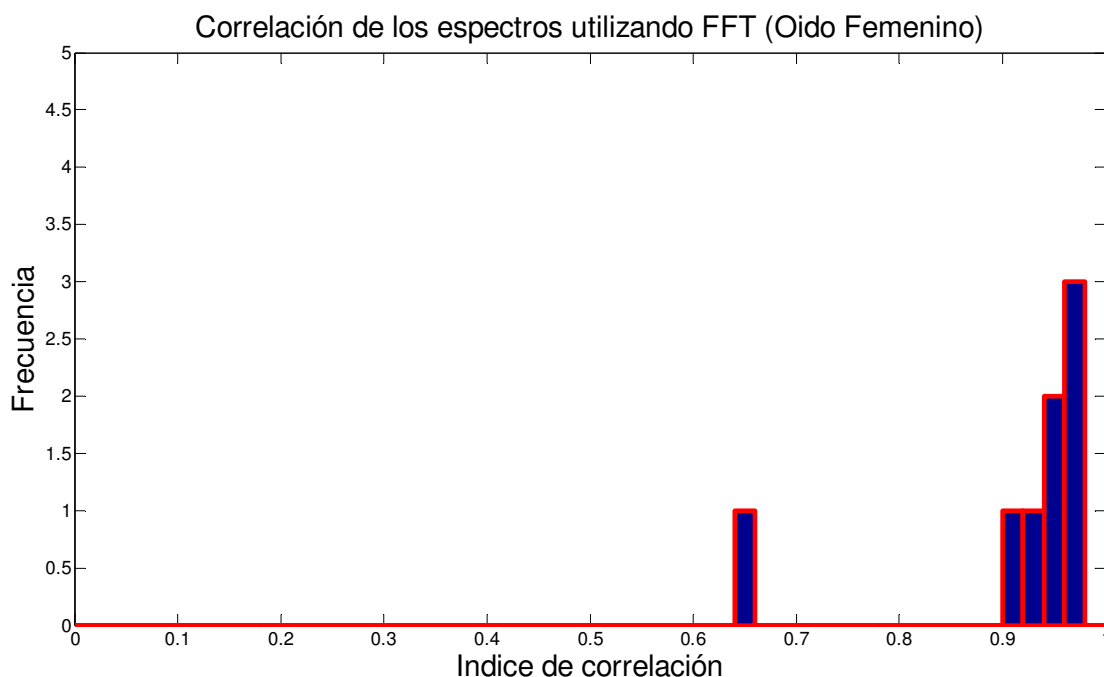


Figura 4.18 Histograma de los índices de correlación de las FFT en oído humano femenino.

4.5.1.2.3 Oído femenino y DEP AR(10)

En la Figura 4.19 se muestran las gráficas de la DEP con un modelo AR(10) de las señales reflejadas en el oído humano femenino, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

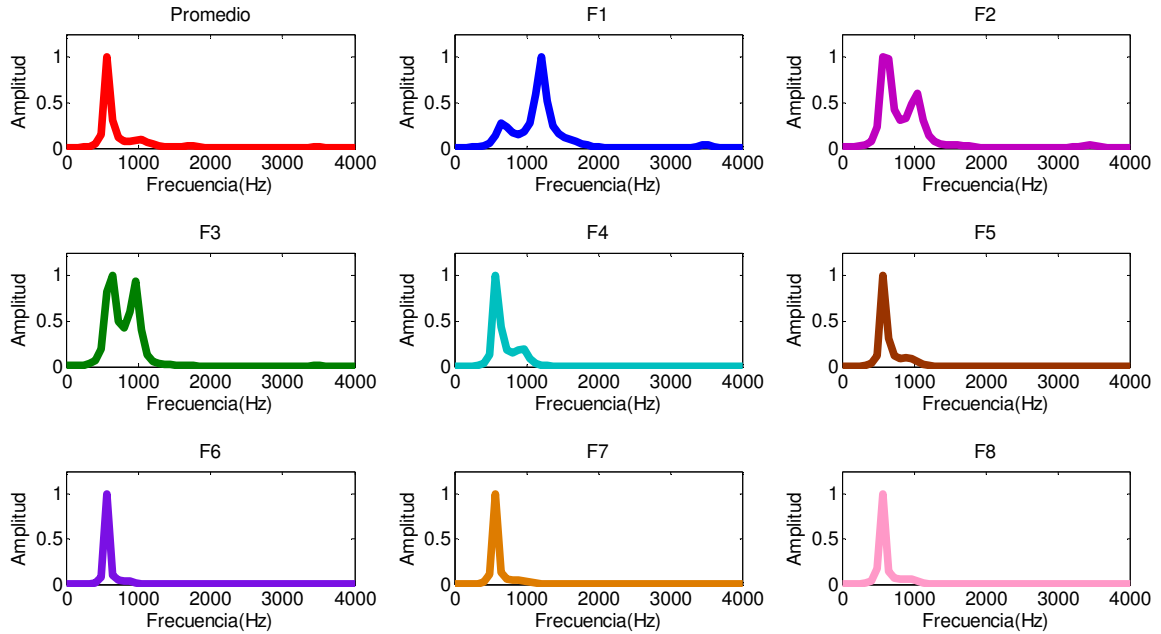


Figura 4.19 DEP con un modelo AR(10) de la señal en oído humano femenino.

En la Tabla 4.6 se muestran los índices de correlación de las DEP AR(10) de las señales de todos los sujetos de prueba con la DEP AR(10) de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.6 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en oído humano femenino.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – F1	0.1794
Promedio – F2	0.8046
Promedio – F3	0.6686
Promedio – F4	0.9808
Promedio – F5	0.9973
Promedio – F6	0.9711
Promedio – F7	0.9802
Promedio – F8	0.9833
Media	0.8207
Desviación Estándar	0.2843

En la Figura 4.20 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.6, donde puede verse por simple inspección que todos los índices de correlación están muy dispersos.

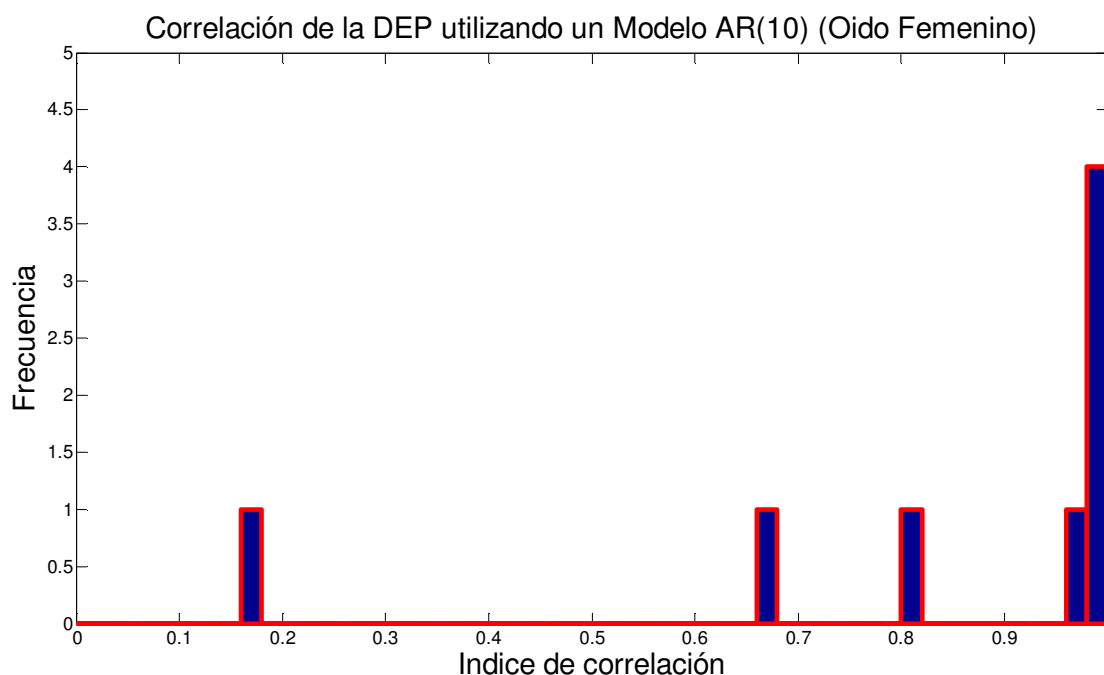


Figura 4.20 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en oído humano femenino.

4.5.2 Envases contenedores de líquido

En esta sección se muestran las pruebas y resultados obtenidos con envases contenedores de líquido de los productos POWERADE, FUZE TEA y GATORADE.

4.5.2.1 Envases de POWERADE

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas con envases de POWERADE.

4.5.2.1.1 Envase de POWERADE y señales crudas

En la Figura 4.21 se muestran las gráficas de señales crudas reflejadas en envases de POWERADE (8 sujetos de prueba) y la señal promediada de todas las señales, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X número de muestra.

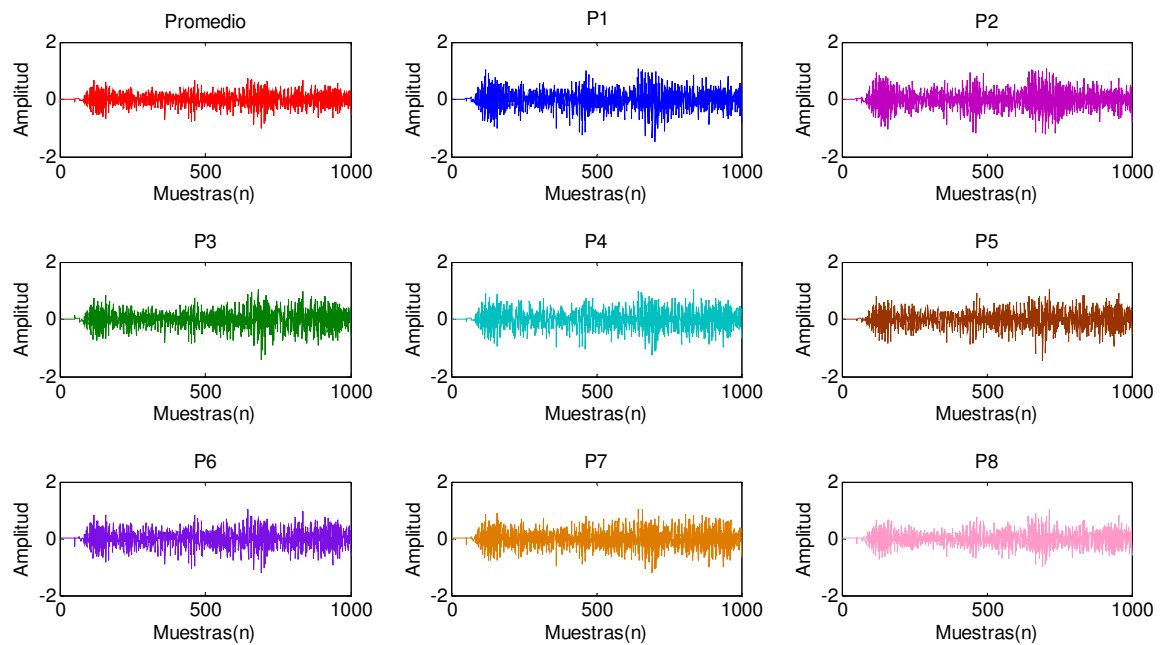


Figura 4.21 Señales crudas capturadas en envases de POWERADE.

En la Tabla 4.7 se muestran los índices de correlación de las señales crudas de todos los sujetos de prueba con la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.7 Índice de correlación de señales crudas en envases de POWERADE.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – P1	0.9326
Promedio – P2	0.8719
Promedio – P3	0.9363
Promedio – P4	0.9571
Promedio – P5	0.9281
Promedio – P6	0.9632
Promedio – P7	0.9457
Promedio – P8	0.9119
Media	0.9308
Desviación Estándar	0.0289

En la Figura 4.22 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.7, donde puede verse por simple inspección una distribución normal y que todos los sujetos de prueba están cercanos a la media.

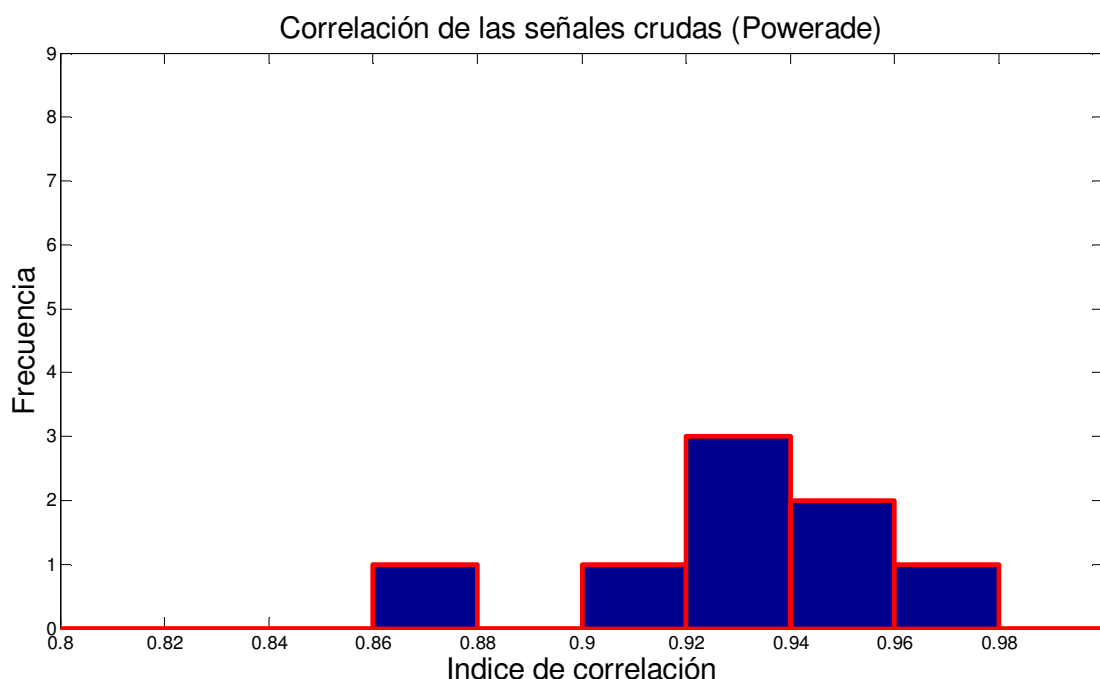


Figura 4.22 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en envases de POWERADE.

4.5.2.1.2 Envases de POWERADE y FFT

En la Figura 4.23 se muestran las gráficas de las FFT de las señales reflejadas en envases de POWERADE, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

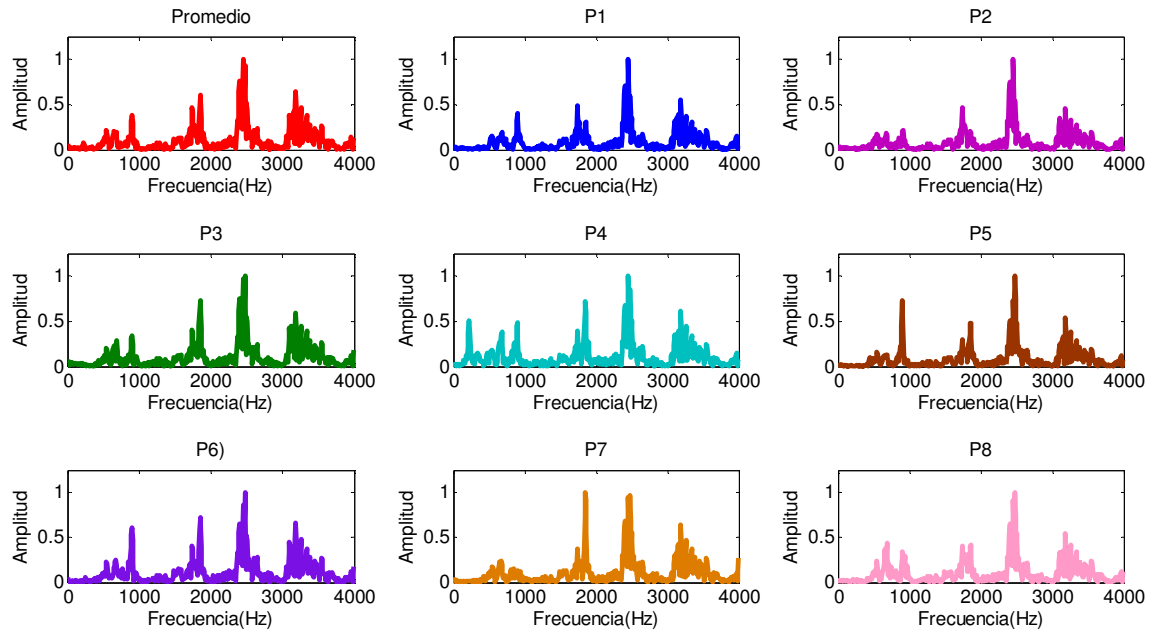


Figura 4.23 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en envases de POWERADE.

En la Tabla 4.8 se muestran los índices de correlación de las FFT de las señales de todos los sujetos de prueba con la FFT de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.8 Índice de correlación de la FFT en envases de POWERADE.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – P1	0.9605
Promedio – P2	0.9293
Promedio – P3	0.9814
Promedio – P4	0.9268
Promedio – P5	0.9383
Promedio – P6	0.9698
Promedio – P7	0.9557
Promedio – P8	0.9563
Media	0.9523
Desviación Estándar	0.0194

En la Figura 4.24 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.8, donde puede verse por simple inspección que todos los sujetos de prueba están concentrados alrededor de la media y la distribución es normal.

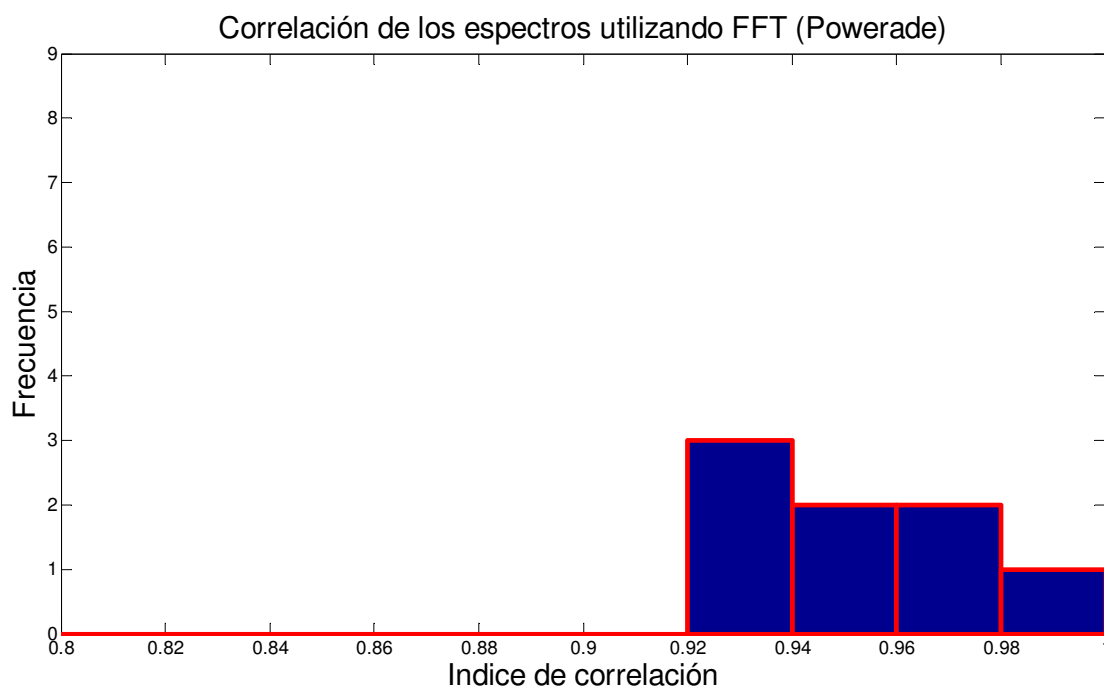


Figura 4.24 Histograma de los índices de correlación de las FFT en envases de POWERADE.

4.5.2.1.3 Envases de POWERADE y DEP AR(10)

En la Figura 4.25 se muestran las gráficas de la DEP con un modelo AR(10) de las señales reflejadas en envases de POWERADE, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

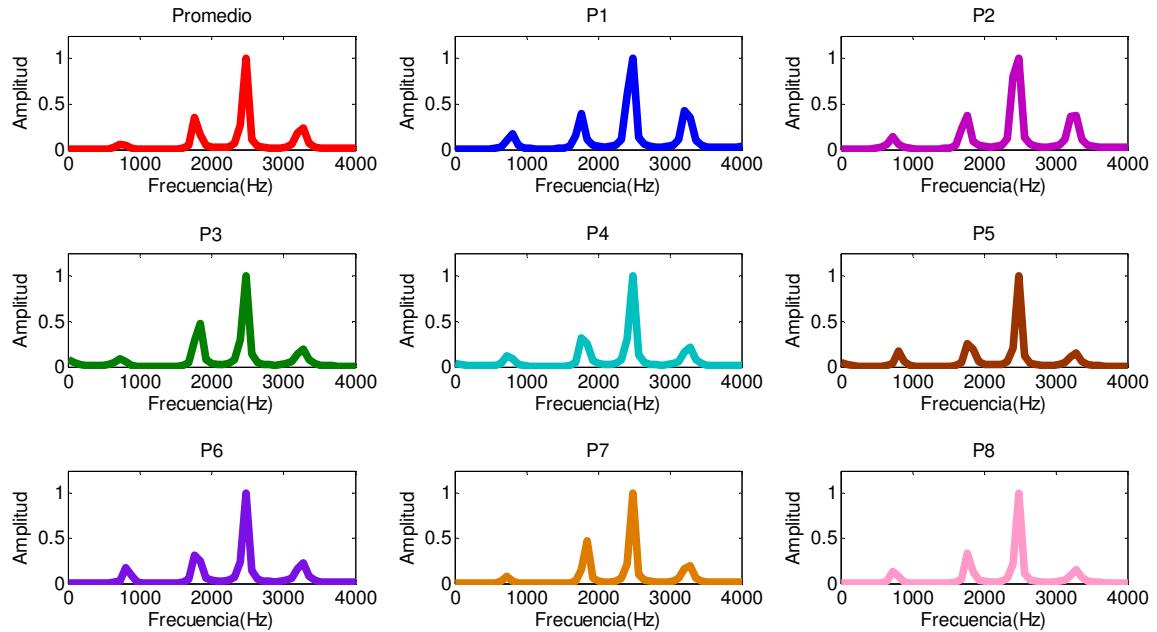


Figura 4.25 DEP con un modelo AR(10) de la señal en un envase de POWERADE.

En la Tabla 4.9 se muestran los índices de correlación de las DEP AR(10) de las señales de todos los sujetos de prueba con la DEP AR(10) de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.9 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en envases de POWERADE.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – P1	0.9420
Promedio – P2	0.9025
Promedio – P3	0.9540
Promedio – P4	0.9917
Promedio – P5	0.9803
Promedio – P6	0.9853
Promedio – P7	0.9405
Promedio – P8	0.9894
Media	0.9607
Desviación Estándar	0.0315

En la Figura 4.26 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.9, donde puede verse por simple inspección que todos los índices de correlación son mayores a 0.9 el cual es un valor deseable para índices de correlación, ya que este nos dice que hay al menos un 90% de similitud con la señal promedio.

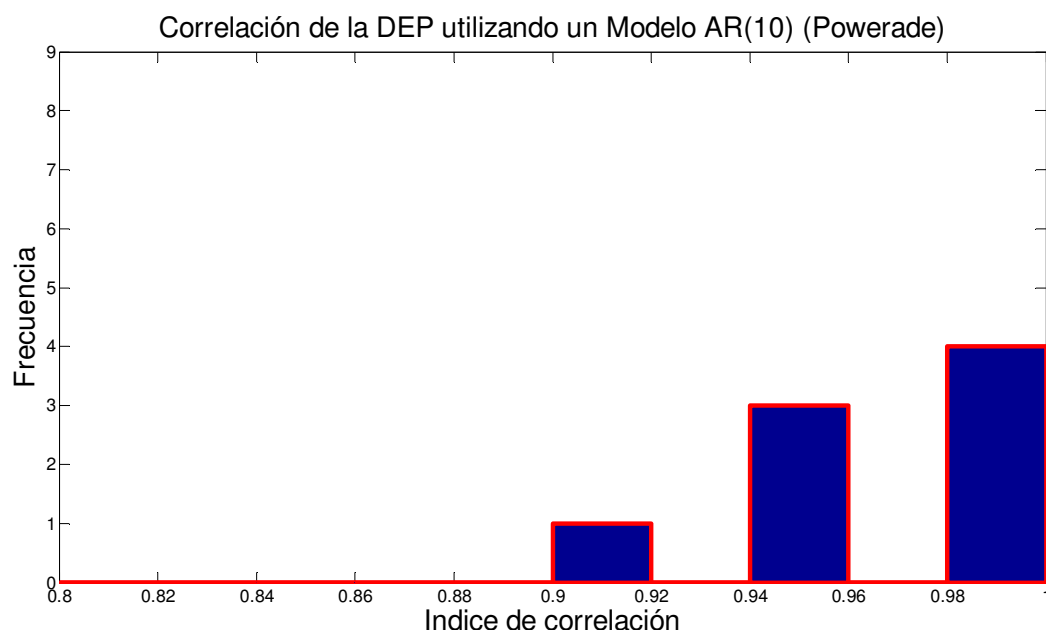


Figura 4.26 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en envases de POWERADE.

4.5.2.2 Envases de FUZE TEA

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas con envases de FUZE TEA.

4.5.2.2.1 Envases de FUZE TEA y señales crudas

En la Figura 4.27 se muestran las gráficas de señales crudas reflejadas en envases de FUZE TEA (8 sujetos de prueba) y la señal promediada de todas las señales, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X número de muestra.

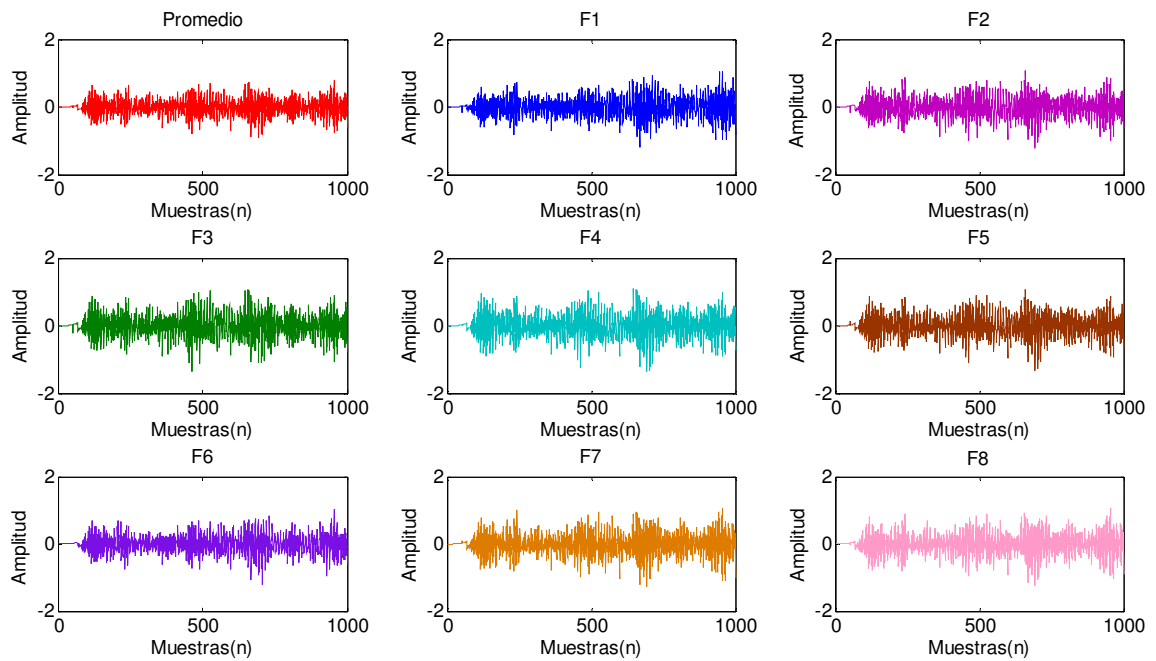


Figura 4.27 Señales crudas capturadas en envases de FUZE TEA.

En la Tabla 4.10 se muestran los índices de correlación de las señales crudas de todos los sujetos de prueba con la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.10 Índice de correlación de señales crudas en envases de FUZE TEA.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – P1	0.8461
Promedio – P2	0.9726
Promedio – P3	0.9493
Promedio – P4	0.9592
Promedio – P5	0.9681
Promedio – P6	0.9145
Promedio – P7	0.9649
Promedio – P8	0.9628
Media	0.9422
Desviación Estándar	0.0429

En la Figura 4.28 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.10, donde puede verse por simple inspección que solo un sujeto de prueba (P1) está alejado de la media.

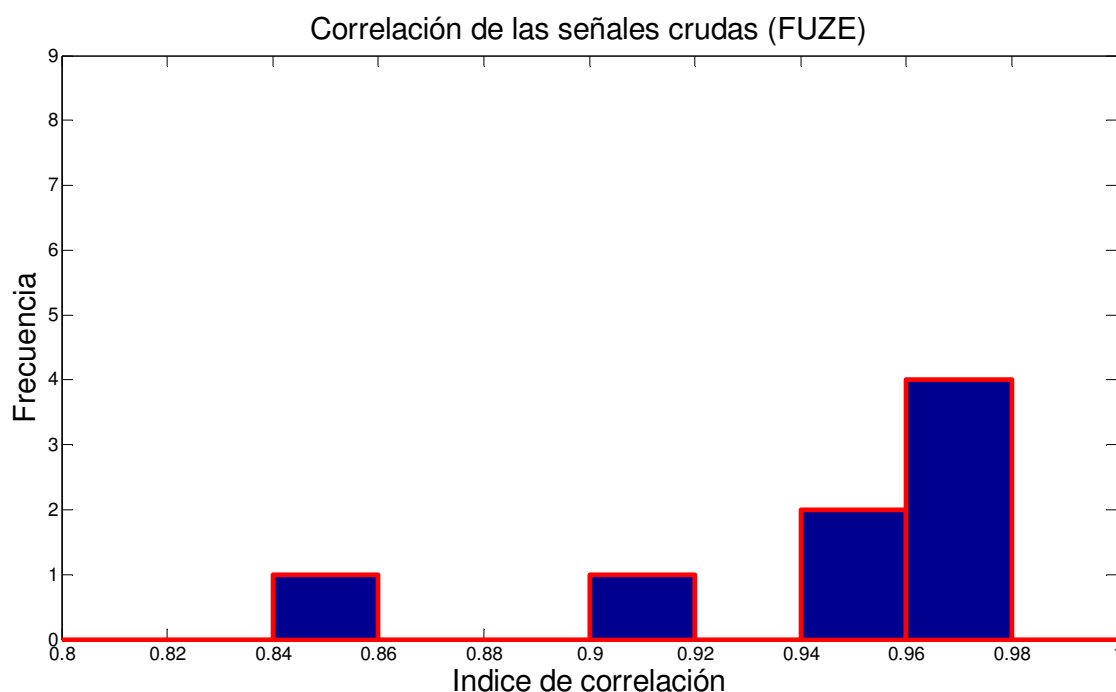


Figura 4.28 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en envases de FUZE.

4.5.2.2 Envases de FUZE TEA y FFT

En la Figura 4.29 se muestran las gráficas de las FFT de las señales reflejadas en envases de FUZE TEA, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

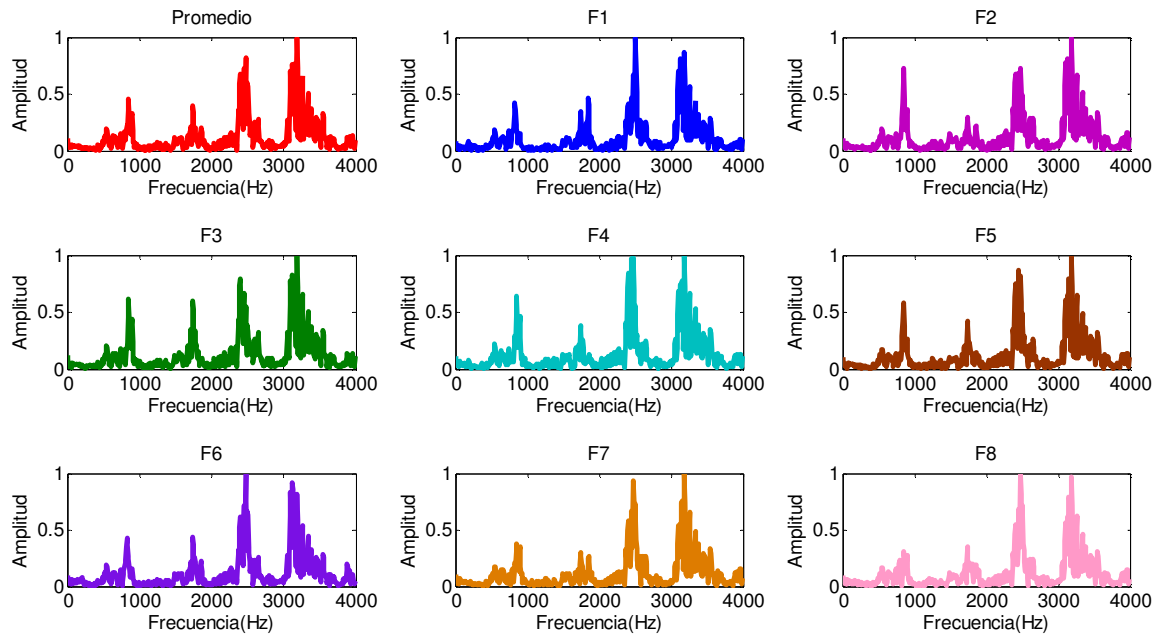


Figura 4.29 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en envases de FUZE TEA.

En la Tabla 4.11 se muestran los índices de correlación de las FFT de las señales de todos los sujetos de prueba con la FFT de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.11 Índice de correlación de la FFT en envases de FUZE TEA.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – P1	0.9235
Promedio – P2	0.9804
Promedio – P3	0.9666
Promedio – P4	0.9824
Promedio – P5	0.9828
Promedio – P6	0.9631
Promedio – P7	0.9805
Promedio – P8	0.9743
Media	0.9692
Desviación Estándar	0.0199

En la Figura 4.30 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.11, donde puede verse por simple inspección que todos los sujetos de prueba están concentrados alrededor de la media y el índice de correlación es mayor a 92% en todos los casos.

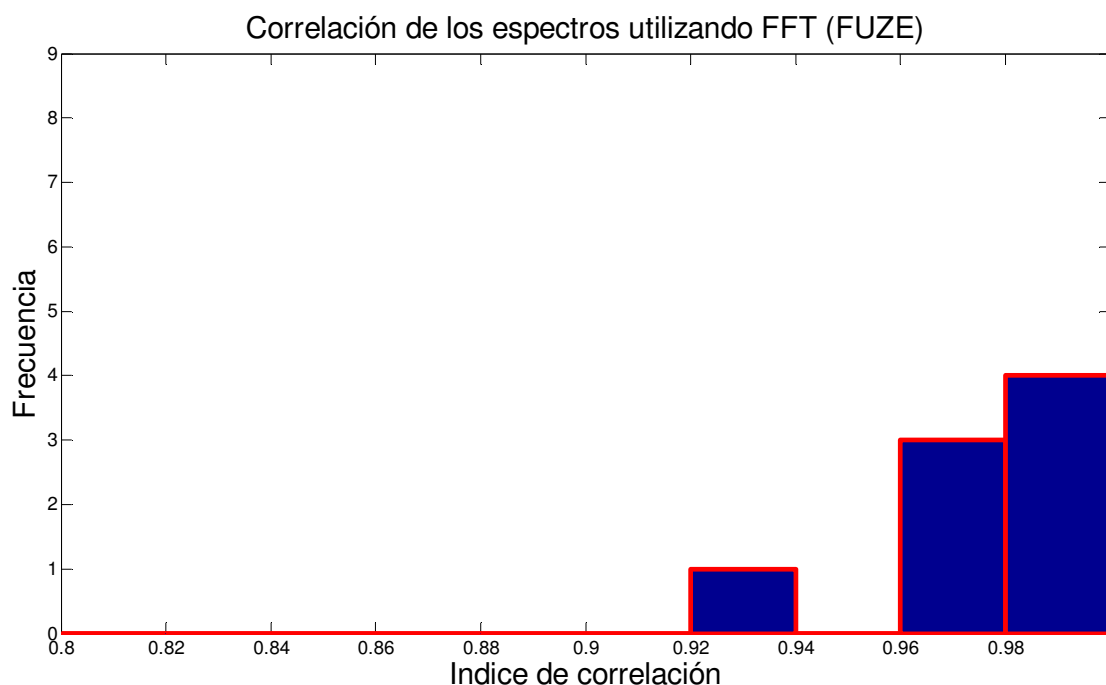


Figura 4.30 Histograma de los índices de correlación de las FFT en envases de FUZE.

4.5.2.2.3 Envases de FUZE TEA y DEP AR(10)

En la Figura 4.31 se muestran las gráficas de la DEP con un modelo AR(10) de las señales reflejadas en envases de FUZE TEA, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

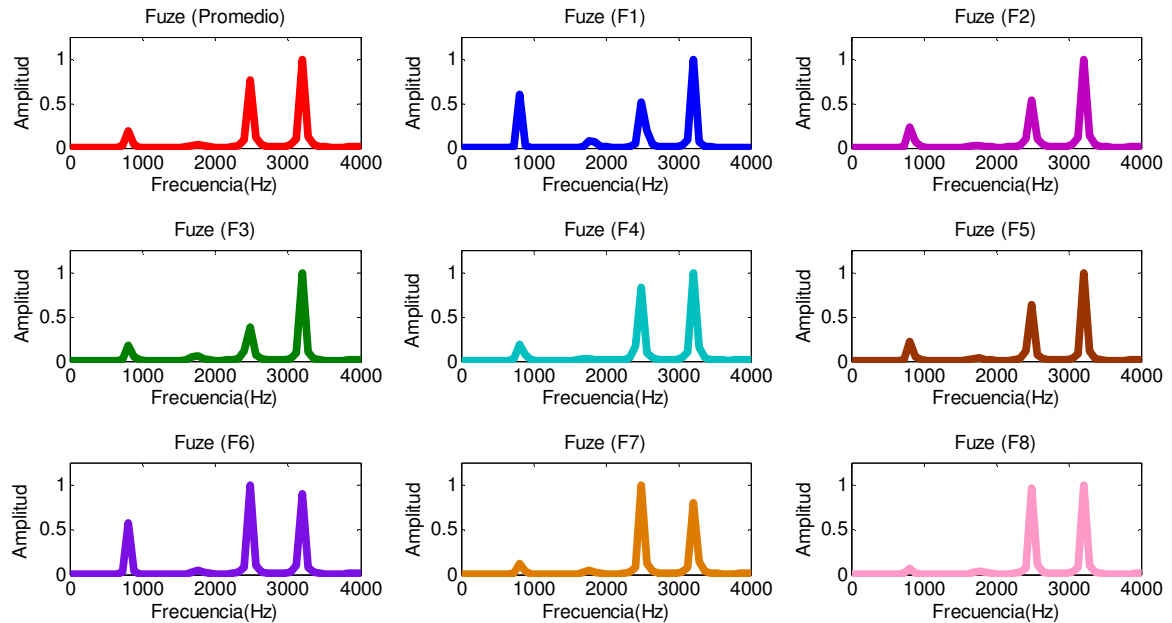


Figura 4.31 DEP con un modelo AR(10) de la señal en un envase de FUZE TEA.

En la Tabla 4.12 se muestran los índices de correlación de las DEP AR(10) de las señales de todos los sujetos de prueba con la DEP AR(10) de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.12 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en envases de FUZE TEA.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – P1	0.9181
Promedio – P2	0.9836
Promedio – P3	0.9566
Promedio – P4	0.9970
Promedio – P5	0.9946
Promedio – P6	0.9481
Promedio – P7	0.9683
Promedio – P8	0.9878
Media	0.9692
Desviación Estándar	0.0272

En la Figura 4.32 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.12, donde puede verse por simple inspección que todos los índices de correlación son mayores a 0.9 el cual es un valor deseable para índices de correlación, ya que este nos dice que hay al menos un 90% de similitud con la señal promedio.

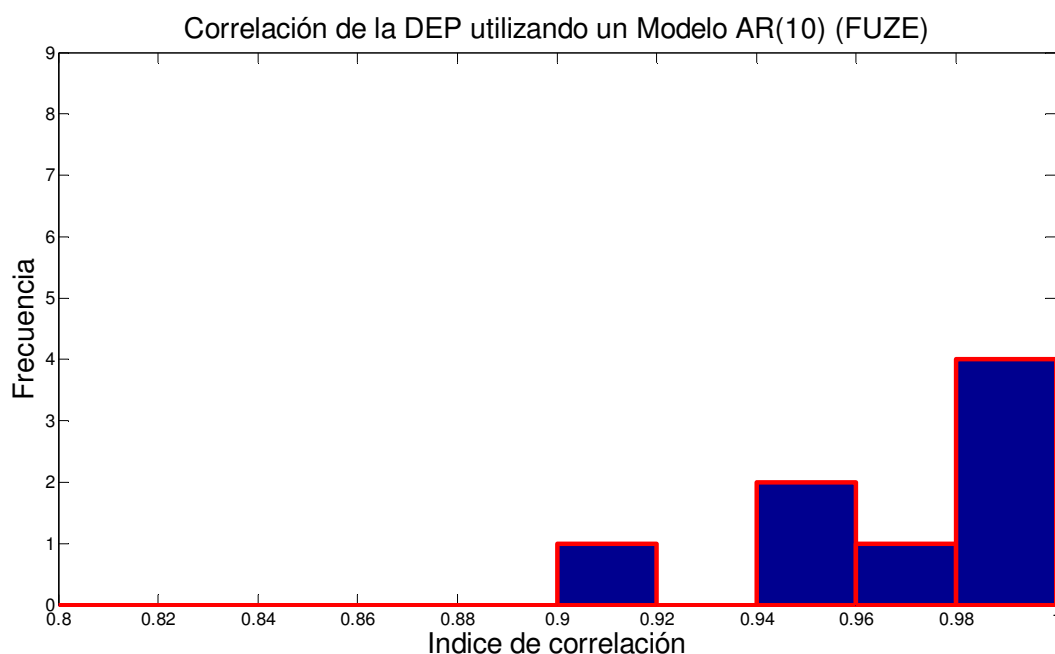


Figura 4.32 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en envases de FUZE TEA.

4.5.2.3 Envases de GATORADE

A continuación se muestran los resultados de las pruebas realizadas con envases de GATORADE.

4.5.2.3.1 Envases de GATORADE y señales crudas

En la Figura 4.33 se muestran las gráficas de señales crudas reflejadas en envases de GATORADE (8 sujetos de prueba) y la señal promediada de todas las señales, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X número de muestra.

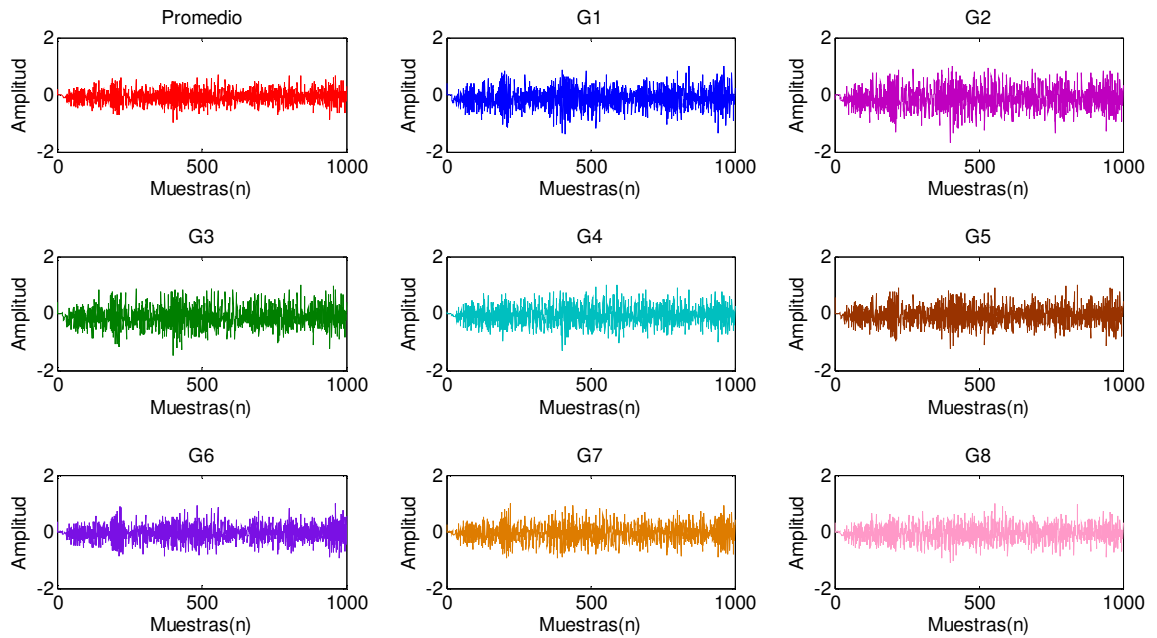


Figura 4.33 Señales crudas capturadas en envases de GATORADE.

En la Tabla 4.13 se muestran los índices de correlación de las señales crudas de todos los sujetos de prueba con la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.13 Índice de correlación de señales crudas en envases de GATORADE.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – P1	0.9358
Promedio – P2	0.9303
Promedio – P3	0.9350
Promedio – P4	0.8591
Promedio – P5	0.9653
Promedio – P6	0.8743
Promedio – P7	0.8804
Promedio – P8	0.9050
Media	0.9106
Desviación Estándar	0.0369

En la Figura 4.34 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.13, donde puede verse por simple inspección que se tiene una distribución normal y que en todos los casos el índice de correlación es mayor 84%.

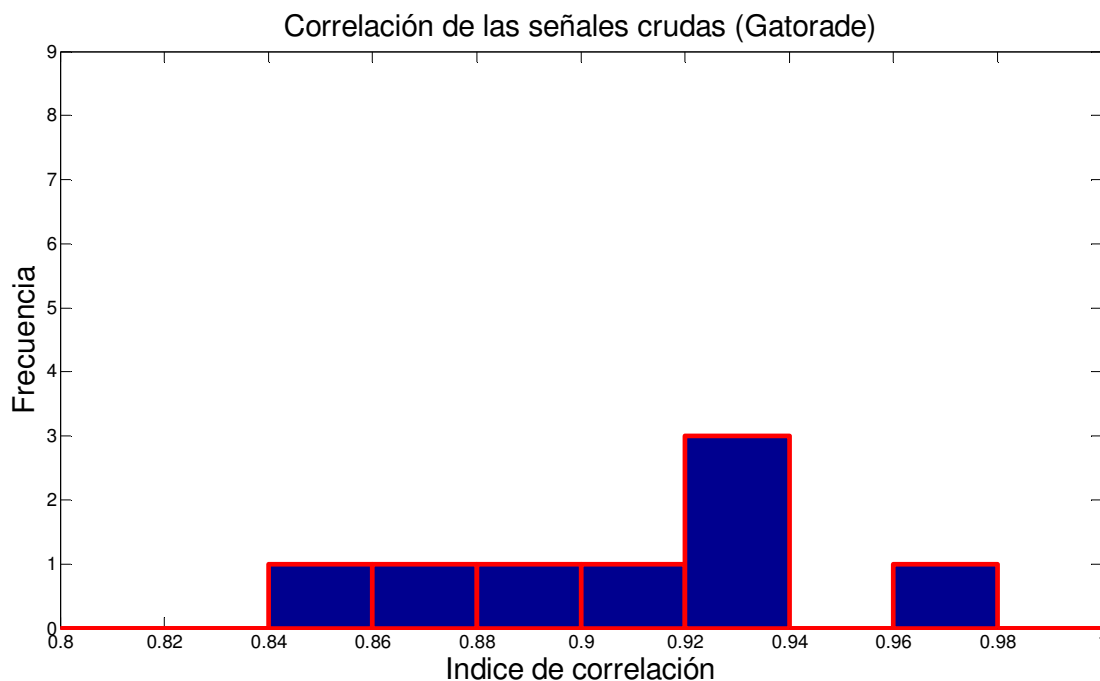


Figura 4.34 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en envases de GATORADE.

4.5.2.3.2 Envases de GATORADE y FFT

En la Figura 4.35 se muestran las gráficas de las FFT de las señales reflejadas en envases de GATORADE, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

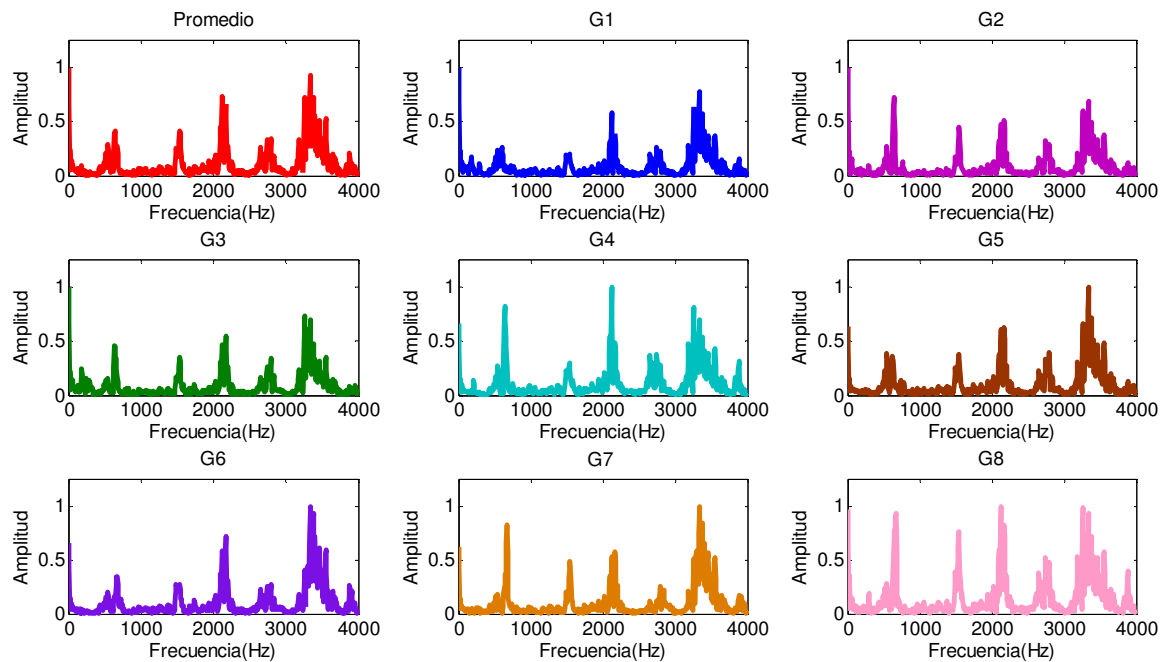


Figura 4.35 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en envases de GATORADE.

En la Tabla 4.14 se muestran los índices de correlación de las FFT de las señales de todos los sujetos de prueba con la FFT de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.14 Índice de correlación de la FFT en envases de GATORADE.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – P1	0.9501
Promedio – P2	0.9466
Promedio – P3	0.9522
Promedio – P4	0.9146
Promedio – P5	0.9656
Promedio – P6	0.9353
Promedio – P7	0.9214
Promedio – P8	0.9349
Media	0.9401
Desviación Estándar	0.0169

En la Figura 4.36 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.14, donde puede verse por simple inspección una distribución normal bien formada y que los índices de correlación en todos los casos es mayor a 90%.

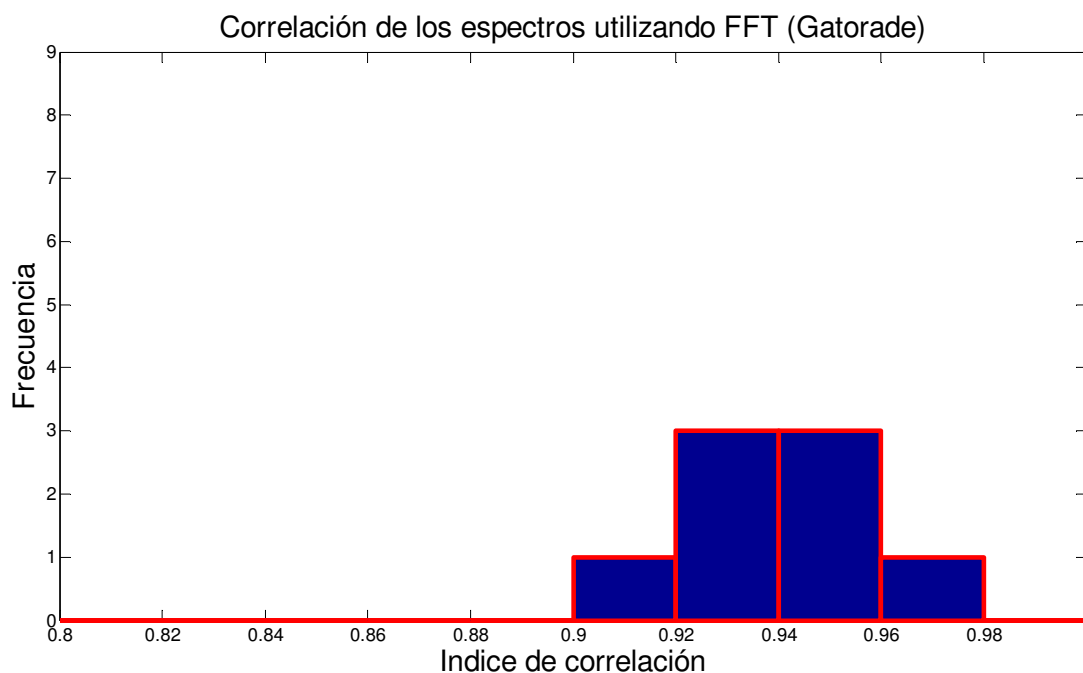


Figura 4.36 Histograma de los índices de correlación de las FFT en envases de GATORADE.

4.5.2.3.3 Envases de GATORADE y DEP AR(10)

En la Figura 4.37 se muestran las gráficas de la DEP con un modelo AR(10) de las señales reflejadas en envases de GATORADE, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

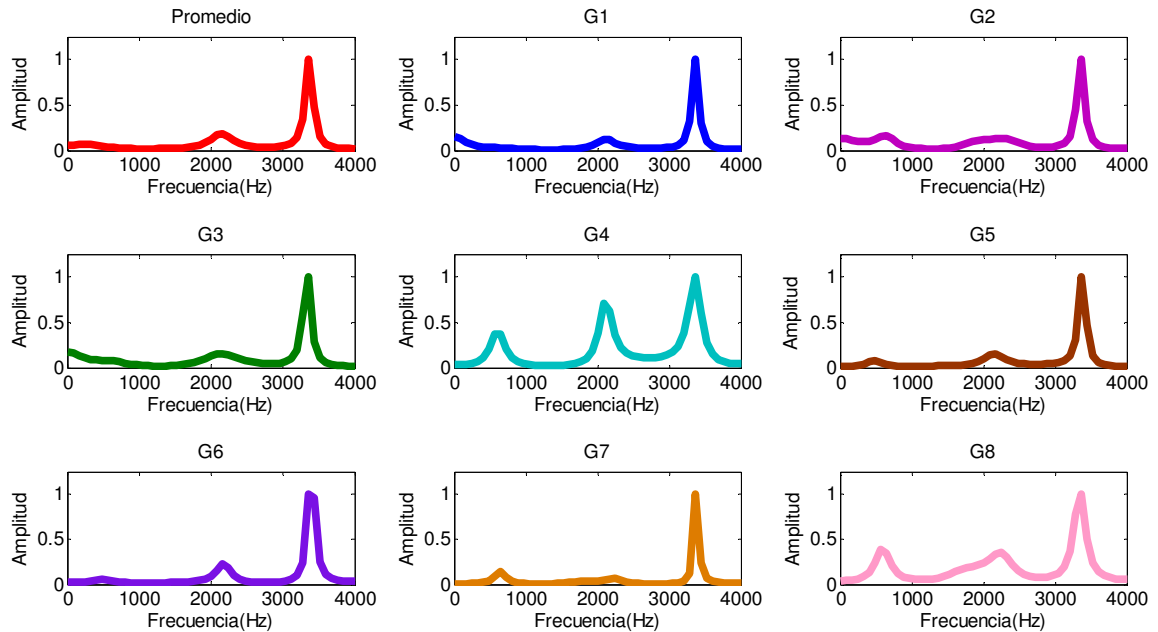


Figura 4.37 DEP con un modelo AR(10) de la señal en un envase de GATORADE.

En la Tabla 4.15 se muestran los índices de correlación de las DEP AR(10) de las señales de todos los sujetos de prueba con la DEP AR(10) de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.15 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en envases de GATORADE.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – P1	0.9763
Promedio – P2	0.9570
Promedio – P3	0.9467
Promedio – P4	0.8187
Promedio – P5	0.9950
Promedio – P6	0.9295
Promedio – P7	0.9306
Promedio – P8	0.8663
Media	0.9275
Desviación Estándar	0.0583

En la Figura 4.38 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.15, donde puede verse por simple inspección que tiene una distribución normal, que un par de sujetos de prueba (P4 y P8) y que el índice de correlación en todos los casos es mayor a 80%.

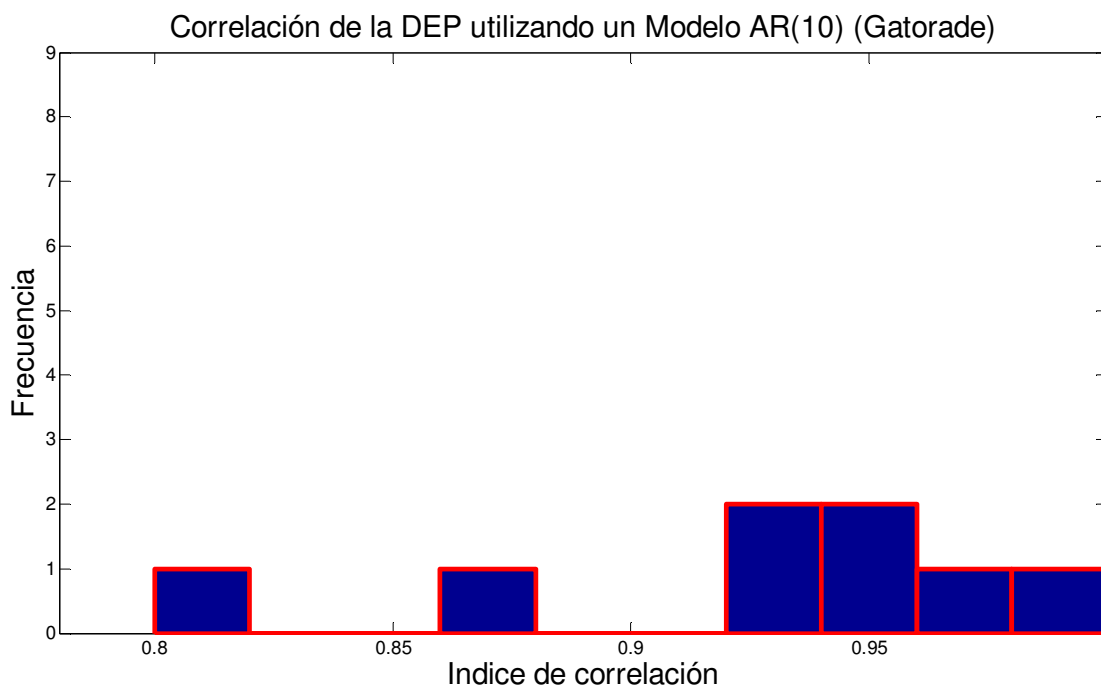


Figura 4.38 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en envases de GATORADE.

4.5.3 Cajas acústicas de guitarras

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas realizadas en cajas acústicas correspondientes a un bajo, tres guitarras clásicas y un ukelele.

4.5.3.1 Cajas acústicas y señales crudas

En la Figura 4.39 se muestran las gráficas de señales crudas reflejadas en cajas acústicas de guitarras y la señal promediada de todas las señales, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X número de muestra.

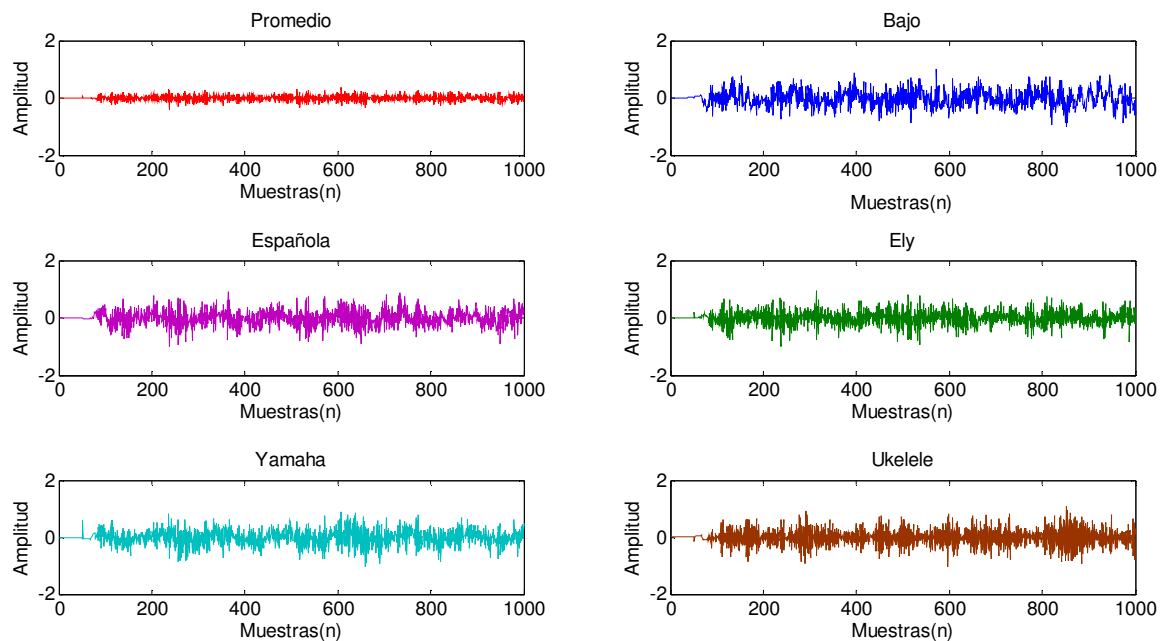


Figura 4.39 Señales crudas capturadas en cajas acústicas.

En la Tabla 4.16 se muestran los índices de correlación de las señales crudas de todos los sujetos de prueba con la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.16 Índice de correlación de señales crudas en cajas acústicas.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – Bajo	0.6889
Promedio – Española	0.7780
Promedio – Ely	0.7614
Promedio – Yamaha	0.7947
Promedio – Ukelele	0.5151
Media	0.7076
Desviación Estándar	0.1149

En la Figura 4.40 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.16, donde puede verse por simple inspección que se tiene una distribución normal y que un sujeto de prueba (Ukelele) está alejado de la media.

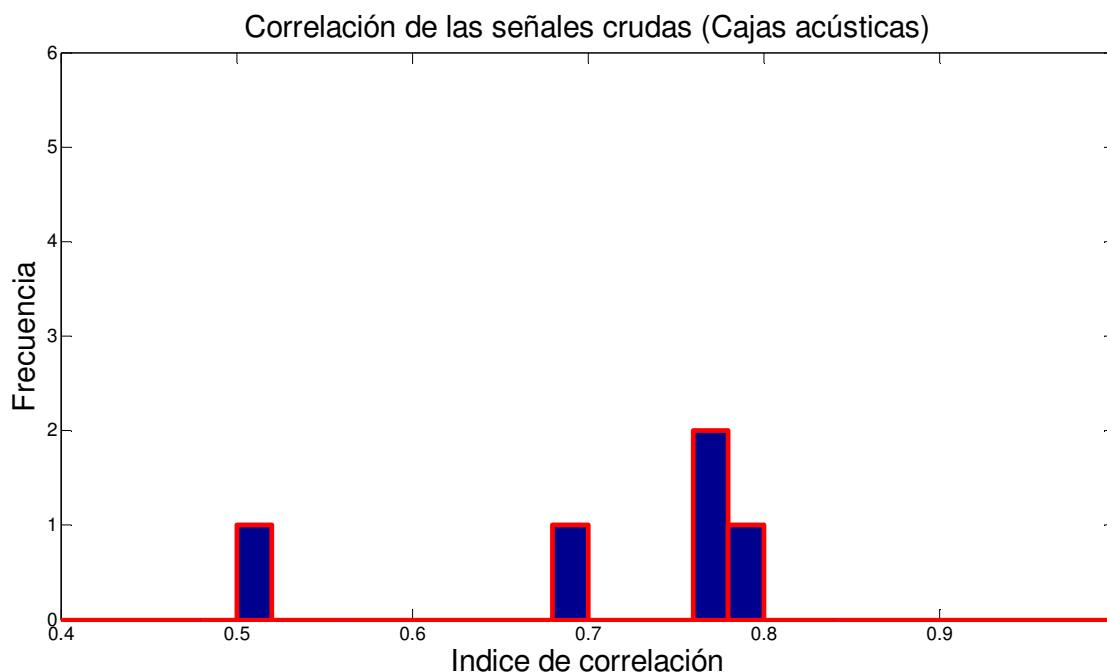


Figura 4.40 Histograma de los índices de correlación de señales crudas en cajas acústicas.

4.5.3.2 Cajas acústicas y FFT

En la Figura 4.41 se muestran las gráficas de las FFT de las señales reflejadas en cajas acústicas, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

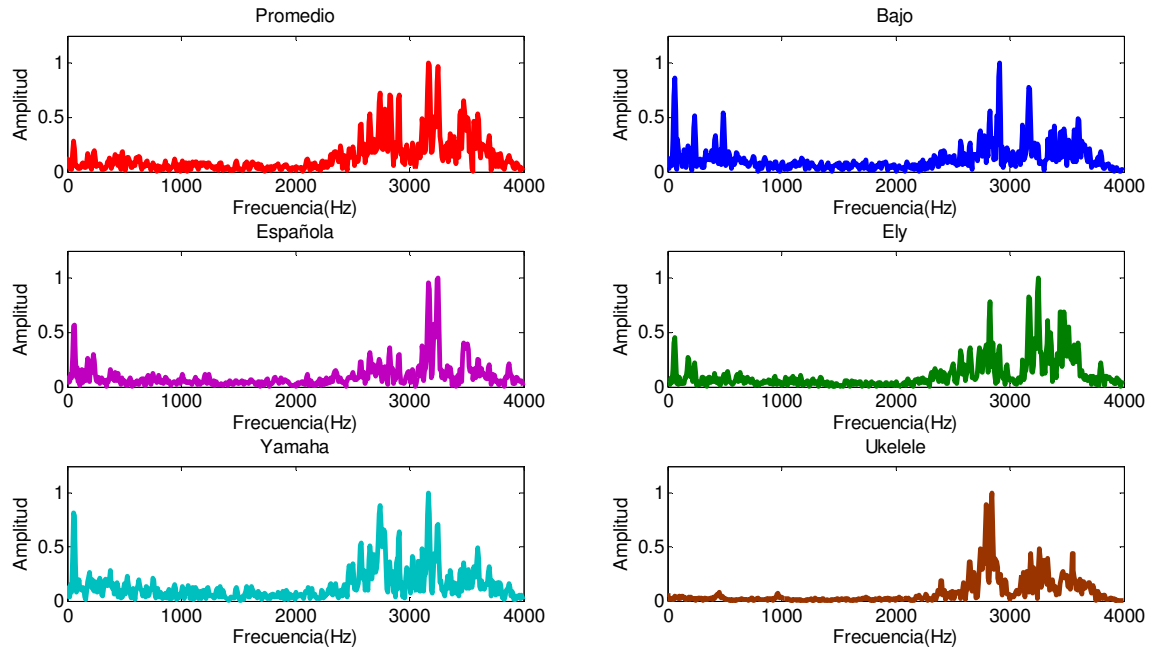


Figura 4.41 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal en cajas acústicas.

En la Tabla 4.17 se muestran los índices de correlación de las FFT de las señales de todos los sujetos de prueba con la FFT de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.17 Índice de correlación de la FFT en cajas acústicas.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – Bajo	0.7188
Promedio – Española	0.8179
Promedio – Ely	0.8659
Promedio – Yamaha	0.8272
Promedio – Ukelele	0.6183
Media	0.7696
Desviación Estándar	0.1005

En la Figura 4.42 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.17, donde puede verse por simple inspección los datos dispersos.

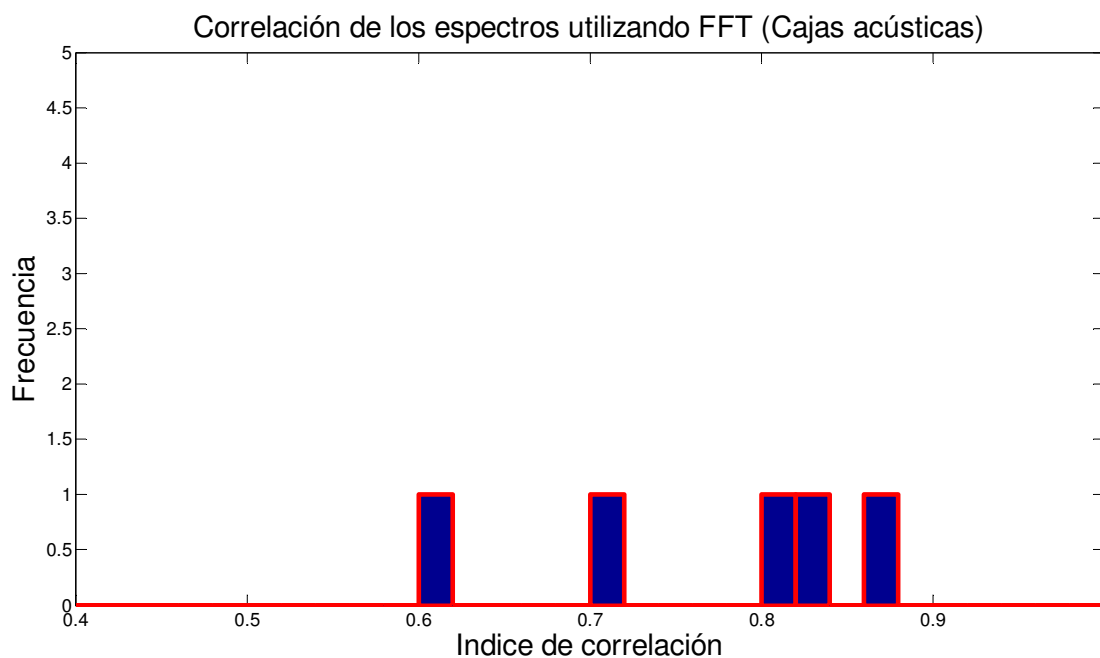


Figura 4.42 Histograma de los índices de correlación de las FFT en cajas acústicas.

4.5.3.3 Cajas acústicas y DEP AR(10)

En la Figura 4.43 se muestran las gráficas de la DEP con un modelo AR(10) de las señales reflejadas en cajas acústicas, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

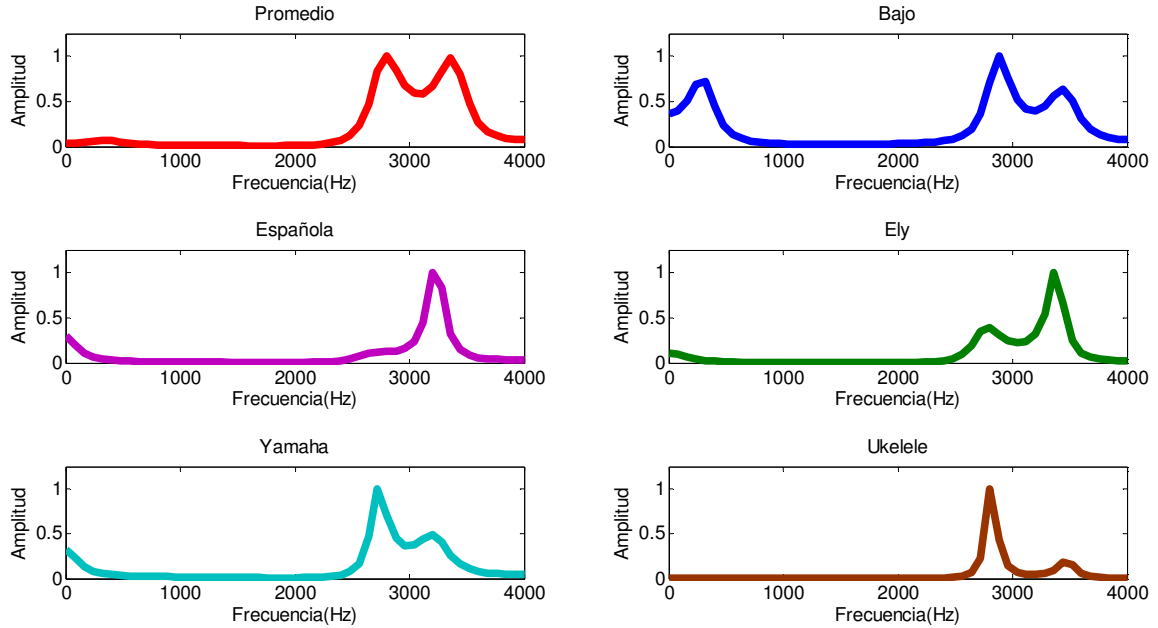


Figura 4.43 DEP con un modelo AR(10) de la señal en cajas acústicas.

En la Tabla 4.18 se muestran los índices de correlación de las DEP AR(10) de las señales de todos los sujetos de prueba con la DEP AR(10) de la señal promedio de todas ellas. En esta tabla también se muestran la media y la desviación estándar de todos los índices de correlación.

Tabla 4.18 Índice de correlación de la DEP con un modelo AR(10) en cajas acústicas.

Sujetos de comparación	Índice de correlación
Promedio – Bajo	0.7219
Promedio – Española	0.5962
Promedio – Ely	0.8904
Promedio – Yamaha	0.8172
Promedio – Ukelele	0.6766
Media	0.7404
Desviación Estándar	0.1158

En la Figura 4.44 se muestra el histograma de los índices de correlación de la Tabla 4.18, donde puede verse por simple inspección que los datos están muy dispersos.

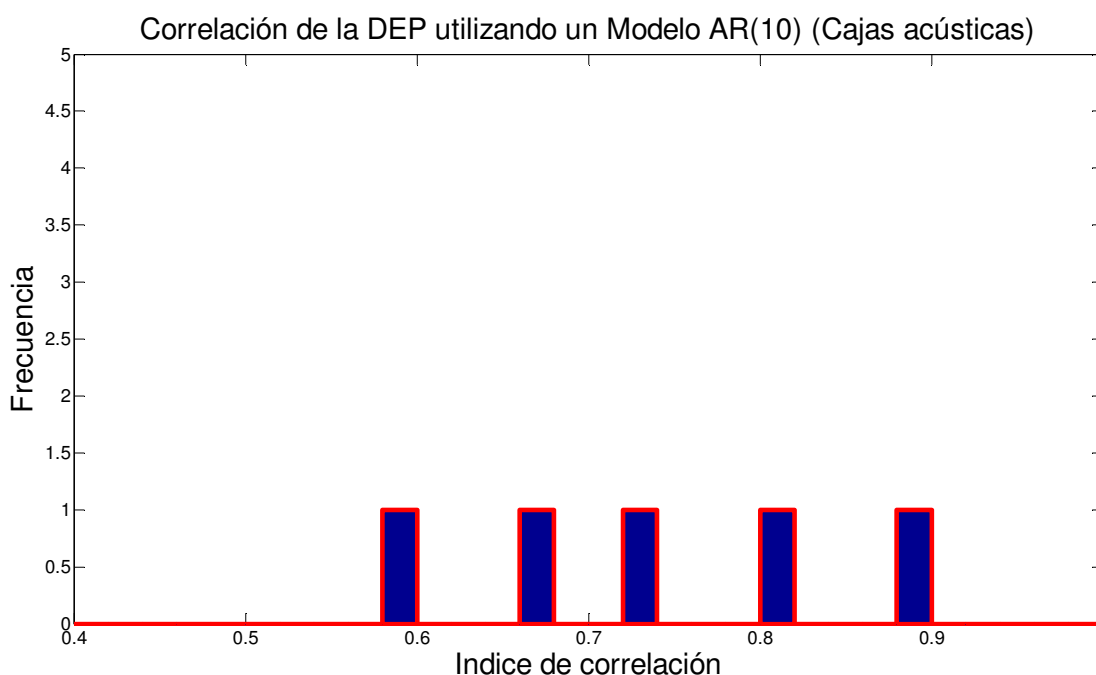


Figura 4.44 Histograma de los índices de correlación de las DEP con un modelo AR(10) en cajas acústicas.

4.5.4 Índice de correlación entre distintas cavidades acústicas.

El objetivo de este apartado es comparar los espectros promedio de todas las cavidades acústicas bajo prueba, con la finalidad de obtener datos sobre los índices de correlación que pueden servir para establecer umbrales de aceptación, de manera que no se realicen falsas detecciones esto quiere decir que el sistema no confunda una cavidad con otra parecida.

En la Figura 4.45 se muestran las gráficas de las FFT de las señales reflejadas promedio de todos los grupos que fueron sujetos o cavidades de prueba, en el eje Y se tiene amplitud y en el eje X frecuencia en Hz.

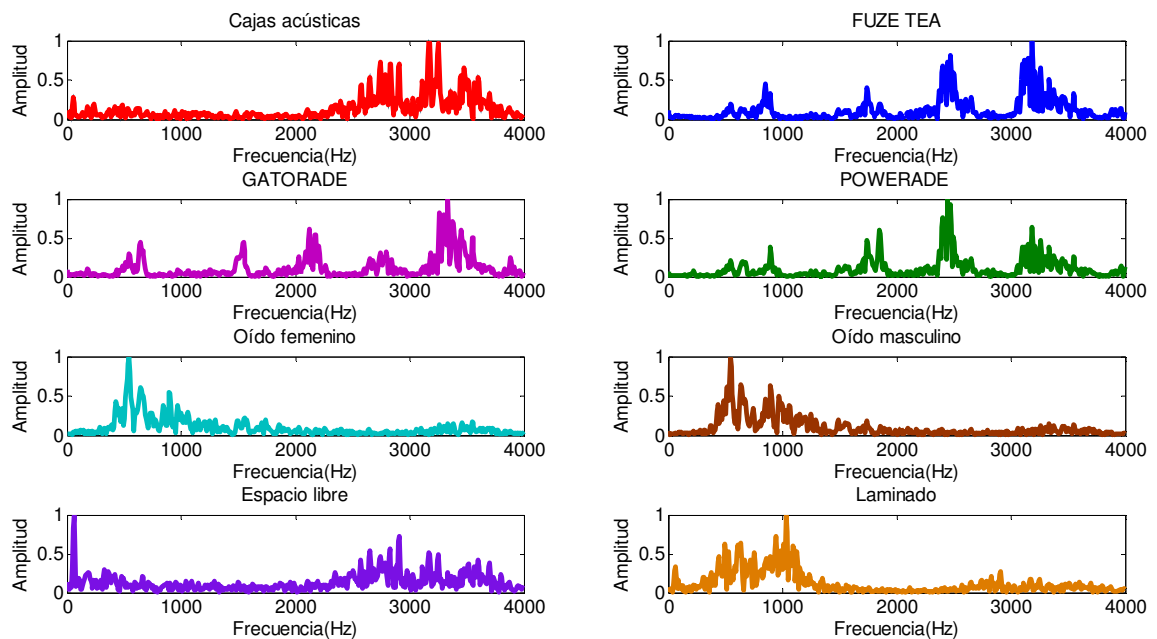


Figura 4.45 Transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal promedio de distintas cavidades, espacio libre y sobre una superficie laminada.

En la Tabla 4.19 se muestran los índices de correlación obtenidos al hacer la comparación entre los espectros promedios de las distintas cavidades, el espacio libre y una superficie laminada, en la primer columna se le asigna un numero consecutivo a cada comparación, la segunda columna corresponde al nombre de las dos cavidades comparadas y la tercera al índice de correlación obtenido al comparar ambas cavidades.

Tabla 4.19 Índice de correlación de las FFT promedio de distintas cavidades.

	Sujetos de comparación	Índice de correlación
1	Cajas Acústicas-POWERADE	0.1819
2	Cajas Acústicas-FUZE TEA	0.3215
3	Cajas Acústicas-GATORADE	0.3009
4	Cajas Acústicas-Oído masculino	-0.1738
5	Cajas Acústicas-Oído Femenino	-0.1645
6	POWERADE-FUZE TEA	0.8690
7	POWERADE-GATORADE	0.2508
8	POWERADE-Oído masculino	0.0756
9	POWERADE-Oído femenino	0.0843
10	FUZE TEA- GATORADE	0.3201
11	FUZE TEA- Oído masculino	0.0325
12	FUZE TEA- Oído femenino	0.0233
13	GATORADE- Oído masculino	0.1210
14	GATORADE- Oído femenino	0.1536
15	Oído masculino- Oído femenino	0.9412
16	Espacio libre – Cajas acústicas	0.7328
17	Espacio libre – FUZE TEA	0.1415
18	Espacio libre – POWERADE	0.0699
19	Espacio libre – GATORADE	0.1223
20	Espacio libre – Oído masculino	-0.1811
21	Espacio libre – Oído femenino	-0.1619
22	Espacio libre – Laminado	0.0449
23	Laminado – Cajas acústicas	0.0002
24	Laminado – FUZE TEA	-0.1234
25	Laminado – POWERADE	-0.1377
26	Laminado – GATORADE	-0.1047
27	Laminado – Oído masculino	0.5703
28	Laminado – Oído femenino	0.5191

En la Figura 4.46 se muestra el diagrama de dispersión correspondiente a los datos de la Tabla 4.19, el eje Y corresponde al índice de correlación P_{xy} y el eje X corresponde al número de comparación C . Por simple inspección se puede ver que hay dos datos próximos a un índice de correlación de $P_{xy}(C)=1$, la comparación 6 (envase de POWERADE y FUZE TEA) y la comparación 15 (oído masculino y oído femenino), al dirigirnos a la Tabla 4.19 podemos ver que se obtuvo un índice de correlación de $P_{xy}(6)= 0.8690$ y $P_{xy}(15)= 0.9412$ respectivamente.

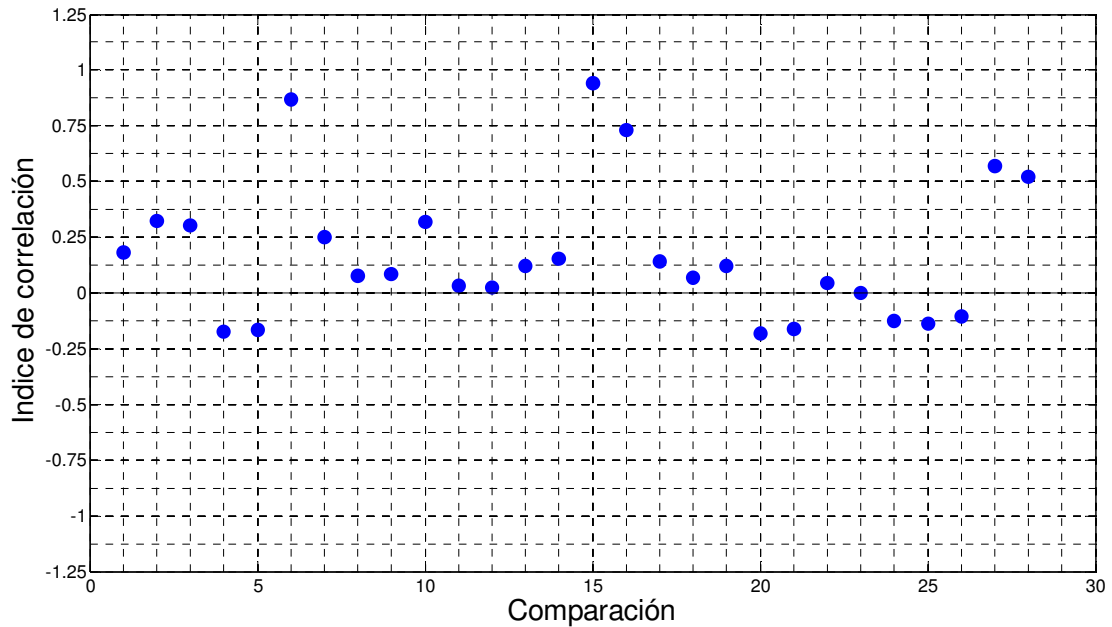


Figura 4.46 Diagrama de dispersión de los índices de correlación obtenidos al comparar distintas cavidades acústicas, el sensor orientado al espacio libre y sobre una superficie laminada.

4.5.5 Identificación paramétrica

En la Figura 4.47 se muestra la autocorrelación de cada una de las señales capturadas promedio de todas las cavidades acústicas bajo prueba, se puede observar por simple inspección que en todas las cavidades hay más de una señal reflejada, es muy notable un impulso al centro y una serie de impulsos de menor magnitud cercanos a este. El hecho de que exista más de una señal reflejada descarta a los modelos paramétricos para la identificación de estos sistemas, ya que solo contempla una salida en el esquema y aquí podemos ver más de una salida con distinta fase, esto debido a que se obtienen ecos de distintas direcciones.

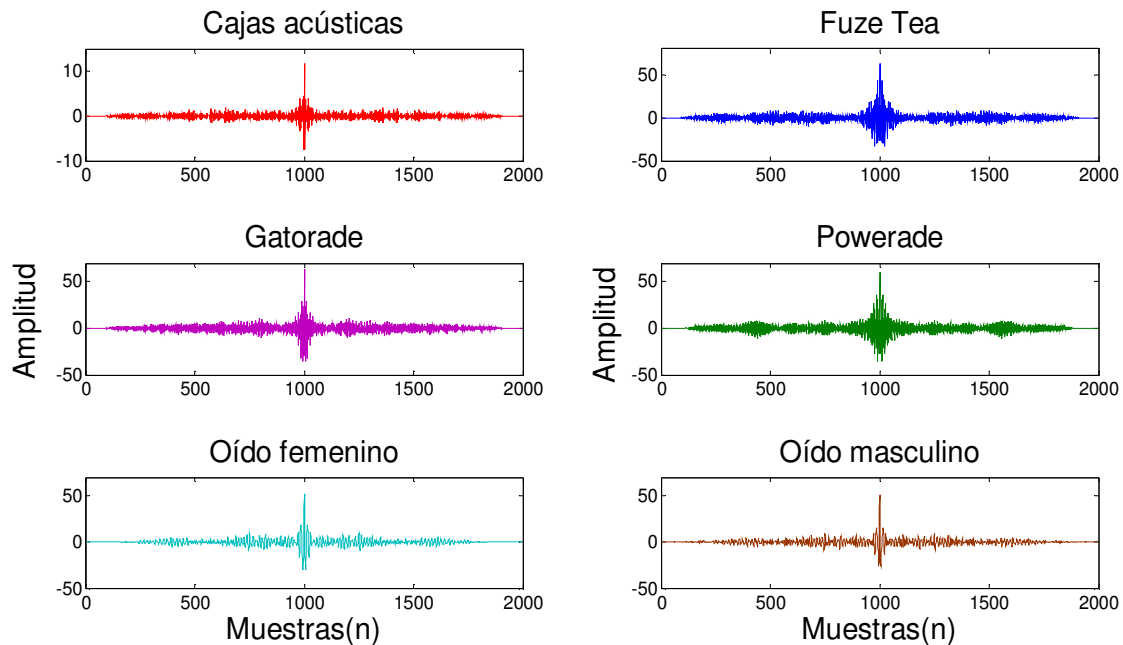


Figura 4.47 Autocorrelación de cada una de las cavidades acústicas bajo prueba.

4.5.6 Tiempo de ejecución.

Se muestran los resultados obtenidos al hacer análisis del tiempo de ejecución de los algoritmos de la FFT y la DEP AR.

En la Tabla 4.20 se muestran los tiempos de ejecución de la FFT y la DEP AR(10), se puede ver que el tiempo de ejecución de la DEP AR es menor al de la FFT, con un aproximado de 986% más veloz.

Tabla 4.20 Tiempo de ejecución de la FFT y la DEP AR(10)

Algoritmo	Tiempo (ms)
FFT	160.9
AR	17.2

En la Figura 4.48 se muestra el gráfico de los resultados mostrados en la Tabla 4.20.

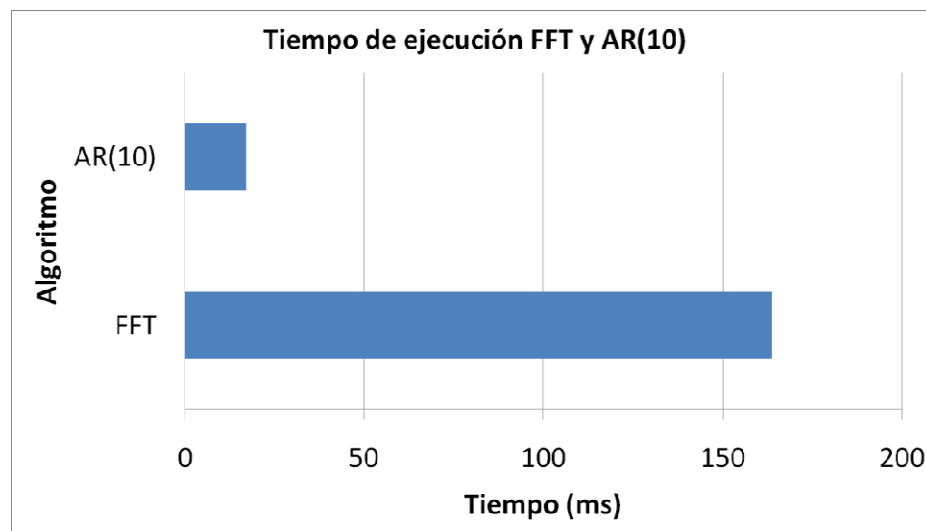


Figura 4.48 Tiempo de ejecución de la FFT y la DEP AR(10)

En la Tabla 4.21 se muestra el tiempo de ejecución de la DEP AR en función del orden.

Tabla 4.21 Tiempo de ejecución de la DEP AR en función del orden.

Orden (p)	Tiempo (ms)
5	17
10	17.2
15	17.9
20	18.5
25	19.3
30	19.5
35	21
40	23
45	24
50	26

En la Figura 4.49 se muestra el gráfico del tiempo de ejecución de la DEP AR en función del orden con los mismos datos de la Tabla 4.21. Se puede ver un comportamiento exponencial.

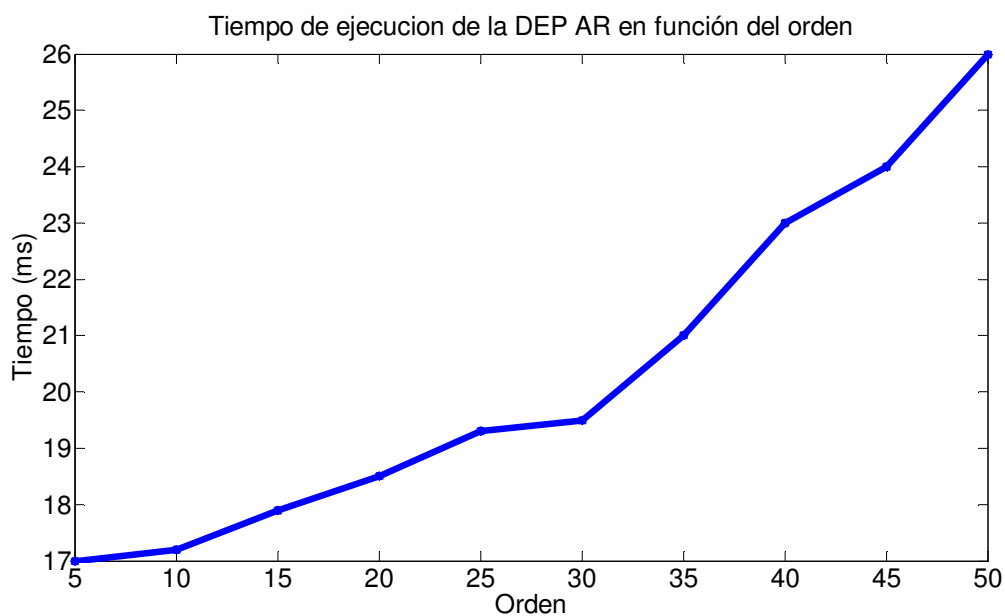


Figura 4.49 Tiempo de ejecución de la DEP AR en función del orden

Conclusiones y trabajo a futuro.

Conclusiones

1. *Se puede identificar el patrón reflejado en la cavidad acústica*

Ha habido una disyuntiva entre concluir si se detectó o se identificó la cavidad acústica, para ser precisos se revisan las definiciones de los dos conceptos. Según la RAE, “Detectar” significa: *Descubrir la existencia de algo que no era patente* [RAE]. “Identificar” significa: *Reconocer si una persona o cosa es la misma que se supone o se busca* [RAE]. Dado que ya se sabe lo que se busca debido a que se tiene el patrón de referencia guardado en memoria física, se puede llegar a la resolución o conclusión de que se puede identificar la cavidad mas no se puede identificar el sistema.

2. *No se puede identificar el sistema de la cavidad acústica*

Con el esquema y algoritmo propuesto, no es posible realizar la identificación del sistema, debido a que se captura más de una señal reflejada como se mostró y argumentó anteriormente en la Figura 4-47, y la identificación que se busca corresponde a un sistema de una entrada una salida (SISO).

3. *Se hace una mejor identificación del patrón reflejado mediante su transformación al dominio de la frecuencia en contraste con la comparación de señales crudas*

La desviación estándar del índice correlación fue mayor haciendo la comparación con señales crudas en contraste con la comparación de señales transformadas con la FFT y el modelo AR.

4. *Basándose en la desviación estándar la FFT mostró ser la mejor opción para la detección del patrón reflejado en contraste la DEP utilizando un modelo AR(10)*

Esto se concluye debido a que todas las pruebas para los distintos sujetos arrojaron una desviación estándar del índice de correlación menor con el uso de la FFT.

5. *En tiempo de procesamiento la DEP con modelo AR(10) mostro ser la mejor opción contra la FFT*

Se hizo un análisis de tiempo de ejecución de todos los métodos, utilizando los comandos TIC y TOC en el cual la DEP AR(10) tuvo un tiempo de ejecución 986% más veloz.

Trabajo a futuro

1. Hacer pruebas en ambientes con ruido ambiental

En las pruebas realizadas no se considera el ruido ambiental, al no haber perturbaciones en el ambiente donde se realizaron las pruebas esto no supuso un problema, sin embargo al encontrarnos en un espacio con ruido podría afectar ya que no bastaría con aplicar un filtrado clásico como lo serian filtros pasa bajas, pasa altas o pasa banda, ya que las perturbaciones contienen componentes espectrales dentro de la banda de interés, una de las opciones sería utilizar el filtrado adaptable.

2. Utilizar música o tonos como señal de prueba.

La aplicación de esta investigación en auriculares manos libres requeriría utilizar pistas de música o tonos ya que estos son utilizados como timbres en telefonía celular.

3. Probar algoritmo en DSP en modo stand-alone con prototipo de auricular comercial.

Las pruebas fueron realizadas con el NI-ELVIS y el DSP con interfaz a la computadora, donde se procesaron las muestras y se ejecuto el algoritmo, para un prototipo comercial sería necesario implementarlo entre distintas opciones en un DSP, microcontrolador o FPGA

Apéndice A. Hoja de datos del NI-ELVIS

NI ELVIS™ II Series Specifications

The specifications in this document refer to both the NI ELVIS II and the NI ELVIS II+ unless otherwise noted. These specifications are typical after a 30 minute warm-up time, at 25 °C, unless otherwise noted.

Analog Input

Number of channels	8 differential or 16 single ended
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	60 ppm max
Absolute accuracy	Refer to the AI Absolute Accuracy Table
Sample Rate	
Maximum	1.25 MS/s single channel, 1.00 MS/s multi channel (aggregate)
Minimum	No minimum
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns

Settling Time for Multichannel Measurements

Range	10 LSB for full scale	1 LSB for full scale
10 V, 5 V, 2 V, 1 V, 0.5 V	1 µs	2 µs
0.2 V, 0.1 V	2 µs	8 µs

Input coupling	DC
Input range	10 V, 5 V, 2 V, 1 V, 0.5 V, 0.2 V, 0.1 V
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)	11 V of AIGND
CMRR (DC to 60 Hz)	90 dB

Crosstalk @ 100 kHz	
(adjacent channel)	-70 dB
(non-adjacent channel)	-80 dB
Input Impedance	
Device on	
AI+ or AI- to AIGND	>10 GΩ 100 pF
Device off	
AI+ or AI- to AIGND	820 Ω
Input bias current	100 pA
Small signal bandwidth (-3 dB)	1.2 MHz
Input FIFO size	4095 samples
Scanlist memory	4095 entries
Data transfers	USB signal stream, programmed I/O

Overvoltage Protection (AI , AISENSE)

Device on	25 V for up to four lines
Device off	15 V for up to four lines
Input current during overvoltage condition	20 mA max per line

Analog Triggers

Number of triggers	1
Source	AI<0..15>, ScopeCH0, ScopeCH1
Functions	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Convert Clock, Sample Clock Timebase
Source level	Full scale
Resolution	10 bits



Apéndice B. Hoja de datos LM358

LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers

1 Features

- Available in 8-Bump DSBGA Chip-Sized Package, (See AN-1112, [SNVA009](#))
- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain: 100 dB
- Wide Bandwidth (Unity Gain): 1 MHz (Temperature Compensated)
- Wide Power Supply Range:
 - Single Supply: 3V to 32V
 - Or Dual Supplies: $\pm 1.5V$ to $\pm 16V$
- Very Low Supply Current Drain (500 μA)—Essentially Independent of Supply Voltage
- Low Input Offset Voltage: 2 mV
- Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground
- Differential Input Voltage Range Equal to the Power Supply Voltage
- Large Output Voltage Swing
- Unique Characteristics:
 - In the Linear Mode the Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground and the Output Voltage Can Also Swing to Ground, even though Operated from Only a Single Power Supply Voltage.
 - The Unity Gain Cross Frequency is Temperature Compensated.
 - The Input Bias Current is also Temperature Compensated.
- Advantages:
 - Two Internally Compensated Op Amps
 - Eliminates Need for Dual Supplies
 - Allows Direct Sensing Near GND and V_{OUT} Also Goes to GND
 - Compatible with All Forms of Logic
 - Power Drain Suitable for Battery Operation

2 Applications

- Active Filters
- General Signal Conditioning and Amplification
- 4- to 20-mA Current Loop Transmitters

3 Description

The LM158 series consists of two independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, dc gain blocks and all the conventional op-amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM158 series can be directly operated off of the standard 3.3-V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional $\pm 15V$ power supplies.

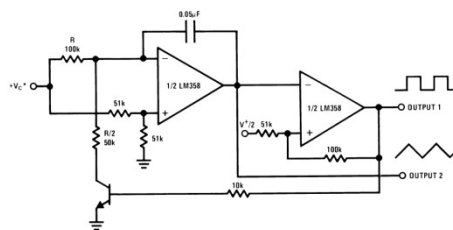
The LM358 and LM2904 are available in a chip sized package (8-Bump DSBGA) using TI's DSBGA package technology.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM158-N	TO-CAN (8)	9.08 mm x 9.09 mm
	CDIP (8)	10.16 mm x 6.502 mm
LM258-N	TO-CAN (8)	9.08 mm x 9.09 mm
	DSBGA (8)	1.31 mm x 1.31 mm
LM2904-N	SOIC (8)	4.90 mm x 3.91 mm
	PDIP (8)	9.81 mm x 6.35 mm
	TO-CAN (8)	9.08 mm x 9.09 mm
LM358-N	DSBGA (8)	1.31 mm x 1.31 mm
	SOIC (8)	4.90 mm x 3.91 mm
	PDIP (8)	9.81 mm x 6.35 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

Voltage Controlled Oscillator (VCO)



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Apéndice C. Hoja de datos micrófono DB-C9752

56

Condenser Microphone

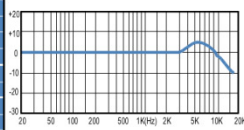
LAUBE

C9465



COLOUR	HOUSING	TERMINAL
SILVER	ALUMINUM	PIN / NIL

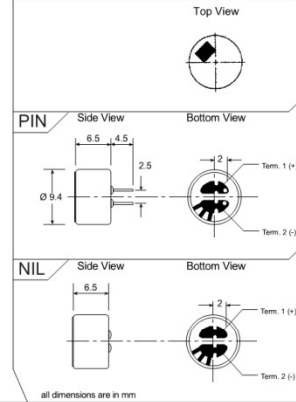
FREQUENCY RESPONSE CURVE



ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Model No.	C9465HB452
Sensitivity (dB)	-42 +/- 2
Directivity	OMNI
Power Supply Vs (V)	4.5
Resistance Loading RL (Ω)	1K
Max Current (mA)	0.8
Frequency Range (Hz)	50 - 16000
Max. Operation Voltage (V)	10
Sensitivity Reduction within 3 V (dB)	-3
S/N Ratio (dB)	> 60

DIMENSION

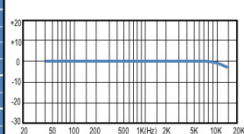


C9745



COLOUR	HOUSING	TERMINAL
SILVER	ALUMINUM	PIN / NIL

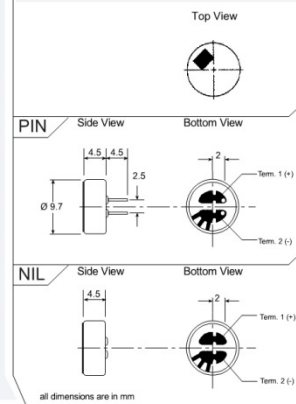
FREQUENCY RESPONSE CURVE



ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Model No.	C9745B8A03	C9745B8A23	C9745B8A43	C9745D0A03	C9745D0A23	C9745D0A43	C9745D0A63
Sensitivity (dB)	-40 +/- 3	-42 +/- 3	-44 +/- 3	-40 +/- 3	-42 +/- 3	-44 +/- 3	-46 +/- 3
Directivity	OMNI	OMNI	OMNI	OMNI	OMNI	OMNI	OMNI
Power Supply Vs (V)	1.5	1.5	1.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Resistance Loading RL (Ω)	3K	3K	3K	2.2K	2.2K	2.2K	2.2K
Max Current (mA)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Frequency Range (Hz)	50 - 16000	50 - 16000	50 - 16000	50 - 16000	50 - 16000	50 - 16000	50 - 16000
Max. Operation Voltage (V)	10	10	10	10	10	10	10
Sensitivity Reduction Within 1 V (dB)	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
Sensitivity Reduction Within 2V (dB)	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3
S/N Ratio (dB)	> 60	> 60	> 60	> 60	> 60	> 60	> 60

DIMENSION

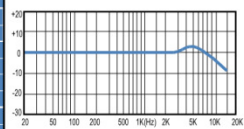


C9752



COLOUR	HOUSING	TERMINAL
SILVER	ALUMINUM	NIL

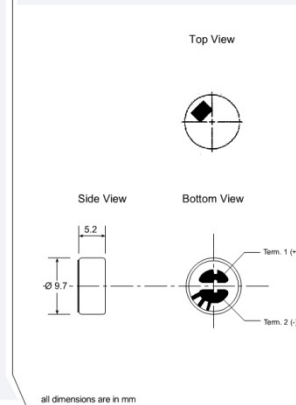
FREQUENCY RESPONSE CURVE



ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Model No.	C9752DD422
Sensitivity (dB)	-42 +/- 2
Directivity	OMNI
Power Supply Vs (V)	2.5
Resistance Loading RL (Ω)	2.2K
Max Current (mA)	0.5
Frequency Range (Hz)	50 - 16000
Max. Operation Voltage (V)	10
Sensitivity Reduction within 3 V (dB)	-3
S/N Ratio (dB)	> 60

DIMENSION



The information contained herein is believed to be correct, but no guarantee or warranty, express or implied with respect to accuracy, completeness or results is extended and no liability is assumed. Laube Technology reserves the right to make changes in any specification, data or material contained herein.

Bibliografía

- [1] F. Fahy, *Foundations of Engineering Acoustics*, 1st ed. U.K: ElSevier, 2001.
- [2] R.A. Serway and J.W. Jewett, *Física para ciencias e ingeniería. Volumen 1*, 7th ed. México: Cengage Learning, 2008.
- [3] J.G. Roededer, *Acústica y Psicoacústica de la Música*, 1st ed. Argentina: Ricordi Americana S.A.E.C., 1997.
- [4] Jesús Ramón Escadajillo, *Oídos, nariz, garganta y cirugía de cabeza y cuello*, 3rd ed. México: Manual Moderno, 2009.
- [5] P. Scherz, *Practical Electronics for Inventors*, 1st ed. N.Y.: McGraw Hill, 2000.
- [6] Shure Incorporated. (2012, Junio) [Online]. <http://www.shure.com/>
- [7] Hosiden Corporation. (2012, Junio) [Online]. <http://www.es.co.th/schemetic/pdf/KUC.pdf>
- [8] L.A. Zadeh, "From circuit theory to system theory," *In Proc. IRE* 50, pp. 856-865, 1962.
- [9] L. Beristain and J.J. Esqueda, *Identificación de sistemas*, 1st ed. México: Universidad Autónoma de Baja California, 2007.
- [10] J.J. Esqueda, "Identificación de sistemas lineales e invariantes," Tesis de Maestría, Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, IPN, Tijuana, México, 2001.
- [11] The Mathworks Inc. (2012, Junio) [Online]. <http://www.mathworks.com>
- [12] A. Papoulis and S. Unnikrishna, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 2nd ed. N.Y.: Mc Graw Hill, 1991.
- [13] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd ed. NJ: Prentice Hall, 1999.
- [14] B. Gold and C.M. Rader, *Digital Processing of Signals*, 1st ed. N.Y.: Mc Graw Hill, 1969.
- [15] J. Garcia, *Procesamiento Digital de Señales (en revisión CIC-IPN)*, 1st ed. México: CIC-IPN , 1999.
- [16] P. Stoica and R. Moses, *Spectral Analysis of Signals*, 1st ed. N.J.: Prentice Hall, 2005.
- [17] National Instruments Corporation. (2011) , NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVISTM II Series) User Manual. [Online]. <http://www.ni.com/pdf/manuals/374629c.pdf>
- [18] Spectrum Digital INC. (2003) , TMS320C6713 DSK Technical Reference. [Online]. http://c6000.spectrumdigital.com/dsk6713/revc/files/6713_dsk_techref.pdf.