



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN SALÓN, USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

Angel Giovanni Ramirez Garcia

Asesorado por el Ing. Electrónico Guillermo Antonio Puente Romero

Guatemala, octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN SALÓN, USANDO
PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ANGEL GIOVANNI RAMIREZ GARCIA

ASESORADO POR EL ING. ELECTRÓNICO GUILLERMO ANTONIO PUENTE
ROMERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Bayron Odilio Arrivillaga Méndez
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
EXAMINADOR	Ing. Edwin Efraín Segura Castellanos
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN SALÓN, USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica, el 07 de septiembre de 2009.

Angel Giovanni Ramirez Garcia

Guatemala, 15 de octubre de 2009

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero Solares:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado:
“CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN SALÓN USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES”, desarrollado por el estudiante **Angel Giovanni Ramirez Garcia**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,



Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
ASESOR



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 21 de octubre de 2009

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **“CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN SALÓN USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES”**, desarrollado por el estudiante **Angel Giovanni Ramirez Garcia**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

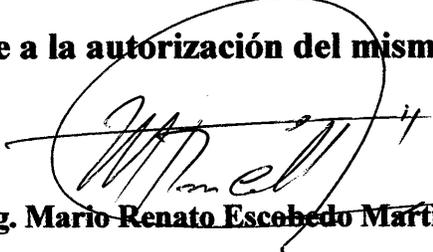
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 67. 2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Angel Giovanni Ramirez Garcia titulado: “CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN SALÓN USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES”, procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

GUATEMALA, 23 DE OCTUBRE 2,009.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN SALÓN, USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES**, presentado por el estudiante universitario **Angel Giovanni Ramírez García**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, octubre de 2009

/gdech

Ningún ave se eleva demasiado alto, si vuela con sus propias alas.

William Blake

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
RESUMEN	VII
OBJETIVOS	IX
INTRODUCCIÓN	XI
1. ACÚSTICA	1
1.1. Sonido	1
1.2. Ecuación de la onda acústica	2
1.3. Velocidad del sonido	3
1.4. Energía de la vibración	4
1.5. Combinación de osciladores simples	4
1.6. Radiación de ondas acústicas	5
1.7. Reflexión y transmisión	6
1.8. La voz humana	8
1.9. Tiempo de reverberación y eco	9
1.10. Unidades de medida y valores de referencia para una medición acústica	11
2. PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES DSP	13
2.1. Desarrollo del DSP	13
2.2. Áreas de aplicación	13
2.3. Señales discretas en el tiempo	14
2.4. Sistemas discretos lineales e invariantes en el tiempo	16
2.5. Transformada discreta de Fourier	18

2.6.	Transformada z	19
2.7.	Reverberación como filtro lineal	24
2.8.	Filtros Comb	25
2.9.	Ruido blanco y ruido rosado	27
3.	CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN SALÓN	29
3.1.	Modificación del tiempo de reverberación	33
3.2.	Modificación de la relación de señal a ruido	33
4.	METODOLOGÍA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS	35
4.1.	Mediciones del tiempo de reverberación	35
4.2.	Medición del nivel de ruido	37
5.	IMPLEMENTACIÓN	41
5.1.	Descripción y delimitación	41
5.2.	Señales de entrada y salida	42
5.3.	Función de transferencia	45
5.4.	Estimación del tiempo de reverberación	46
5.5.	Estimación del criterio de ruido	48
5.6.	Implementación de un prototipo	49
	CONCLUSIONES	53
	RECOMENDACIONES	55
	BIBLIOGRAFÍA	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Densidad espectral de la voz	9
2.	Señales comunes discretas en el tiempo	15
3.	Plano z	21
4.	Filtro Comb	26
5.	Curvas de Criterio de Ruido	32
6.	Ubicación de las mediciones	38
7.	Procedimiento del cálculo de T_R	47
8.	Procedimiento de cálculo de NC	49

TABLAS

I.	Variación de la inteligibilidad	30
II.	Coefficientes de absorción	31

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción
m	Masa
k	Constante de elasticidad
\vec{F}	Fuerza
\vec{r}	Desplazamiento
x	Posición
t	Tiempo
ω	Frecuencia angular
ω_0	Frecuencia angular natural
A_1, A_2	Constantes
f	Frecuencia
f_0	Frecuencia natural
T	Período
λ	Longitud de onda
c	Velocidad termodinámica del sonido en un fluido
x_0	Posición inicial
v_0	Velocidad inicial
A_0	Amplitud de movimiento
ϕ	Ángulo de fase inicial
\vec{k}	Vector de propagación
E	Energía
E_p	Energía Potencial
E_K	Energía Cinética
\vec{p}	Presión acústica

La lista continúa en la siguiente página

Continúa de la página anterior

Símbolo	Descripción
P	Amplitud de Presión acústica
a	Radio
ρ_0	Densidad de equilibrio
I	Intensidad de una onda
P_i	Amplitud de Presión acústica incidente
P_r	Amplitud de Presión acústica reflejada
P_t	Amplitud de Presión acústica transmitida
T_P, T_I, T_{II}	Índices de transmisión
R_P, R_I, R_{II}	Índices de reflexión
A_i	Área transversal del flujo de onda incidente
A_t	Área transversal del flujo de onda transmitida
z	Impedancia acústica
T_R	Tiempo de Reverberación
V	Volumen
A	Área de Absorción
α	Coefficiente de absorción de Sabine
$x(t)$	Señal continua en dominio del tiempo
$X(f)$	Representación en dominio de frecuencia de $x(t)$
$x[n]$	Señal discreta en dominio del tiempo
$X[m]$	Representación en dominio de frecuencia de $x(n)$

RESUMEN

Este trabajo está elaborado con el objetivo de generar criterios para la planificación de mejoras acústicas y acondicionamiento en salones de clase de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos. Es por ello que se exponen muchos de factores y parámetros considerados como adecuados para un salón de clase ocupado por estudiantes adultos. Estos métodos se pueden aplicar, haciendo modificaciones de esos factores, sin ninguna otra restricción en cualquier salón de clase.

La acústica es una rama de la física que estudia la propagación y generación de ondas sonoras aplicando grandes herramientas matemáticas y modelos físicos para su descripción y análisis; en la ingeniería tiene mucha aplicación en las áreas del estudio de materiales y arquitectura, las de mediciones para aplicaciones de ingeniería en áreas del estudio de la contaminación acústica, elaboración de mapas de ruido, modelos de ruido urbano y muchas otras más. Por la amplitud de conocimientos que se abarcan dentro de la acústica, en el primer capítulo se hace una breve introducción.

En el segundo capítulo hace la descripción de una herramienta matemática, el procesamiento digital de señales, su aplicación que ha dado grandes saltos al lado del desarrollo de la electrónica y la computación; y de las señales como datos de este tipo de análisis. Se describen especialmente las aplicaciones de muy amplio uso y en las cuales se basa el modelo que se propone en este trabajo: la Transformada Discreta de Fourier, la Transformada Z y los filtros digitales IIR. También se dan los argumentos para considerar el efecto de la reverberación como un filtro lineal.

En el tercer capítulo se describen el tiempo de reverberación y la relación de señal a ruido (y el criterio de ruido) como parámetros para hacer una estimación de la inteligibilidad del habla. También se definen los valores adecuados que deben tener estos parámetros medidos en el salón que se quiere caracterizar y la forma de modificar características en el salón a fin de llevar estos parámetros a los niveles propuestos como adecuados.

El cuarto capítulo define una metodología a seguir para hacer las mediciones del tiempo de reverberación y el nivel de ruido en un salón. Se describen las consideraciones que se deben tomar para las frecuencias, la separación y la cantidad de las mediciones que deben hacerse y cómo presentar los resultados.

En el último capítulo se muestra una descripción y delimitación del estudio fenómeno de reverberación, el sistema que se analiza y el método de estimación espectral de potencia que se usa. Se hace una descripción de las señales de entrada y salida, la función de transferencia que se asocia al salón y la función de transferencia de los filtros que con los que se hace la estimación de la reverberación y el criterio de ruido y una propuesta basada en aplicaciones de software libre para la modelación e implementación.

Finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones obtenidas tras la elaboración de este trabajo.

OBJETIVOS

- **General**

Proponer una técnica para la elaboración de curvas de caracterización acústica de los salones de clase que pueden usarse como un criterio más en la planificación de modificaciones en salones de clase para la mejora del proceso de enseñanza aprendizaje.

- **Específicos:**

1. Identificar las magnitudes físicas que deben ser medidas para la elaboración de curvas de caracterización acústica de un salón.
2. Diseñar un método para la medición de datos para la caracterización acústica de salones.
3. Proponer una alternativa en el manejo de la información, usando procesamiento digital de señales para la correcta interpretación del ambiente acústico del salón.
4. Evaluar el procedimiento de diseño e implementación de DSP con software libre, como alternativa del software propietario.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de enseñanza-aprendizaje aplicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos y en la mayoría de centros educativos de Guatemala se utiliza el sistema de clase magistral como elemento para el intercambio de información entre el profesor y el grupo de alumnos en un sencillo esquema de transmisión y recepción de información en el salón de clase.

La cantidad de información que llega del transmisor al receptor depende de las características del código que se emplea y del medio que se utiliza. El salón como parte del medio presenta problemas acústicos de ruido y reverberación que pueden ser cuantificados y, de ser necesario, reducidos a los estándares establecidos para los salones de clase con el fin de reducir su influencia negativa en el proceso de comunicación.

Las fuentes de ruido pueden ser externas e internas. Las fuentes externas se deben a motores de automóviles en el parqueo que circula el edificio, altavoces y bocinas, campos de juego, etc. y pueden controlarse con el adecuado aislamiento acústico del edificio o con la creación de normas que regulen la cantidad de ruido que las actividades al aire libre pueden generar en horario de clases.

Las fuentes internas de ruido son más complejas, tanto de identificar como de limitar, ya que están ligadas a la arquitectura del salón, al tipo de materiales que fueron usados en la construcción, etc. Entre las fuentes de ruido interno se deben tomar en cuenta: el tiempo de reverberación (eco discreto y eco repetitivo) y la relación de señal a ruido (ruido del mismo salón y proveniente de salones adyacentes).

En este trabajo se presenta una introducción a la acústica, las características de la voz y del habla, y de los efectos acústicos que limitan la calidad del salón y una propuesta para medirlos mediante técnicas de procesamiento digital de señales, DSP siglas en inglés de *Digital Signal Processing*, que son herramientas matemáticas, algoritmos y las técnicas usadas para manipular señales después de que han sido convertidas a una forma digital.

La realización de este trabajo contribuye en la generación de criterios para la optimización del uso de recursos empleados en las adecuaciones acústicas para la mejora de los salones de clase haciendo uso de tecnología electrónica de mucha aplicación. También se presenta una propuesta para facilitar el trabajo y desarrollo de aplicaciones de Procesamiento Digital de Señales haciendo uso de herramientas de software libre como una alternativa eficiente y económica.

1. ACÚSTICA

La Acústica se refiere a la generación y evolución espacio-temporal de perturbaciones mecánicas en un fluido (ondas sonoras) o en un sólido (ondas elásticas) [29]. Los fluidos tienen menos resistencia a la deformación que los sólidos. Las fuerzas de restablecimiento responsables de la propagación de la onda se deben a cambios de presión que ocurren cuando los fluidos se comprimen o expanden [19].

La acústica estudia los distintos fenómenos relacionados a las ondas: propagación en medios homogéneos, dispersión en medios no homogéneos y procesos de disipación que producen absorción y dispersión de las ondas.

1.1. Sonido

El sonido es un movimiento ondulatorio, que puede ser caracterizado con frecuencia y amplitud, del aire o de otro medio elástico que cuando está en el adecuado rango de frecuencias produce una excitación en el oído.

A diferencia de las ondas electromagnéticas, las ondas sonoras necesitan un medio de propagación para las variaciones de presión. En el aire, el valor promedio de la presión es la presión atmosférica y aunque ésta cambia de un lugar a otro y a lo largo del tiempo, el promedio de los cambios atmosféricos de presión es tan pequeño que puede considerarse constante comparado con la rapidez de las variaciones de presión de la onda sonora [15].

1.2. Ecuación de la onda acústica

Un gran número de vibradores usados en acústica pueden ser modelados como osciladores simples [19]. La descripción del comportamiento de un oscilador simple parte de la descripción del movimiento oscilatorio de una masa m en kilogramos (kg) sujeta a un resorte con una constante elástica k en Newton por metro (N/m) cuya fuerza de restablecimiento es, según la ley de Hooke

$$\vec{F} = -k\vec{r} \quad (1)$$

en donde \vec{r} es el desplazamiento en metros (m) desde el punto de reposo.

Sustituyendo la ecuación general de fuerza

$$\vec{F} = m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad (2)$$

en la Ecuación (1) y si el movimiento se da en una sola dirección, $\vec{r} = x\hat{i}$ se obtiene

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (3)$$

en donde se puede sustituir la fracción del segundo término por una constante de mucho interés en el estudio de ondas, la frecuencia angular natural ω_0 en radianes por segundo (rad/s) de la siguiente forma:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad (4)$$

para reescribir la Ecuación (3) de la siguiente forma:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2x = 0 \quad (5)$$

una ecuación diferencial lineal cuya solución general es:

$$x = A_1 \cos(\omega_0 t) + A_2 \sin(\omega_0 t) \quad (6)$$

en donde A_1 y A_2 son constantes que dependen de las condiciones iniciales del sistema.

La frecuencia angular está relacionada a la frecuencia natural del sistema f_0 según la relación

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (7)$$

y tiene relación con el periodo de oscilación T

$$T = \frac{1}{f_0} \quad (8)$$

La frecuencia es el número de veces que la masa pasa por un punto de observación con la misma dirección durante una unidad de tiempo dada, por otro lado el periodo es el tiempo que le toma completar un ciclo completo. La frecuencia también se relaciona con la longitud de onda

$$\lambda f = c \quad (9)$$

en donde c es la velocidad termodinámica del sonido en el fluido donde se propaga.

1.3. Velocidad del sonido

Dadas las condiciones iniciales del sistema para el tiempo $t = 0$: posición inicial x_0 y velocidad inicial v_0 , la Ecuación (6) puede, por sustitución escribirse como:

$$x = x_0 \cos(\omega_0 t) + \left(\frac{v_0}{\omega_0}\right) \sin(\omega_0 t) \quad (10)$$

Utilizando dos nuevas constantes A_0 : la amplitud de movimiento y ϕ : el ángulo inicial de fase; y relacionadas con las condiciones iniciales según

$$A_0 = \left[x_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega_0}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (11a)$$

$$\tan \phi = \frac{-v_0}{\omega_0 x_0} \quad (11b)$$

entonces la Ecuación (10) se puede reescribir como:

$$x = A_0 \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (12)$$

de donde se pueden derivar las expresiones:

$$v = -\omega_0 A_0 \sin(\omega_0 t + \phi) \quad (13)$$

$$a = -\omega_0^2 A_0 \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (14)$$

para la velocidad y la aceleración respectivamente.

1.4. Energía de la vibración

La energía mecánica E de un sistema es la suma de la energía potencial E_p y la energía cinética E_k [19]. Con la Ecuación (12) se puede expresar para la energía potencial como:

$$E_p = \int_0^x kx dx = \frac{1}{2} k A_0^2 \cos^2(\omega_0 t + \phi) \quad (15)$$

y con la Ecuación (13) se obtiene una expresión para la energía cinética

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \omega_0^2 A_0^2 \sin^2(\omega_0 t + \phi) \quad (16)$$

entonces la energía mecánica del sistema es:

$$E = \frac{1}{2} m \omega_0^2 A_0^2 \quad (17)$$

que confirma que la energía total de un sistema sin fuerzas externas y sin pérdidas es constante en el tiempo.

1.5. Combinación de osciladores simples

La mayoría de los efectos estudiados en acústica se pueden representar como la combinación del efecto de varios osciladores individuales. En general, ya que la presencia de un oscilador no altera el medio, al punto de modificar las características de otro oscilador, la vibración total se obtiene como la superposición lineal de los osciladores [19].

En el caso de dos osciladores con frecuencias angulares ω_1 y ω_2 y con desplazamientos

$$\vec{r}_1 = A_1 e^{j\omega_1 t + \phi_1} \quad (18a)$$

$$\vec{r}_2 = A_2 e^{j\omega_2 t + \phi_2} \quad (18b)$$

la combinación lineal de estos da un nuevo desplazamiento $\vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2$

$$\vec{r} = A_1 e^{j\omega_1 t + \phi_1} + A_2 e^{j\omega_2 t + \phi_2} \quad (19)$$

El movimiento resultante no es el de un oscilador armónico simple, pero, si la razón de la frecuencia mayor a la menor es un número racional, el movimiento es periódico y con una frecuencia angular dada por el máximo común divisor de ω_1 y ω_2 [19].

Si la frecuencia de los osciladores es la misma, $\omega = \omega_1 = \omega_2$ se produce una nueva oscilación armónica de la misma frecuencia pero con distintos valores de amplitud y fase. El movimiento real y unidimensional es

$$x = A_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (20)$$

en donde las constantes tienen estas relaciones:

$$A_0^2 = (A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2)^2 + (A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2)^2 \quad (21a)$$

$$\tan \phi = \frac{A_1 \sin \phi_1 + A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_1 + A_2 \cos \phi_2} \quad (21b)$$

1.6. Radiación de ondas acústicas

La fuente acústica más sencilla de analizar es una esfera cuyo radio varía senoidalmente en el tiempo y, aunque éste análisis sea poco práctico, sirve como prototipo para el estudio de fuentes simples [19].

En un medio infinito, homogéneo e isótropo, se producirá una onda esférica de forma que la presión acústica en el fluido en contacto con la esfera será:

$$\vec{p}(\vec{r}, t) = \left(\frac{A_0}{r} \right) e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (22)$$

A_0 es una constante cuyo valor depende del origen del sistema y se escoge uno de forma que sea un valor real. El valor A_0/r es la amplitud de presión P de la onda y disminuye inversamente proporcional con el aumento de la distancia.

Considerando una esfera de radio a vibrando radialmente con una velocidad compleja $v e^{j\omega t}$, la presión en la superficie de la fuente es:

$$\vec{p}(a, t) = \rho_0 c v_0 \cos \theta_a e^{j(\omega t - ka + \theta_a)} \quad (23)$$

en donde c es la velocidad termodinámica del sonido en el fluido, ρ_0 es la densidad del fluido (1.21 kg/m³ en el aire a 20 °C y a nivel del mar [19]) y k es la magnitud del vector de propagación $\vec{k} = k_{\hat{x}} + k_{\hat{y}} + k_{\hat{z}}$ tal que $k = |\vec{k}| = (\omega/c)$ y $\cot \theta_a = ka$, para cualquier distancia $r > a$

$$\vec{p}(r, t) = \frac{\rho_0 c v_0 a}{r} \cos \theta_a e^{j(ka + \theta_a)} \quad (24)$$

La intensidad instantánea de una onda de sonido es la tasa instantánea por unidad de área a la cual un elemento del fluido realiza un trabajo sobre un elemento adyacente [19]. Se mide en Watts por metro cuadrado (W/m²) y se calcula mediante $I(t) = pv$. La intensidad I es el promedio en el tiempo de $I(t)$ y es el promedio en el tiempo de la tasa de transmisión de energía a través de una unidad de área normal a la dirección de propagación

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p v dt = \frac{P}{2\rho_0 v} \quad (25)$$

1.7. Reflexión y transmisión

Cuando una onda, la onda *incidente*, viaja en un medio y se encuentra con la superficie o interfaz del medio se da un fenómeno de reflexión y transmisión, que produce una onda *reflejada* que regresa y una onda *transmitida* que pasa la interfaz.

La razón de la amplitud de presión e intensidades de las ondas reflejadas y transmitidas a la onda incidente dependen de las características acústicas y velocidades del sonido en los dos medios y del ángulo de incidencia de la onda incidente en la interfaz [19].

Si P_i , P_r y P_t son las amplitudes de presión de las ondas incidente, reflejada y transmitida respectivamente, entonces los índices de transmisión T y reflexión R se definen como la fracción de la amplitud de presión de la onda que se transmite y se refleja

$$T = \frac{P_t}{P_i} \quad (26a)$$

$$R = \frac{P_r}{P_i} \quad (26b)$$

y siguiendo con los subíndices de incidencia, reflexión y transmisión, se pueden definir los índices de transmisión y reflexión de intensidad [19]:

$$T_I = \frac{I_t}{I_i} = \frac{r_1}{r_2} |T|^2 \quad (27a)$$

$$R_I = \frac{I_r}{I_i} = |R|^2 \quad (27b)$$

y los índices de transmisión y reflexión de potencia

$$T_{II} = \left(\frac{A_t}{A_i} \right) \left(\frac{z_1}{z_2} \right) |T|^2 \quad (28a)$$

$$R_{II} = |R|^2 \quad (28b)$$

donde A_i y A_t son las áreas transversales de las ondas incidente y transmitida respectivamente y son iguales considerando todas las circunstancias [19], las constantes z_1 y z_2 son las impedancias acústicas características de cada medio y dependen únicamente de parámetros del medio

$$z_1 = \rho_1 v_1 \quad (29a)$$

$$z_2 = \rho_2 v_2 \quad (29b)$$

y por conservación de energía: la energía de la onda incidente se distribuye entre las ondas reflejada y transmitida [19] entonces

$$T_{II} + R_{II} = 1 \quad (30)$$

1.8. La voz humana

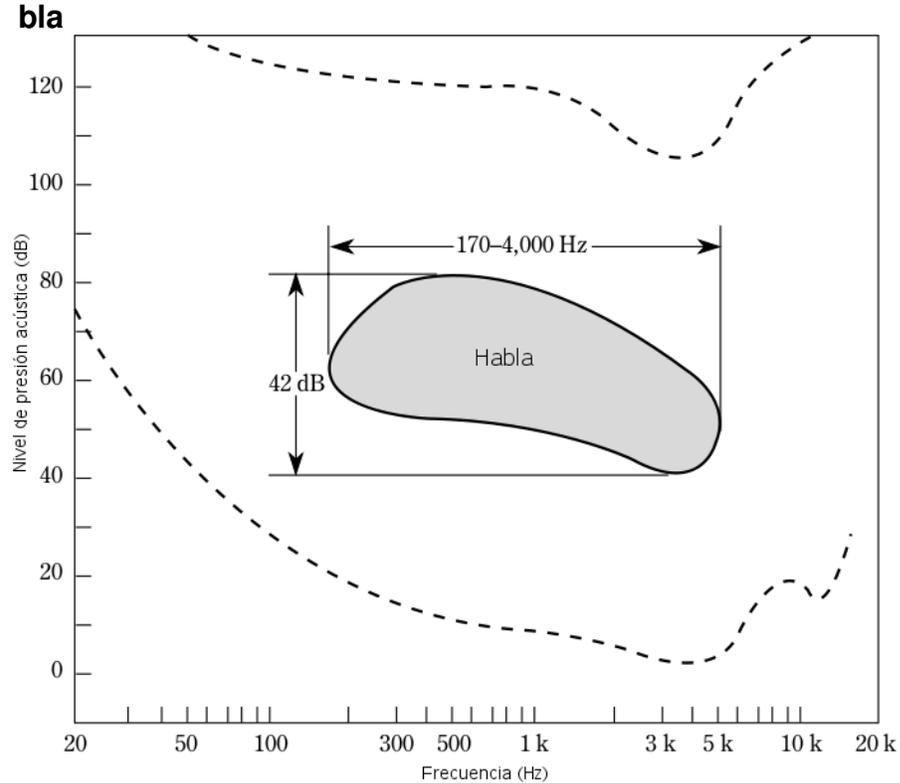
Las características físicas del habla, música y ruido pueden medirse con ayuda de instrumentos acústicos adecuados a fin de poder expresar los resultados cuantitativamente en términos de parámetros físicos, pero las características interpretativas de escuchar son subjetivas y sólo pueden hacerse estimaciones estadísticas para los oyentes promedio en condiciones conocidas [19].

La voz está formada por sonidos tonales o sonoros, como las vocales, que se producen por la vibración de las cuerdas vocales y por sonidos nasales. También forman la voz sonidos sordos, como algunas consonantes, que se producen por turbulencias en el aire en el tracto vocal [19].

Las cavidades resonantes del tracto vocal están formadas por la nariz, boca y conductos de aire a lo largo de la laringe y constituyen una red de filtrado acústico. Hay tres o cuatro frecuencias de resonancia que se imponen como filtros pasa-banda y los 3 más bajos están centrados en frecuencias o formantes cercanas a los 500 Hz, 1.6 kHz y 3 kHz para una mujer, un 20 % arriba para un niño y un 20 % abajo para un hombre. Los dos formantes inferiores suelen ser fácilmente variables [19].

Un análisis del voz, da como resultado que el promedio de la potencia es un valor cercano a los 10 μ W [9]. En un análisis espectral como el mostrado en la Figura 1 se observa que la distribución de la potencia deja un 80 % debajo de los 500 Hz y se tiene un ancho de banda de 3.83 kHz. La pequeña cantidad de potencia en altas frecuencias determina la inteligibilidad del habla y es importante porque aquí se encuentran algunas consonantes [9].

Figura 1: **Densidad espectral de potencia para la voz humana durante el habla**



Fuente: Everest, F. Alton. *The Master Handbook of Acoustics*. Ver [9].

1.9. Tiempo de reverberación y eco

Colocando una fuente de sonido en una sala y, permitiendo que ésta llegue a un estado estable y luego apagándola para generar un estado transitorio, el tiempo de reverberación es el tiempo en el que aún se escuche el sonido de la fuente.

Para establecer un patrón, el tiempo de reverberación se define como el tiempo que se requiere para que el nivel de sonido decrezca 60 dB [19].

Sabine experimentalmente mostró que cuando el nivel de sonido decrece en una sala, puede aproximarse mediante una función lineal del tiempo [29]. La re-

lación de Sabine es:

$$T_R \propto \frac{V}{A} \quad (31)$$

en donde T_R es el tiempo de reverberación en una sala de volumen V y área de absorción A . Esta es una relación basada en un modelo de rayos divergentes, es decir cada vez que se alcanza una superficie de absorción, los rayos son parcialmente absorbidos y reflejados [19].

Sabine también encontró empíricamente las constantes de relación para la Ecuación (31) en el siglo XIX [19], la ecuación es:

$$T_R = \frac{0.161V}{S\alpha} \quad (32)$$

en donde el volumen está expresado en metros cúbicos, la superficie total de la sala S en metros, al valor 0.161 se denomina constante hiperbólica [34] y α es el coeficiente de absorción de Sabine. Sabine también asumió que si habían distintos materiales, se podía tomar el total de la suma de las absorciones por cada material, es decir

$$S\alpha = \sum_i S_i\alpha_i \quad (33)$$

en donde S_i y α_i son, respectivamente, la superficie y el coeficiente de absorción de cada una de las superficies.

El eco ocurre cuando una onda aislada, que después de ser reflejada, alcanza el oído en un tiempo mayor a 67 ms [2] después del sonido original. El eco se percibe como un sonido discreto [9].

El excesivo tiempo de reverberación afecta la inteligibilidad por el enmascaramiento u obstrucción de las consonantes de bajo nivel en algunas palabras [9] debido a las continuas reflexiones de la señal original en las superficies de la sala.

El efecto de reverberación no es del todo malo, algunos tipos de música resultan beneficiados con distintos tiempos de reverberación, sin embargo no hay un estándar establecido, ya que influyen otros factores del salón y otros efectos

asociados a los ritmos y tipos de sonidos musicales que se fijan por aspectos subjetivos de los especialistas [9].

1.10. Unidades de medida y valores de referencia para una medición acústica

El sonido es una onda mecánica y el oído humano percibe la intensidad I definida en la Ecuación (25). Las unidades de medición de la intensidad son (W/m^2), pero los sonidos que percibe el oído humano están en un rango tan amplio que por ello se utiliza una escala logarítmica cuya unidad de medición se denomina decibelio (dB).

En muchos casos el parámetro del sonido que se mide es la presión del sonido, sobre todo porque es más sencillo de construir y calibrar que equipos de medición de velocidad o de intensidad [2]. El voltaje de salida de un micrófono de electret (que son usados en la mayoría de micrófonos que se puede comprar en tiendas de computadoras) es proporcional a la presión instantánea [21] y el nivel de presión del sonido se calcula con

$$SPL = 20 \log \left[\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right] \quad (34)$$

en donde p_{rms} es el valor cuadrático medio o valor eficaz y p_{ref} es la presión de referencia en el medio de propagación. Aunque la cantidad medida sea el voltaje del micrófono, la proporcionalidad que existe con el nivel de presión del sonido implica que una caída de 60 dB en el voltaje del micrófono corresponde a una caída de 60 dB en el nivel de presión del sonido [21].

Los dos medios principales de propagación son aire (aeroacústica) y agua (acústica subacuática) ya que pueden considerarse como referentes para los dos estados de fluidos: líquido y gaseoso [29].

En la aeroacústica, el nivel de presión de referencia es $2 * 10^{-5} \text{ N}/\text{m}^2$ cercano al umbral del oído humano y el nivel de intensidad de referencia es $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$

en condiciones de presión y temperatura estándar, 10^5 N/m^2 y $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (293 K) respectivamente. En la acústica subacuática, el nivel de presión de referencia es 1 N/m^2 y el nivel de intensidad de referencia es $6.51 * 10^{-7} \text{ W/m}^2$ [29].

En el aire a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y a una atmósfera de 101.325 kPa el sonido se propaga a 343 m/s [19].

2. PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES DSP

El procesamiento digital de señales es una poderosa herramienta tanto en la ciencia como en la ingeniería. Han habido grandes cambios en muchas áreas como: comunicaciones, imágenes médicas, radar y sonar entre otras relacionadas con el procesamiento digital de señales.

DSP es la matemática, los algoritmos y las técnicas usadas para manipular señales después de que han sido convertidas en una forma digital [33]. En el ámbito de la computación se diferencia de otras áreas por los datos con los que se trabaja: señales.

2.1. Desarrollo del DSP

Las técnicas de DSP se remontan a los años 60 y 70 con el desarrollo de las computadoras digitales, sin embargo, por el alto precio de éstas, el desarrollo de DSP se limitó a ciertas aplicaciones como la exploración petrolera, exploración espacial y el estudio de imágenes médicas [33].

Con la revolución de la computación personal en los años 80 y 90, las técnicas de DSP se usaron en nuevas aplicaciones [33], de forma que ahora, además de las áreas mencionadas hay mucho desarrollo en las áreas científica, telefónica, comercial, militar, etc.

2.2. Áreas de aplicación

El procesamiento digital de señales tiene varias áreas de aplicación, cada una de ellas va desarrollando sus propias técnicas y aplicaciones, entre estas áreas

las de mayor avance son las telecomunicaciones, el procesamiento de audio, localización por eco, procesamiento de imágenes [33].

En el área de las telecomunicaciones, hay aplicaciones DSP para la multiplexación, que toman los flujos de información y los disponen en un solo flujo serial capaz de ser enviado por un solo medio de transmisión.

Otras aplicaciones se usan en la compresión de datos que son usados para convertir señales de voz digitalizadas en flujos que requieren una menor cantidad de ancho de banda y el control de eco, un problema común en llamadas de larga distancia, generando señales que cancelan el eco y reducen el ruido ambiental.

En el procesamiento de audio, hay aplicaciones DSP para evitar la degradación asociada con las distancias y la manipulación analógica, filtrado, suma, separación y edición de señales. También hay aplicaciones para la generación y reconocimiento de voz.

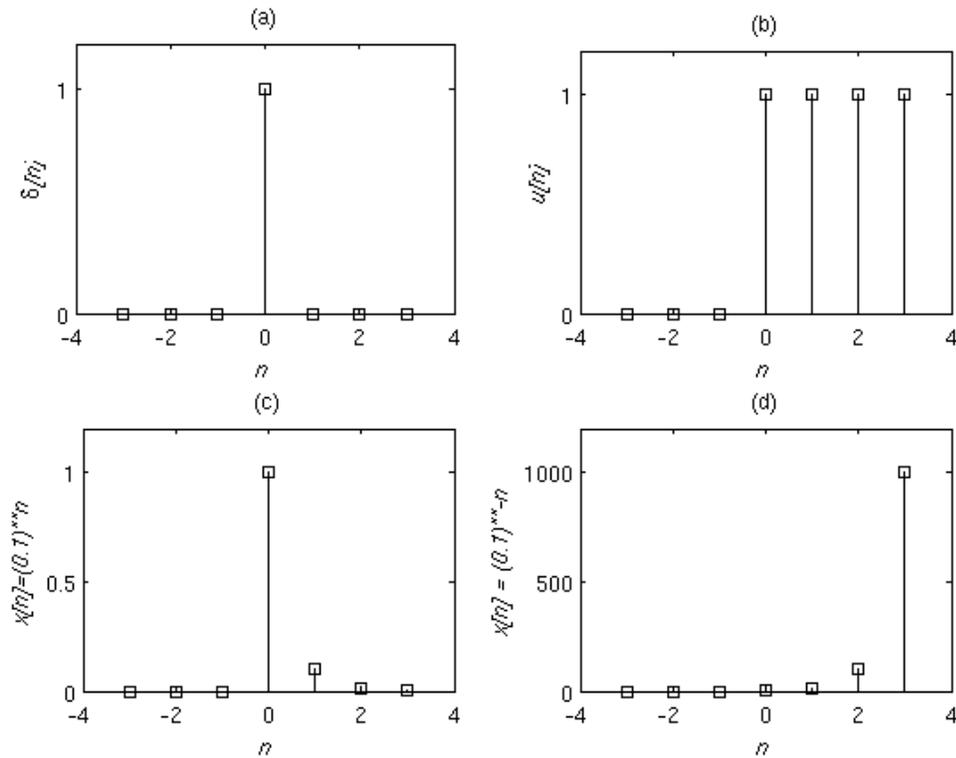
También se aplica en los sistemas de radar ya que estos envían pulsos de radio frecuencia por una antena direccional y recogen los rebotes, se usan técnicas de DSP para comprimir los pulsos recibidos para obtener una mejor resolución en el cálculo de las distancias sin reducir el rango de operación, también es posible filtrar los pulsos para reducir la cantidad de ruido, generar y seleccionar distintas formas de pulso permitiendo una optimización para detecciones particulares.

2.3. Señales discretas en el tiempo

Una señal discreta en el tiempo es una función que depende de una variable independiente que solamente toma valores enteros, no está definida entre dos muestras sucesivas y es incorrecto pensar que la función es cero para valores no enteros de la variable independiente [30].

Una señal discreta en el tiempo toma un valor, que puede ser real o complejo, para cada valor entero de n y si se obtiene del muestreo de una señal analógica

Figura 2: **Señales comunes discretas en el tiempo: (a) Impulso unitario. (b) Escalón unitario. (c) y (d) Exponencial**



$x_a(t)$ entonces $x[n]$, la n -ésima muestra es $x[n] \equiv x_a(nT)$ en donde T es el periodo de muestreo.

Hay un conjunto de señales discretas en el tiempo muy usadas en el tratamiento digital de señales [30]:

Impulso unitario: es una señal que toma la unidad por valor para un único valor de la variable independiente y un valor nulo para el resto, se expresa

$$\delta[n] = \begin{cases} 1 & \text{para } n = 0 \\ 0 & \text{para } n \neq 0 \end{cases} \quad (35)$$

y aunque es semejante a la función Delta de Dirac su definición es, matemáticamente hablando, más sencilla ya que no debe cumplir la propiedad

de que su área sea unitaria en todo el dominio de n [30]. La Figura 2.a muestra un ejemplo de esta señal.

Escalón unitario: es una señal que mantiene un valor nulo hasta que la variable independiente alcanza un valor específico desde el cual la señal toma un valor unitario, se expresa

$$u[n] = \begin{cases} 1 & \text{para } n \geq 0 \\ 0 & \text{para } n < 0 \end{cases} \quad (36)$$

representa la suma acumulada de la señal impulso unitario hasta un valor m [27]

$$u[n] = \sum_{m=-\infty}^n \delta[m] \quad (37)$$

y su primera diferencia es la función impulso unitario $\delta[n] = u[n] - u[n - 1]$ [27]. La Figura 2.b muestra un ejemplo de esta señal.

Exponencial: es una señal de la forma $x[n] = a^n$ en donde a puede ser un valor real o complejo. Cuando es complejo $a = re^{j\theta}$ y $x[n]$ puede separarse en sus componentes real e imaginaria $x[n] = r^n(\cos n\theta + j \sin n\theta)$ y la señal puede representarse como una función de amplitud $|x[n]| \equiv r^n$ y una función de fase $\angle x[n] \equiv n\theta$ [27]. La Figura 2.c muestra un ejemplo de esta señal para $x[n] = (0.1)^n$ y la Figura 2.d para $x[n] = (0.1)^{-n}$

2.4. Sistemas discretos lineales e invariantes en el tiempo

Un sistema discreto en el tiempo es un operador matemático o mapeo que transforma una señal de entrada en otra señal de salida mediante un conjunto definido de reglas o funciones [14]. Las relaciones entre entrada y salida se expresan en términos matemáticos pero también es posible describirlas por medio de un algoritmo que provea una secuencia de operaciones que deben aplicarse a la señal de entrada [14]. La estructura interna del sistema es desconocida o

ignorada y la única forma de interactuar con el sistema es usando sus terminales de entrada y salida [30].

Hay dos propiedades de gran importancia por la simplificación que aportan en el análisis y diseño de sistemas discretos: la linealidad y la invarianza en el tiempo [14].

La propiedad de linealidad define una clase especial de sistemas donde la salida es la superposición o suma de las salidas que cada entrada individual produce en el sistema, a esta propiedad también se le conoce como homogeneidad [20]. Por ejemplo: si el sistema responde con $y_1[n]$ y $y_2[n]$ para entradas individuales $x_1[n]$ y $x_2[n]$ respectivamente, entonces el sistema respondería con $c_1y_1[n] + c_2y_2[n]$ para una entrada $c_1x_1[n] + c_2x_2[n]$ en donde c_1 y c_2 son factores de escala y constantes para todo valor de n .

Un sistema invariante en el tiempo produce una salida desfasada en un tiempo n_0 cuando la entrada es desfasada en el mismo valor n_0 , es decir, si un sistema responde con $y(n)$ para una entrada $x(n)$ responderá con $y(n - n_0)$ si la entrada es $x(n - n_0)$. La invarianza en el tiempo significa que las propiedades del sistema no cambian con el cambio de tiempo [14].

Un sistema discreto lineal e invariante en el tiempo es el que cumple con las dos características descritas. También se les llama operadores lineales invariantes en el tiempo [7].

Adicionalmente a estas, hay dos propiedades más que en el estudio de DSP pueden aportar más información sobre el sistema mismo, estas son la causalidad y estabilidad. En un sistema discreto lineal e invariante en el tiempo y causal, la n_0 -ésima salida $y[n_0]$ solamente puede depender de entradas $x[n]$ para $n \leq n_0$ [26]. Es evidente que en aplicaciones de procesamiento en tiempo real no se pueden observar muestras futuras de valores de la señal, por lo que los sistemas no causales son físicamente irrealizables [30].

Un sistema es estable si y sólo si para cada entrada limitada, la salida es también limitada o convergente a un valor. Este tipo de estabilidad se conoce como estabilidad de entrada limitada-salida limitada BIBO (por las siglas en inglés de *bounded-input, bounded-output*) [26]. Los sistemas no estables usualmente muestran comportamientos erráticos y extremos que causan un sobreflujo o desborde en implementaciones prácticas [30].

2.5. Transformada discreta de Fourier

La transformada discreta de Fourier, junto al filtrado digital, es una de las herramientas más comunes y útiles herramientas usadas en el campo del procesamiento digital de señales [20] cuya aplicación permite analizar, manipular y sintetizar señales.

La transformada discreta de Fourier, o DFT por sus siglas en inglés, es un procedimiento matemático que permite determinar el contenido por frecuencias o contenido espectral de una señal discreta, se basa en la transformada continua de Fourier

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (38)$$

y que representa la transformación de una señal en función del tiempo $x(t)$ a una función el dominio de la frecuencia $X(f)$. Para su uso en DSP, se hace la conversión a

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi mn/N} \quad (39)$$

en donde $X[m]$ es la representación en el dominio de la frecuencia de la señal discreta, en dominio del tiempo $x[n]$, es decir cada una de las muestras de la señal que se quiere representar. Y, haciendo uso de la relación de Euler $e^{-j\phi} = \cos \phi - j \sin \phi$ se puede expresar

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \left[\cos \left(\frac{2\pi nm}{N} \right) - j \sin \left(\frac{2\pi nm}{N} \right) \right] \quad (40)$$

En donde la m -ésima componente en el dominio de la frecuencia $X(m)$ está representada en sus componentes real e imaginaria, el concepto de imaginario se usa para representar la relación entre varias componentes senoidales de una señal [20] y cada componente está situada en la frecuencia

$$f_m = \frac{mf_s}{N} \quad (41)$$

en donde f_s es la frecuencia de muestreo para N muestras y $m = 0$ representa la componente de corriente directa [20]. La frecuencia de muestreo debe cumplir el criterio de Nyquist para evitar problemas de traslape (*overlap*) y coincidencia de frecuencias de muestreo con frecuencias de señal (*aliasing*).

Para el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier, se necesitan aproximadamente N^2 multiplicaciones complejas y $N(N - 1)$ sumas complejas, hay otros métodos que reducen la complejidad computacional a cerca de $N \log_2(N)$ operaciones y se conocen con el nombre de Transformada Rápida de Fourier [26].

2.6. Transformada z

La Transformada de Laplace se usa para simplificar el análisis de las ecuaciones diferenciales continuas, análogamente existe una herramienta para los sistemas discretos en el tiempo: la Transformada z , teniendo claro que la Transformada de Laplace convierte ecuaciones integrodiferenciales en ecuaciones algebraicas y la Transformada z convierte ecuaciones en diferencias o relaciones de recurrencia en ecuaciones algebraicas simplificando el análisis de sistemas discretos en el tiempo [16].

La Transformada z de una secuencia discreta $x[n]$ se denomina $X(z)$ y se define [20]

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]z^{-n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]r^{-n}e^{-j\omega n} \quad (42)$$

en donde $z = re^{j\omega}$ es una variable compleja y representa la combinación de dos variables reales r y ω [33].

La Transformada z se aplica a una secuencia discreta $x[n]$, convirtiéndola en una función continua $X(z)$ [20]. Desde otro punto de vista, la Transformada Discreta de Fourier provee una representación en el dominio de la frecuencia de señales discretas y sistemas lineales e invariantes en el tiempo, sin embargo en muchos casos la transformada no existe y una generalización de esta transformación es la Transformada z , la cual puede existir para muchas de las secuencias para las cuales no existe una Transformada Discreta de Fourier [26].

La Transformada z puede verse como la Transformada de Fourier de la señal modificada por r^{-n}

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]r^{-n}e^{-j\omega n} \quad (43)$$

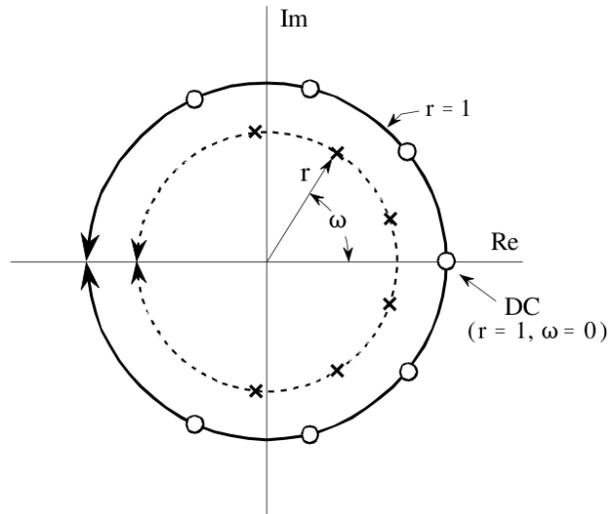
es decir, la Transformada z cuando $|z| = 1$ se reduce a la Transformada discreta de Fourier [26].

Geoméricamente, $H(z)$ es una superficie continua sobre el plano z , el plano z es una proyección bidimensional y está formado por dos ejes ortogonales, en uno de ellos se sitúa la parte real de z identificado como $\text{Re}(z)$ y en el otro la parte imaginaria $\text{Im}(z)$. Si z se expresa en forma polar $z = re^{j\omega}$ el eje para el cual $\omega = 0$ coincide con el eje de la parte real de z . En la Figura 3 muestra el plano z con el círculo unitario y con la convención para la representación polar.

Gráficamente, la ubicación de los polos y los ceros se representan por cruces \times y círculos \circ respectivamente, en el plano z . El análisis gráfico de polos y ceros es comúnmente usado para ver la estabilidad del sistema.

Es importante ver que en una señal discreta sólo pueden haber frecuencias entre cero y un medio de la frecuencia de muestreo [33] por lo que la frecuencia debe estar entre 0 y 0.5 cuando se expresa en términos de la frecuencia de muestreo o entre 0 y π cuando se expresa en la frecuencia natural.

Figura 3: **Plano z : Representación gráfica de la variable compleja sobre la que se define la Transformada z**



Fuente: Smith, Steven W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Ver [33].

Una de las propiedades más importantes de la Transformada z es la relación que existe con el desfase del tiempo en la secuencia de una señal [7]. La curva formada cuando $|z| = 1$, el círculo unitario, además de ser la condición para hacer la reducción de la Transformada z a la Transformada Discreta de Fourier también representa una referencia en la cual un sistema discreto es estable o no según la ubicación de sus polos respecto a esta. Cuando los polos de un sistema discreto están fuera del círculo unitario en el plano z el sistema es inestable [33]. Aunque también se pueden dar condiciones para que la estabilidad de un sistema solamente forme un anillo en el plano z . Se le llama región de convergencia *ROC* de una función $X(z)$ al conjunto de valores z para el cual la serie converge a un valor finito [30].

Entre las propiedades de la Transformada z que son útiles en el análisis de sistemas lineales e invariantes en el tiempo están:

Linealidad: que quiere decir que la Transformada z de una combinación lineal de señales es la misma combinación lineal de sus transformadas [30]. Es decir, si $X_1(z)$ y $X_2(z)$ son las transformadas de $x_1[n]$ y $x_2[n]$ respectivamente la Transformada z de la combinación $a_1x_1[n]+a_2x_2[n]$ es $a_1X_1(z)+a_2X_2(z)$. Lo que implica que se puede analizar una señal expresándola como la suma de señales elementales cuyas Transformadas sean conocidas [30].

Desfase en el tiempo: Explica el cambio en la Transformada z que ocurre cuando hay desfase en el tiempo, o en el número de la muestra para una señal cuya transformada es conocida. Es decir si $X(z)$ es la Transformada z de $x[n]$, un desfase k en la señal de entrada sería $x[n - k]$ su transformada sería $z^{-k}X(z)$ y su *ROC* no es afectada excepto para $z = 0$ si $k > 0$ y $z = \infty$ si $k < 0$ [30].

Un importante grupo de transformadas son las que se pueden expresar como una función racional [30]. Es decir, como la razón de dos polinomios en términos de z^{-1} ó, después de una manipulación algebraica, en términos de z .

Dada una función racional, los ceros de una transformada $X(z)$ son los valores para los cuales $X(z) = 0$ y los polos son los valores para los cuales $X(z) = \infty$ [30]. Matemáticamente esto se puede expresar de la siguiente forma: si $X(z) = N(z)/D(z)$ es una función racional, y si las funciones $N(z)$ y $D(z)$, son Transformadas z definidas por:

$$N(z) = \sum_{k=0}^M b_k z^{-k} \quad (44a)$$

$$D(z) = \sum_{k=0}^M a_k z^{-k} \quad (44b)$$

y si $a_0 \neq 0$ y $b_0 \neq 0$ la función racional puede expresarse

$$X(z) = \frac{b_0}{a_0} z^{N-M} \frac{\prod_{k=1}^M (z - z_k)}{\prod_{k=1}^N (z - p_k)} \quad (45)$$

en donde se puede ver que $X(z)$ tiene M ceros en $z = z_1, z_2, \dots, z_M$ que son las raíces del polinomio del numerador y tiene N polos en $z = p_1, p_2, \dots, p_N$ que son las raíces del polinomio del denominador.

De la Ecuación (45) también se sabe que hay $|N - M|$ ceros (si $N > M$) o polos (si $N < M$) en el origen $z = 0$. Un cero existe en $z = \infty$ si $X(\infty) = 0$ ó, existe un polo en $z = \infty$ si $X(\infty) = \infty$ [30].

La Transformada z puede usarse para analizar un filtro, un filtro es un sistema lineal y recursivo que puede ser descrito por una ecuación en diferencias de esta forma [33]

$$y[n] = a_0x[n] + a_1x[n-1] + \dots + a_nx[0] + \dots + b_1y[n-1] + b_2y[n-2] + \dots + b_{n-1}y[0] \quad (46)$$

en donde $x[n]$ y $y[n]$ son la entrada y salida respectivamente, a_n y b_n son los coeficientes de recursión. De esta relación o ecuación en diferencias es posible obtener las características del sistema [33].

La función de transferencia se obtiene haciendo la Transformada z de la Ecuación (46) y expresándola en la forma de una función racional

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^n a_k z^k}{1 - \sum_{k=1}^m b_k z^{-k}} \quad (47)$$

La función de transferencia de un sistema recursivo puede ser manipulada algebraicamente de forma mucho más sencilla que la manipulación de los coeficientes de recursión, permitiendo la combinación en cascada y etapas en paralelo en sistemas más complejos [33].

Otra forma de expresar la función de transferencia es la que expone claramente los polos y ceros de la función:

$$H(z) = \frac{\prod_{k=1}^n (z - z_k)}{\prod_{k=1}^m (z - p_k)} \quad (48)$$

en donde cada uno de los ceros z_k y los polos p_k son números complejos [33]. Esta representación es mucho más complicada de obtener algebraicamente a

partir de la Ecuación (47) pero en el diseño de filtros digitales se inicia definiendo la ubicación de los polos y ceros y finalmente se calculan los coeficientes de recursión [33].

2.7. Reverberación como filtro lineal

Desde el punto de vista del procesamiento de señales, un salón con fuentes de sonido y fuentes de absorción puede considerarse como un sistema con entradas y salidas que es lineal e invariante en el tiempo [18].

Existen algoritmos de reverberación que simulan los comportamientos de la entrada y salida de la señal en un salón y hay dos formas distintas por las cuales el diseño de un filtro puede aproximarse al efecto de reverberación: la aproximación física y la aproximación perceptual [18].

La aproximación física tiene la ventaja de ofrecer una relación directa entre las especificaciones físicas de la sala y la reverberación resultante [18]. Esta intenta simular la propagación del sonido desde el expositor hasta el oyente habiendo medido o estimado la respuesta del salón y luego hacer uso de la convolución para generar la reverberación equivalente, por lo que requiere información relacionada a la geometría del salón, las propiedades de sus superficies y las posiciones del expositor y los asistentes.

La aproximación perceptual busca reproducir las características perceptibles de la reverberación utilizando un filtro digital con parámetros asociados a un espacio de N dimensiones independientes que corresponden a atributos independientes de la reverberación [18]. Una desventaja de este método de aproximación es la divergencia de opiniones respecto a cuales deben ser los parámetros a considerar y la dificultad de elaborar filtros que reproduzcan esos parámetros.

2.8. Filtros Comb

En general, el proceso de filtrado es el proceso aplicado a una señal para modificar su contenido espectral. Generalmente son cambios de reducción de componentes no deseadas de la señal de entrada [20].

Un filtro comb anula regiones periódicamente a lo largo de una banda de frecuencia y se usa en un amplio rango de aplicaciones como rechazo de armónicos de líneas de potencia, separación espectral de las componentes lunares y solares de en mediciones ionosféricas [30].

Se les puede clasificar según el tipo de entradas que tengan: un filtro FIR toma únicamente valores pasados de la señal de entrada [20] y pueden tener distintas configuraciones de ceros tanto dentro como fuera del círculo unitario en el plano z [30]; los filtros IIR toman valores pasados tanto de la señal de entrada como de la de salida, es decir tienen retroalimentación [20] y todas sus configuraciones de ceros están dentro del círculo unitario en el plano z .

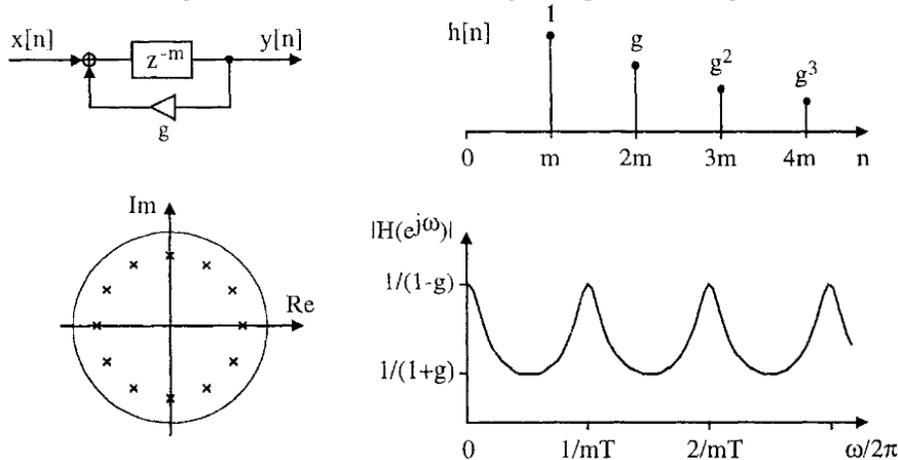
Modelar el tiempo de reverberación con un filtro FIR resulta en una temprana respuesta que implica una escasa calidad del sonido. En el caso de modelar la reverberación que llega al oído causando distorsión la aplicación más sencilla es usar un filtro comb IIR [18].

En la Figura 4 se muestran las características del filtro comb: un diagrama de bloques, la respuesta en el tiempo, la respuesta en frecuencia y el diagrama de polos. La función de transferencia de este filtro es:

$$H(z) = \frac{z^{-m}}{1 - gz^{-m}} \quad (49)$$

donde m es la longitud del desfase temporal en las muestras y g es la ganancia de retroalimentación. La respuesta en el tiempo del filtro es una secuencia con una amplitud decayendo exponencialmente separadas m muestras después, los polos ocurren en la m -ésima raíz de g y están armónicamente separadas en un

Figura 4: **Filtro Comb.** Línea superior de izquierda a derecha: Diagrama de bloques y respuesta en el tiempo. Línea inferior de izquierda a derecha: Respuesta en frecuencia y diagrama de polos



Fuente: Kahrs, Mark y Karlheinz Brandenburg. *Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics*. [18]

círculo en el plano z y la respuesta en frecuencia tiene m picos correspondientes a las frecuencias de los polos [18].

Los filtros comb también pueden agruparse en cascada o en paralelo, agrupados en paralelo la función de transferencia es:

$$H(z) = \sum_{i=1}^N \frac{z^{-m_i}}{1 - g_i z^{m_i}} \quad (50)$$

en donde N es el número de filtros en paralelo y lo más importante es la relación que se puede hacer con el tiempo de reverberación T_R a partir del módulo de polos γ_i [18]:

$$\gamma_i = \sqrt[m_i]{g_i} = 10^{-3T/T_R} \quad (51)$$

en donde T es el periodo de muestreo.

2.9. Ruido blanco y ruido rosado

La definición más sencilla del ruido dice que es un sonido no deseado que interfiere con lo que se escucha, o se intenta escuchar. El ruido es una señal aleatoria y puede ser descrito estadísticamente por la forma en la que se distribuye su densidad espectral de potencia.

El ruido se puede clasificar de distintas formas y una clasificación importante es según se distribuya su densidad espectral de potencia. El ruido blanco está distribuido uniformemente a lo largo de todo el espectro [9]. Es una señal que no está limitada en banda y, teóricamente tiene una potencia ilimitada. Para los casos prácticos, un ruido blanco tiene una densidad espectral de potencia constante en el ancho de banda de interés.

El ruido rosado es un ruido que presenta una mayor energía en las regiones de baja frecuencia y una pendiente negativa de 3 dB por octava [9]. La distribución espectral del potencia varía con el inverso de la frecuencia

En DSP, la base fundamental de la generación de ruido es el generador de números aleatorios, por eso la mayoría de lenguajes de programación lo incluyen una función estándar [33].

Asumiendo que la señal de ruido tiene una media de cero y una varianza unitaria, la Transformada z de la función de autocorrelación puede escribirse

$$S(z) = A \frac{(1 - az^{-1})(1 - az)(1 - bz^{-1})(1 - bz) \dots}{(1 - \alpha z^{-1})(1 - \alpha z)(1 - \beta z^{-1})(1 - \beta z) \dots} \quad (52)$$

en donde los parámetros $a, b, \dots, \alpha, \beta, \dots$ son menores que la unidad [6]. El diagrama de polos y ceros de $S(z)$ tiene los ceros dentro del círculo unitario en las posiciones $z = a, b, \dots$, los que están fuera del círculo unitario en las posiciones $z = 1/\alpha, 1/\beta, \dots$

3. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE UN SALÓN

La caracterización acústica de un salón depende de distintos factores: características físicas como volumen y área que influyen en el tiempo de reverberación y en la potencia que debe usarse en la voz; las características de los materiales con que está construido o se construirá el salón que influyen en la disipación de la energía acústica; el nivel ruido, tanto interno como externo que afecta la inteligibilidad de la voz. También influyen la capacidad auditiva de los estudiantes y el nivel de la voz del expositor.

De las distintas magnitudes que pueden considerarse en la caracterización de un salón, en este trabajo se toman en cuenta únicamente el tiempo de reverberación T_R y la relación de señal a ruido SNR , ya que son necesarios y suficientes para hacer una estimación del porcentaje de inteligibilidad del habla [4].

Los valores adecuados de estas magnitudes para un ambiente dependen del uso y de los usuarios, en el caso de salones de clase de con estudiantes en edad universitaria para una máxima comunicación se requiere una relación de señal a ruido $SNR \geq +6$ dB [13] y un tiempo de reverberación en el rango de 0.4 a 0.6 segundos [3].

En la Tabla I hay una estimación de la inteligibilidad de la voz para distintos valores de la relación de señal a ruido y del tiempo de reverberación para salones de clase, aunque están evaluados con niños, se sabe que los adultos obtienen un promedio de 10 % por arriba de los niños en pruebas de inteligibilidad del habla [3] y que la inteligibilidad de la voz disminuye exponencialmente con la disminución de la relación de señal a ruido [11].

El procedimiento seguido por Sabine para la medición del tiempo de reverberación de un salón consiste en obtener los datos, desde los planos arquitectóni-

Tabla I: **Variación de la inteligibilidad de la voz en función de la relación de señal a ruido y el tiempo de reverberación**

SNR (dB)	T_E (s)	Inteligibilidad (%)
+10	0.5	90
0	0.5	55
+10	1.5	75
0	1.5	30

Fuente: Beristáin, S. Acústica en salones de clase. Un recurso para crear ambientes de aprendizaje con condiciones de audición deseables. Parte I. Ver [3].

cos, para el volumen y la superficie de la sala; también los coeficientes de absorción de los materiales que se usan en las superficies que forman el salón como los que se pueden ver en Tabla II. Este método puede usarse incluso en la etapa de diseño del salón, como lo hizo el mismo Sabine en el diseño de una sala de conciertos diseñada por Charles McKim [34].

Sabine realizó experimentos a 512 Hz [34], sin embargo, el método preferido actualmente recomienda hacer mediciones a 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz y que los tiempos de reverberación sólo deben medirse en el caso de que los valores calculados excedan los valores de 0.6 s para un espacio menor de 283 m³, 0.7 s para un espacio con un volumen entre 283 m³ y 566 m³, en el caso de que el volumen supere los 566 m³ siempre debe hacerse la medición [1].

El Criterio de Ruido NC se usa como indicador de la cantidad de ruido que hay en un salón y se establece a partir de las medidas del nivel de presión del ruido a distintas frecuencias, las frecuencias centrales de cada banda de octava. Conociendo este valor se puede saber el nivel de potencia que debe usarse para

Tabla II: **Coefficientes de absorción para distintas superficies de uso común en la construcción medidos a 512 Hz**

Material	Coefficiente de absorción
Revestimiento de madera (pino)	0.061
Yeso sobre listones de madera	0.034
Vidrio sencillo	0.027
Yeso sobre azulejo	0.025
Ladrillos con cemento Portland	0.025

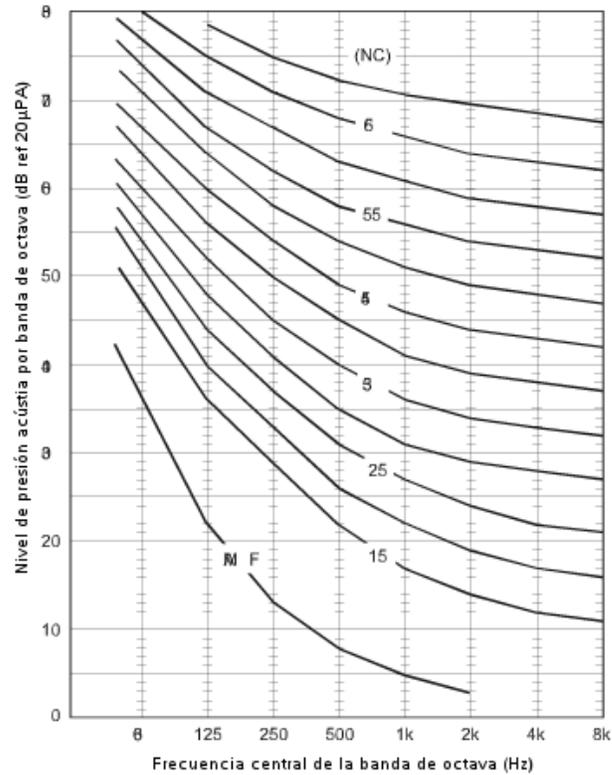
Fuente: Thompson, E. *Dead Rooms and Live Wires: Harvard, Hollywood, and the Deconstruction of Architectural Acoustics, 1900-1930*. Ver [34].

mantener una relación de señal a ruido aceptable para el nivel de inteligibilidad que se requiera.

Las frecuencias centrales de octava definen regiones o bandas de un amplio espectro para un mejor análisis. Las frecuencias centrales de octava guardan una relación de 2:1 y sus valores normalizados son: 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz y guardan relación con la sensibilidad del oído a la frecuencia ya que un cambio de frecuencia es distinguido más fácilmente a bajas frecuencias [4]. Aunque en otras aplicaciones también se usan las frecuencias de 31 Hz, 16 kHz, estos valores están muy cercanos a los límites del rango acústico del oído y pueden despreciarse.

El criterio de ruido NC se obtiene colocando los valores del nivel de presión del sonido medidos a las distintas frecuencias centrales de banda en un diagrama estándar y usando como valor de NC la curva más baja que no es alcanzada por el espectro medido. La Figura 5 muestra un diagrama de las curvas para calcular el Criterio de Ruido.

Figura 5 : Diagrama de curvas de Criterio de Ruido



Fuente: Bies, David A. y Colin H. Hansen. *Engineering Noise Control. Theory and practice*. Ver [5].

También debe tomarse en cuenta que el nivel sonoro disminuye con el inverso del cuadrado de la distancia, por lo que si las mediciones se hacen en el centro del salón, podrían haber regiones con distintos valores de relación de señal a ruido al disminuir el nivel de la voz del profesor y/o al aumentar el Criterio de Ruido según se tomen puntos lejanos o cercanos.

3.1. Modificación del tiempo de reverberación

Analizando la relación de Sabine en Ecuación (32), se observan dos formas de reducir el tiempo de reverberación: reducir el volumen y aumentar la absorción sonora.

La reducción de volumen se puede realizar colocando cielos falsos, pero en la Facultad esto es poco viable porque habría que hacer modificaciones en el sistema del alumbrado, se desaprovecharía la luz natural por la obstrucción de ventanas y se provocaría un aumento de la temperatura ambiente durante el verano.

Incrementar la absorción sonora es una mejor opción para los salones y se consigue distribuyendo materiales con un mejor coeficiente de absorción como paneles o recubrimientos para las paredes y el techo. Esto entonces representa una reducción del tiempo de reverberación minimizando la energía reflejada en el salón.

Otro problema es que el tiempo de reverberación sea inferior al recomendado, este efecto puede darse por la absorción de energía por superficies de altos coeficientes de absorción y provocaría que el sonido de la voz sea absorbido antes de llegar a los alumnos. Para corregirlo se pueden usar placas reflectoras colocadas al frente del salón o haciendo reflejante la parte central del techo [3].

3.2. Modificación de la relación de señal a ruido

Las fuentes de ruido pueden ser catalogadas como externas e internas. Las fuentes externas se deben a motores de automóviles en el parqueo que circula el edificio, altavoces y bocinas, campos de juego, etc. y pueden controlarse con el adecuado aislamiento acústico del edificio o con la creación de normas que regulen la cantidad de ruido que actividades al aire libre pueden generar en horario de clase.

En este sentido se hizo un estudio en la Facultad para medir el nivel de ruido en distintos ambientes durante una actividad electoral dando como resultado altos niveles de ruido que superan por mucho las recomendaciones de los criterios de control de ruido y los niveles inofensivos para la salud [28]. Sin embargo, aunque se ha normado la cantidad de ruido que estas actividades pueden generar, quedan muchas otras actividades que deben ser estudiadas.

Las fuentes internas de ruido son más complejas, tanto de identificar como de limitar ya que están ligadas a la arquitectura del salón, al tipo de materiales que fueron usados en la construcción, etc. Entre estas se debe tomar en cuenta: reverberación, eco, ruidos en el mismo salón y proveniente de salones adyacentes.

La reducción de ruidos de salones adyacentes es posible mejorando las divisiones entre salones en fase de diseño y, en el caso de la Facultad, agregando aislamientos en los salones más ruidosos. También se obtienen mejoras usando puertas sólidas y marcos sellados [3].

Otra forma de aumentar la relación de señal a ruido es el uso de sistemas de altavoces, como los que se han usado en algunos salones del Edificio T3. Sin embargo el uso de estos debe ser estudiado para que la distribución de la intensidad de la voz del profesor, al estar amplificada por el sistema, sea constante y con un nivel no mayor de lo necesario (+6 dB) para que los salones con sistemas de amplificación no se conviertan en fuentes de ruido para los salones adyacentes.

4. METODOLOGÍA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

El método científico se fundamenta en dos bases principales, la reproducibilidad del experimento y la verificabilidad de la hipótesis para ser reafirmada o modificada. En este caso se plantea un método a fin de que se puedan reproducir las condiciones de las mediciones, tanto para mediciones futuras que validen los resultados como para la elaboración de una serie de mediciones durante el experimento.

Se deben mantener las mismas condiciones si se quiere elaborar una serie de mediciones, por lo que también es necesario registrar la temperatura y la humedad relativa. Existen tres estados distintos, en términos de la cantidad de personas que hayan dentro, en los que se puede considerar un salón [17] :

Estado de ocupación: Cuando el salón esté ocupado por lo menos a un 80 % de su capacidad total, con las puertas y ventanas cerradas.

Estado de desocupación: Cuando el salón esté vacío, pero preparado para una clase magistral, con las puertas y ventanas cerradas.

Estado de estudio: Cuando el salón esté ocupado únicamente por el profesor.

4.1. Mediciones del tiempo de reverberación

Hay por lo menos dos procedimientos para la medición del tiempo de reverberación que han sido establecidos en los estándares: la medición por respuesta de impulso y la medición por interrupción de ruido [17]. Se prefiere la interrupción de ruido por la simplicidad que implica la construcción de un generador de ruido

que pueda interrumpirse a voluntad comparado con la complejidad de construir un generador de impulsos sonoros.

Las mediciones pueden hacerse en cualquiera de los tres estados mencionados [17] pero, en el caso de un salón de clases, se debe esperar un tiempo mayor mientras más desocupado esté el salón ya que los alumnos agregarían superficies de absorción. El procedimiento se enumera a continuación:

1. Determinar las condiciones de medición para las siguientes magnitudes:
 - Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
 - Humedad relativa (%)
 - Estado de ocupación
2. La fuente de ruido debe emitir una relación de señal a ruido lo suficientemente alta para no tener problemas al medir una señal muy baja. Se recomienda que esté por arriba de 45 dB [17]
3. Hacer las mediciones a 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz
4. Las posiciones de medición deben estar separadas por lo menos a una distancia equivalente a media longitud de onda ($\lambda = 0.69 \text{ m}$ a 500 Hz) entre ellas si se hacen múltiples mediciones en la misma sala; separadas al menos un cuarto de longitud de onda de cualquier superficie reflejante, incluido el suelo y a una distancia de la fuente mínima de

$$d_{min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT_R}} \quad (53)$$

En donde el valor T_R es el valor calculado previamente con los datos del salón y $c = 343 \text{ m/s}$ es la velocidad del sonido. La cantidad de mediciones depende de la cobertura que se necesite analizar, para una baja cobertura se pueden hacer variaciones para obtener cuatro medidas por cada posición

de la fuente y situando la fuente por lo menos en dos diferentes posiciones distintas.

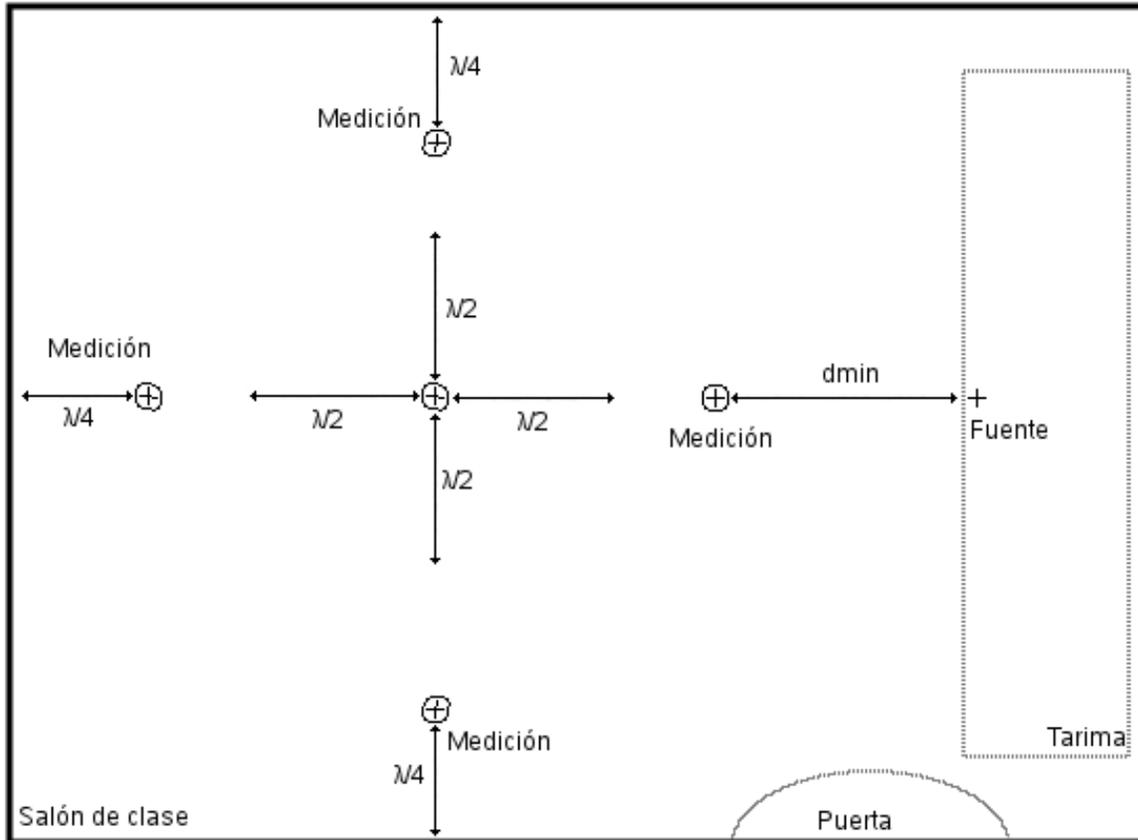
5. El promedio de la cantidad de mediciones que se realicen se presenta como resultado y la desviación estándar como medida de la dispersión del resultado.

4.2. Medición del nivel de ruido

Los procedimientos para la medición del nivel de ruido no están claramente establecidos, sin embargo puede elaborarse un método con estos pasos:

1. Determinar las condiciones de medición para las siguientes magnitudes:
 - Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
 - Humedad relativa (%)
 - Estado de ocupación
2. Las mediciones de ruido pueden hacerse con el salón en estado ocupado, esto dará el peor de los casos, cuando existe ruido por el movimiento de los escritorios, el rumor de charlas entre alumnos, etc. Generalmente se hacen mediciones del criterio de ruido en periodos estándar de 1 h o de 8 h en este caso se reduce el tiempo de medición al equivalente a un periodo de clase: 50 min.
3. Hacer las mediciones a 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz y 8 kHz
4. Para la distribución de las posiciones de medición se debe cuidar que la distancia entre ellas debe ser por lo menos de media longitud de onda ($\lambda = 5.46 \text{ m}$ a 63 Hz) y deben estar alejadas cualquier superficie reflejante, incluidas las paredes y el suelo, por lo menos un cuarto de onda.

Figura 6 : Ubicación de las mediciones dentro de un salón



5. Cada medición generará un valor para el criterio de ruido por lo que se obtiene una curva de los patrones de ruido en el salón, pero como resultado tomar el máximo valor obtenido para el criterio de ruido ya que este valor indica el peor de los casos.

En la Figura 6 se muestra el esquema de las mediciones dentro del salón de clase que se caracteriza. A la izquierda está ubicada la tarima y la pizarra y abajo de éstas la puerta de acceso. La fuente de sonido está ubicada al centro de la tarima, una posición común para el profesor durante la clase y las mediciones se distribuyen en el espacio que ocupan los escritorios. Se pueden hacer cuantas mediciones permitan las dimensiones del salón siempre que estén separadas $\lambda/2$

entre ellas y alejadas $\lambda/4$ de las paredes y el piso y que estén a una distancia mínima d_{min} (descrita previamente en la Ecuación (53)) de la fuente.

5. IMPLEMENTACIÓN

Una vez planteados los factores de la caracterización acústica y los detalles de la metodología de adquisición de datos es posible definir las técnicas de la implementación del análisis espectral delimitando el sistema que se analiza y las señales de entrada y salida que interactúan en él.

Se toman en cuenta las características del habla para la selección de los parámetros del generador de ruido y la frecuencia de muestreo para la medición del tiempo de reverberación que se estima como el efecto producido por un arreglo de 4 filtros en paralelo. También se toman en cuenta las características del ruido para la selección de la frecuencia de muestreo para el cálculo del criterio del ruido.

5.1. Descripción y delimitación

El fenómeno de reverberación que se estudia se produce todos los días, a cada instante y en todos los ambientes en los que se propaga el sonido. Se puede identificar claramente la reverberación temprana que ayuda a darle una percepción de viveza al sonido y la reverberación tardía que provoca ecos o interferencias destructivas que conllevan a una disminución de la inteligibilidad del habla, es este último tipo de reverberación el principal objetivo del estudio.

El salón de clase se considera como un sistema lineal e invariante en el tiempo y en el cual es posible simular, por aproximación perceptual, el fenómeno de la reverberación usando Filtros Comb dispuestos en paralelo. El sistema que se analiza está delimitado por los límites físicos del salón de clase en el estado de ocupación que se defina para las mediciones, pudiendo seleccionar de entre los estados de ocupación, estudio y desocupación.

Este método de estimación de componentes espectrales se basa en las observaciones de duración finita de señales y tiene la desventaja de distorsionar el espectro que se trata de estimar, tanto para señales determinísticas como para señales aleatorias [30]. Existen otros métodos de estimación espectral de potencia entre ellos están los métodos no paramétricos, los métodos paramétricos, la estimación por mínima varianza que fue inicialmente diseñado para análisis sísmico y los algoritmos de Eigen-análisis que se aplican a señales senoidales corrompidas por ruido aditivo.

Entre los métodos no paramétricos están el método de Bartlett, el de Blackman y Tukey y el de Welch [30] y se caracterizan por no hacer asunciones sobre como fueron generados los datos y un decremento en la resolución de la frecuencia con el objetivo de reducir la varianza en la estimación espectral.

Entre los métodos paramétricos están el proceso de promedio autoregresivo móvil ARMA (por *autoregressive-moving average*), el proceso autoregresivo AR (por *autoregressive*) y el proceso de promedio móvil MA (por *moving average*) [30]. Se caracterizan por necesitar una menor cantidad de datos, comparado con los métodos no paramétricos, por lo que usan técnicas para extrapolar los valores de las autocorrelacionados.

5.2. Señales de entrada y salida

Las fuentes de sonido son el ruido ambiental y la señal de entrada, que es una señal de ruido blanco gaussiano en el rango de 170 Hz a 4 kHz, que representan los límites del ancho de banda del habla, con una potencia suficiente para poder tener una relación de señal a ruido mayor que 45 dB para no incurrir en complicaciones relacionadas a la medición de señales muy débiles.

La señal de salida $y[n]$ es generada por la convolución de la respuesta acústica del salón $h[n]$ y la señal de entrada $x[n]$. La respuesta acústica del salón depende

de las características físicas como volumen y superficie, pero también depende de las características de los materiales de las superficies de las paredes, el piso y el techo.

La señal de entrada $x[n]$ es una señal limitada en banda con un ancho de banda de 3.8 kHz por lo que una frecuencia de muestreo $f_s \geq 7.6$ kHz satisface el criterio de Nyquist. Debido a que se analiza la respuesta del salón como la respuesta de un filtro y que el tipo de respuesta variará en cada salón, se debe usar una frecuencia de muestreo que satisface el criterio de Nyquist y que sea superior a la frecuencia máxima de la señal de entrada ya que si el salón se comporta como un filtro pasa bajas no sería capaz de filtrar las componentes espectrales de baja frecuencia provocando traslapes o *aliasing*. Se debe usar una frecuencia de muestreo $f_s = 8$ kHz. Una mayor frecuencia superior también podría ser usada para generar una mayor cantidad de muestras.

La generación de ruido se hace con una función de C capaz de calcular dos valores aleatorios por llamada a la función. El crédito de la función pertenece Paul M. Embree que la publicó junto a un amplio conjunto de funciones y bibliotecas en 1995 [7]. La función no toma argumentos de entrada y los valores de salida son del tipo estándar float de C y se basa en el método Box-Muller que toma un par de números aleatorios enteros con una densidad de probabilidad uniforme y genera números aleatorios con una densidad de probabilidad gaussiana con un valor medio centrado en el origen y una varianza unitaria [7].

La función original de Embree está basada en la función estándar de C rand para la generación de números aleatorios enteros, pero siguiendo su propia recomendación se modificó la función para que utilice otra función basada en el algoritmo de Park y Miller y descrito por Richard Fitzpatrick [12]. La función para generar ruido es la siguiente:

```

// RANDMAX = M - 1
#define RANDMAX 2147483646
// Function prototype
int random(int);
float gaussian();
// Park and Miller's psuedo-random number generator.
int random (int seed = 0){
    static int next = 1;
    static int A = 16807;
    static int M = 2147483647;    // 231 - 1
    static int q = 127773;      // M / A
    static int r = 2836;        // M % A

    if (seed) next = seed;
    next = A * (next % q) - r * (next / q);
    if (next < 0) next += M;
    return next;}

// Box-Miller transformation to generate Gaussian random numbers
float gaussian(){
    static int ready =0;
    static float gstore;
    static float rconst1 = (float)(2.0/RAND_MAX);
    static float rconst2 = (float)(RAND_MAX/2.0);
    float v1, v2, r, fac, gaus;

    if(ready ==0) {
        do {
            v1=(float)random() - rconst2;
            v2=(float)random() - rconst2;
            v1*=rconst1;
            v1*=rconst2;
        } while (r>1.0f);
        fac=sqrt(-2.0f*log(r)/r);
        gstore=v1*fac;
        gaus=v2*fac;
        ready=1;
    }
    else {
        ready=0;
        gaus=gstore;
    }
    return (gaus);}

```

Los valores de la señal de entrada y salida se tomarán a la frecuencia de muestreo f_s durante 5 s ya que el tiempo de reverberación T_R no superará nunca éste debido al decaimiento exponencial de la densidad de energía en el salón. Este tiempo empezará a contarse 1 s antes de apagar la fuente de ruido para crear un estado transitorio y ésta debe haber estado encendida durante al menos 10 s para que se alcance un estado estable en el sistema. Esto generará una cantidad de $N = 40\,000$ valores para cada una de las señales, por lo que las Transformadas z de cada una será

$$X(z) = \sum_{k=0}^N x[k]z^{-k} \quad (54a)$$

$$Y(z) = \sum_{k=0}^N y[k]z^{-k} \quad (54b)$$

para la entrada y salida respectivamente.

5.3. Función de transferencia

Teniendo las transformadas de las señales de entrada y salida y expresando z en forma polar se calcula la función de transferencia $H(z)$ del salón en términos de los valores que se midan de las señales de entrada y salida

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N x[k]r^{-k}e^{-j\omega k}}{\sum_{k=0}^N y[k]r^{-k}e^{-j\omega k}} \quad (55)$$

Ya que el salón es un sistema estable de entrada limitada-salida limitada BIBO, en el análisis de la función de transferencia, se debe cumplir que $|z| \leq 1$ es decir que todos los polos de la función de transferencia deben estar dentro o en el círculo unitario y para aprovechar la reducción que puede hacerse de la Transformada z a la Transformada de Fourier, se tomará $|z| = 1$ es decir que $r = 1$ y con $\omega = 2\pi f_m/f_s$ la función de transferencia quedará descrita en términos de un único parámetro, la frecuencia de la muestra f_m

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N x[k]e^{-2j\pi k f_m / 8000}}{\sum_{k=0}^N y[k]e^{-2j\pi k f_m / 8000}} \quad (56)$$

Las frecuencias de las muestras f_m serán los valores para los que se quiera medir el tiempo de reverberación T_R , entonces se seleccionará cada una de las frecuencias $f_m = 500\text{Hz}$, $f_m = 1\text{kHz}$ y $f_m = 2\text{kHz}$ por lo que la función de transferencia será un valor conocido.

5.4. Estimación del tiempo de reverberación

Por otro lado, se trata de modelar la función de transferencia usando un arreglo de 4 Filtros Comb en paralelo y tomando en cuenta los criterios adoptados para z la función de transferencia es:

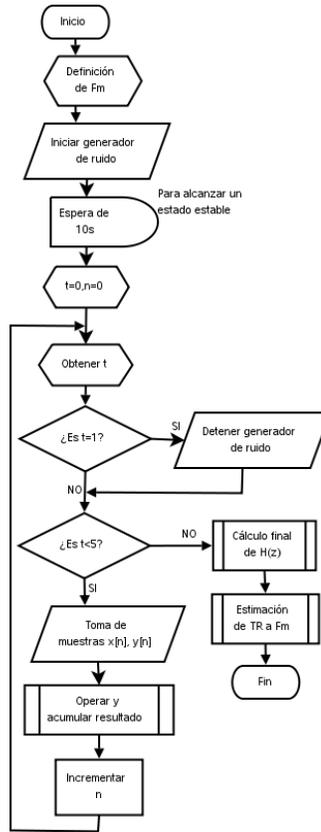
$$\sum_{i=1}^4 \frac{e^{-2j\pi m_i f_m / 8000}}{1 - 10^{-3m_i / (8000T_R)} e^{2j\pi m_i f_m / 8000}} = H(z) \quad (57)$$

en donde $H(z)$ es el valor obtenido de la evaluación de la Ecuación (56).

Los parámetros que quedan por definir son los tiempos de desfase m_i , que representan el tiempo al cual llegarán las réplicas o ecos que conforman la reverberación, por lo que para que el oído distinga los ecos se debe cumplir que $m_i > 67\text{ms}$ para todo valor de i .

Ninguna de las primeras réplicas proporcionadas por cada filtro debe estar cercana a las segundas réplicas de los otros filtros porque las réplicas del mismo orden tendrán la misma magnitud y esto causaría la percepción de obtener ecos de mayor intensidad después de algún periodo de tiempo en contradicción con el decaimiento que debe darse en el salón. Entonces $m_1 = 71\text{ms}$, $m_2 = 73\text{ms}$, $m_3 = 79\text{ms}$, $m_4 = 83\text{ms}$.

Figura 7: Diagrama de flujo para el procedimiento de cálculo del tiempo de reverberación



Tomando en cuenta estos valores, la función de transferencia es:

$$\begin{aligned}
 H(z) = & \frac{e^{-j\pi 0.071 f_m / 4000}}{1 - 10^{-3 \cdot 0.071 / (8000 T_R)} e^{j\pi \cdot 0.071 \cdot f_m / 4000}} \\
 & + \frac{e^{-j\pi 0.073 f_m / 4000}}{1 - 10^{-3 \cdot 0.073 / (8000 T_R)} e^{j\pi \cdot 0.073 \cdot f_m / 4000}} \\
 & + \frac{e^{-j\pi 0.079 f_m / 4000}}{1 - 10^{-3 \cdot 0.079 / (8000 T_R)} e^{j\pi \cdot 0.079 \cdot f_m / 4000}} \\
 & + \frac{e^{-j\pi 0.083 f_m / 4000}}{1 - 10^{-3 \cdot 0.083 / (8000 T_R)} e^{j\pi \cdot 0.083 \cdot f_m / 4000}}
 \end{aligned} \tag{58}$$

y como $H(z)$ es conocida para cada f_m se puede encontrar el valor de T_R .

En la Figura 7 se muestra un diagrama de flujo para el procedimiento de la estimación del tiempo de reverberación.

5.5. Estimación del criterio de ruido

En este caso, la señal de entrada será la producida por las fuentes internas y externas de ruido en el salón, $x[k] = n[k]$. En este caso, la transformada z en forma rectangular será:

$$N(z) = \sum_{k=0}^M n[k] \left[\cos\left(\frac{2\pi k f_m}{f_s}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi k f_m}{f_s}\right) \right] \quad (59)$$

de donde se pueden separar la parte real $Re\{N(z)\}$ y la parte imaginaria $Im\{N(z)\}$. La frecuencia de las muestras f_m más grande que se considerará es de 8 kHz por lo que para satisfacer el criterio de Nyquist se usará una frecuencia de muestreo de $f_s = 16\text{kHz}$. Tomando en cuenta el valor de la frecuencia de muestreo y la Ecuación 59 para calcular la potencia con $|N(z)|^2 = Re\{N(z)\}^2 + Im\{N(z)\}^2$ se tiene que la potencia de la señal de ruido es

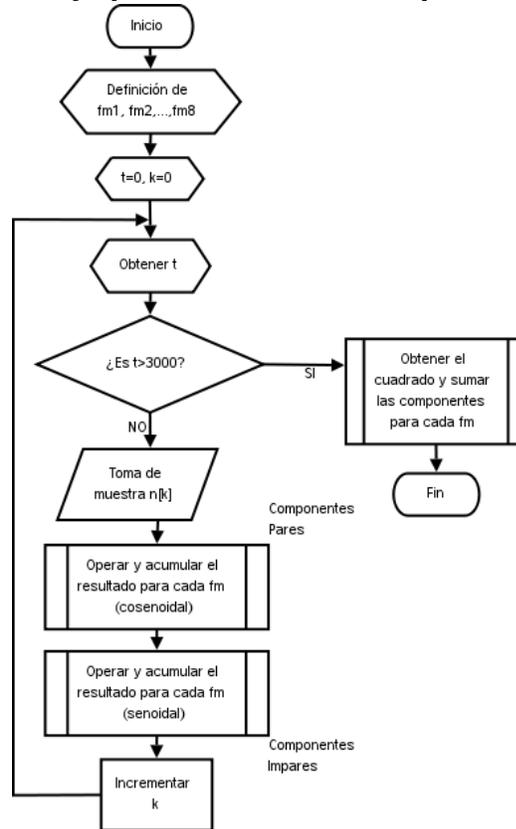
$$|N(z)|^2 = \left[\sum_{k=0}^M n[k] \cos\left(\frac{2\pi k f_m}{16\,000}\right) \right]^2 + \left[\sum_{k=0}^M n[k] \sin\left(\frac{2\pi k f_m}{16\,000}\right) \right]^2 \quad (60)$$

en donde el único parámetro que queda es la frecuencia de la muestra y ya que se harán mediciones cada valor $f_m = 63\text{Hz}$, $f_m = 125\text{Hz}$, $f_m = 250\text{Hz}$, $f_m = 500\text{Hz}$, $f_m = 1\text{kHz}$, $f_m = 2\text{kHz}$, $f_m = 4000\text{kHz}$, $f_m = 8\text{kHz}$.

Tomando las mediciones a una frecuencia de muestreo de $f_s = 16\text{kHz}$ durante un periodo de 50 min se generará una cantidad de $M = 48\,000\,000$ que es muy grande para almacenar por lo que es mejor hacer el cálculo en tiempo real, únicamente acumulando cada valor medido multiplicado por la función trigonométrica para que al final del proceso, se puedan elevar al cuadrado y sumar ambos valores para cada valor de f_m .

La Figura 8 muestra un diagrama de flujo para el procedimiento del cálculo para el criterio de ruido.

Figura 8: Diagrama de flujo para el cálculo de la potencia del ruido de fondo



5.6. Implementación de un prototipo

La implementación de un prototipo se simplifica usando una herramienta informática para cálculo numérico: Scilab, que es un paquete de software libre para aplicaciones científicas y de ingeniería que permite hacer simulaciones y, ejecutándose sobre un sistema operativo en tiempo real como RTLinux, permite la interacción con sistemas DSP.

RTLinux se distribuye bajo la Licencia Pública de GNU de la Fundación para el Software Libre, se puede instalar en casi cualquier computadora y existe una versión para computadoras multiprocesadores con la posibilidad de asignar tareas por separado [31]. RTLinux no es otra distribución más, está compuesto

de un parche, o conjunto de instrucciones que modifican el núcleo del sistema operativo, y de un grupo de módulos que se pueden cargar a criterio del usuario.

Entre las características más importantes de RTLinux están que es un sistema operativo de tiempo estricto, tiene una eficiente gestión de tiempos proporcionando una resolución mínima de $1 \mu\text{s}$ [31]. También tiene un acceso directo al hardware ya que su arquitectura le permite manejar puertos e interrupciones eficientemente.

Scilab fue desarrollado inicialmente por investigadores del Instituto Nacional Francés de Investigación en Control y Ciencias de la Computación [32] que cuenta con paquete de herramientas llamado Scicos que es una interfaz gráfica para la edición de modelos y control de simulación de sistemas desarrollada por el Proyecto Metalau [22] del mismo instituto y cuenta con una variedad de bloques estándar y la ventaja de poder extender su capacidad con paquetes de bloques específicos, como las del manejo de DSP y la integración de bloques de código de C y FORTRAN. Las dos aplicaciones son distribuidas bajo la Licencia Pública de GNU lo que garantiza la disponibilidad del código fuente para su edición, adaptación y mejora continua por parte de una comunidad de usuarios y desarrolladores, los detalles para la instalación de estas herramientas están disponibles en una publicación electrónica mantenida por EMCelettronica [8].

La ventaja de estas simulaciones es la capacidad de generación de código que provee otro paquete de herramientas de Scilab llamado *Code Generator for FLEX* desarrollado por Evidence [10] para tarjetas FLEX que son módulos basados en un dsPIC Microchip dsPIC33FJ256MC710 DSC microcontroller con arquitectura de 16bits y una velocidad de CPU de 40MIPS con un oscilador interno de hasta 7.37 MHz [23], disponible en dos versiones, *full* que integra circuitería de potencia y un puerto USB para transferencia de datos[24] y la versión *light* que puede operar en aplicaciones alimentadas por baterías [25]. Ambas tarjetas requieren de

un núcleo para sistemas integrados para trabajo en tiempo real conocido como ERIKA.

El generador de código se encarga de convertir la estructura lógica del diagrama de bloques diseñado en Scilab/Scicos a un conjunto de instrucciones ordenadas y con un optimizado uso de memoria y registros a partir del archivo guardado del modelo para interpretar los bloques usados y sus conexiones.

Los requerimientos descritos para la generación de código con son [10]:

- Una tarjeta FLEX
- El núcleo mínimo para trabajo en tiempo real ERIKA
- El paquete de herramientas Microchip tools para programación y caza de fallas

y el procedimiento para la generación de código y puesta en marcha del prototipo se resume así [10]:

- Diseño del sistema en Scicos
- Simulación y optimización del sistema en Scicos
- Presionar el botón de generación de código para la tarjeta FLEX con núcleo ERIKA
- Carga del programa a la tarjeta
- Puesta en marcha del prototipo integrado a Scicos usando la conexión USB

CONCLUSIONES

1. La medición experimental del tiempo de reverberación y la relación de señal a ruido son necesarias y suficientes como magnitudes físicas a considerar en la caracterización acústica de un salón de clase.
2. Es posible hacer una estimación del porcentaje de inteligibilidad del habla, a partir del tiempo de reverberación y la relación de señal a ruido.
3. La mejora de las características acústicas de un salón benefician a profesores y alumnos, al no tener que realizar más esfuerzos para entender el mensaje que se transmiten unos a otros. Esto resulta en un mejor aprovechamiento del recurso de la clase magistral y en una mejora en el rendimiento académico.
4. Se establecieron los parámetros a considerar, las condiciones y los pasos a seguir para hacer las mediciones necesarias para la caracterización acústica de un salón definiendo así una forma de repetir el experimento, para hacer verificaciones y correcciones al modelo diseñado.
5. Dada la naturaleza de los datos que se analiza, el Procesamiento Digital de Señales y en concreto la Transformada z y su reducción a la Transformada de Fourier son una alternativa de implementación más sencilla para la estimación de componentes espectrales de una señal.
6. Es posible hacer la modelación y simulación de un sistema integrado de Procesamiento Digital de Señales, haciendo uso de software libre y gratuito, por lo que tomando en cuenta el factor económico el software libre es la mejor alternativa para elaborar aplicaciones de muy alta relación calidad/precio.

RECOMENDACIONES

1. Este trabajo fue elaborado siguiendo los argumentos y conceptos que rodean la ecuación de Sabine, por lo que es interesante hacer pruebas similares usando como base el trabajo de Eyring, que representa un cambio en el concepto de un proceso continuo, suave y gradual del decaimiento de la energía por una descripción de un proceso discontinuo analizado como fuentes imagen.
2. Es importante hacer una evaluación progresiva de la inteligibilidad que se alcanza en los salones con el fin de promover mejoras acústicas, a fin de minimizar los esfuerzos de los profesores por mantener un elevado nivel de la voz y de los alumnos por escuchar lo que se dice, ya que muchas veces se cree que mejorar la acústica de un salón de clase para personas sin deficiencias auditivas es innecesario.
3. Este trabajo presentó el criterio de ruido como método de estudio de ruido interno, sin embargo es importante hacer un análisis y modificación para realizar el trabajo basándose en el estándar creado por la Organización Internacional para Estandarización ISO.
4. Al hacer una adaptación acústica a salón, debe tomarse en cuenta que se alterarán condiciones ambientales como la calidad del aire por la proliferación de microorganismos, la temperatura promedio y inflamabilidad de los materiales usados, por lo que se recomienda hacer una mejora en la climatización del salón y disminuir la cantidad del tiempo de evacuación de la sala en caso de un incendio.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 . Acoustical Society of America. **Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools**. American National Standard Institute, Inc. ANSI S12.60-2002.
- 2 . Beranek, Leo L. **Acoustics**. American Institute of Physics. E.E.U.U. Edición 1993.
- 3 . Beristáin, Sergio. **Acústica en salones de clase. Un recurso para crear ambientes de aprendizaje con condiciones de audición deseables. Parte I**. Ingenierías, Vol. IX. No. 30. Enero-Marzo 2006. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- 4 . Beristáin, Sergio. **Acústica en salones de clase. Un recurso para crear ambientes de aprendizaje con condiciones de audición deseables. Parte II**. Ingenierías, Vol. IX. No. 31. Abril-Junio 2006. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- 5 . Bies, David A. y Colin H. Hansen. **Engineering Noise Control. Theory and practice**. Spon Press. 4ta Edición. 2009.
- 6 . Elliott, Stephen J. **Signal processing for active control**. Academic Press. 2001.
- 7 . Embree, Paul M. **C algorithms for real-time DSP**. Prentice-Hall, Inc. 1995.
- 8 . EMCelettronica. **Your Electronics Open Source**. Publicación electrónica disponible en <http://dev.emcelettronica.com/scilabscicos-code-generator-flex-0>. Consultada en septiembre de 2009.

- 9 . Everest, F. Alton. **The Master Handbook of Acoustics**. McGraw-Hill. 4 Ed. E.E.U.U. 2001.
- 10 . Evidence. **Scilab/Scicos Code Generator for FLEX**. Publicación electrónica disponible en <http://www.evidence.eu.com/content/view/175/216>. Consultada en septiembre de 2009.
- 11 . Feijóo S. y J.M. Alvarez. **Acústica de aulas: Percepción fonética en presencia de ruido**. Departamento de Física Aplicada, Facultad de Física. Universidad de Santiago de Compostela.
- 12 . Fitzpatrick, Richard. **Computational Physics: An introductory course**. Conferencias para estudiantes del curso de Física Computacional. Universidad de Austin Texas. E.E.U.U. 2006.
- 13 . Gail Gegg Rosenberg, et al. **Improving Classroom Acoustics (ICA): A Three-Year FM Sound Field Classroom Amplification Study**. Journal of Educational Audiology 7. 1999.
- 14 . Hayes, Monson H. **Statistical Digital Signal Processing and Modeling**. John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- 15 . Hewlett Packard. **Acoustics Handbook**. Application Note 100. Hewlett Packard. Alemania 1968.
- 16 . Hsu, Hwei P. **Signals and systems**. Schaum's Outline Series. McGraw-Hill. 1995.
- 17 . International Organization for Standardization. **Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters**. ISO 3382.

- 18 . Kahrs, Mark y Karlheinz Brandenburg. **Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics**. Kluwer Academic Publishers. E.E.U.U. 2002.
- 19 . Lawrence E. Kinsler, et al. **Fundamentals of Acoustics**. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc. E.E.U.U. 2000.
- 20 . Lyons, Richard G. **Understanding Digital Signal Processing**. Prentice Hall PTR. E.E.U.U. 2001.
- 21 . McNeill, Deryk. **Measurement of Reverberation Time**. Publicación electrónica disponible en <http://www.picotech.com/experiments/reverberation>. Consultada en septiembre de 2009.
- 22 . Metalau Project. **Scicos: Block diagram modeler/simulator documentation**. INRIA, Paris-Rocquencourt centre. Publicación electrónica disponible en www.scicos.org. Consultada en septiembre de 2009.
- 23 . MICROCHIP. **dsPIC33FJ256MC710 Data sheet**. Publicación electrónica disponible en <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en024663>. Consultada en septiembre de 2009.
- 24 . MicroController Pros Corporation. **Microchip dsPIC Development Base Board, FLEX Full**. Publicación electrónica disponible en http://microcontrollershop.com/product_info.php?cPath=112_160_316&products_id=2023. Consultada en septiembre de 2009.
- 25 . MicroController Pros Corporation. **Microchip dsPIC Development Base Board, FLEX Light**. Publicación electrónica disponible en http://microcontrollershop.com/product_info.php?cPath=112_160_316&products_id=2022. Consultada en septiembre de 2009.

- 26 . Mitra, Sanjit K. **Digital Signal Processing. A Computer-Based Approach.** McGraw-Hill. Segunda edición 2001.
- 27 . Oppenheim, Alan, et. al. **Signals and Systems - An Introduction to Analog and Digital Signal Processing.** Prentice-Hall. 1983.
- 28 . Ortiz Tánchez, E. y Edgar Cifuentes. **Niveles de ruido ambiental en el proceso electoral 2000 en la Facultad de Ingeniería de la USAC.** Publicación electrónica disponible en <http://fisica.usac.edu.gt/public/ruido/>. Consultada en septiembre de 2009.
- 29 . Paul Fillippi, et al. **Acoustics: Basic Physics, Theory, and Methods.** Academic Press, 1998.
- 30 . Proakis, J.G. y D.G. Manolakis. **Digital signal processing. Principles, algorithms, and applications.** Prentice-Hall International Inc. Tercera Edición.
- 31 . Ripoll, Ismael. **Introducción a RTLinux.** Grupo de Informática Industrial y Sistemas de Tiempo Real. Universidad Politécnica de Valencia. España. Publicación electrónica disponible en <http://rtportal.upv.es/tutorial/01-intro/01-intro.html>. Consultada en septiembre de 2009.
- 32 . Scilab Consortium. **Scilab platform.** Publicación electrónica disponible en <http://www.scilab.org/platform>. Consultada en septiembre de 2009.
- 33 . Smith, Steven W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.** California Technical Publishing Second Edition. San Diego California, E.E.U.U. 1999.
- 34 . Thompson, Emily. **Dead Rooms and Live Wires: Harvard, Hollywood, and the Deconstruction of Architectural Acoustics, 1900-1930.** Isis, Vol. 88, No. 4 (Dec.,1997), 597-626. The University of Chicago Press.