



148  
Zejem

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"MEDICION DE LA INTELIGIBILIDAD EN RECINTOS  
A TRAVES DE UNA MICROCOMPUTADORA  
PERSONAL"

FALLA DE ORIGEN

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
AREA DE INGENIERIA  
ELECTRICA Y ELECTRONICA  
P R E S E N T A I  
RAUL PASTRANA MENDEZ



DIRECTOR DE TESIS:  
M. en C. S. JESUS PEREZ RUIZ

MEXICO, D. F.

1995

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos

Quiero aprovechar este espacio para agradecer, de manera muy especial, a mi director de tesis en el Laboratorio de Acústica, M. en C. Santiago Jesús Pérez Ruiz, porque durante todos estos años compartió conmigo su paciencia, su sabiduría y su comprensión, además de sus consejos, que influyeron definitivamente en la realización de este trabajo. Para él mi admiración y respeto.

Asimismo, agradezco a **TODO** el personal del mismo laboratorio de acústica por su participación en la grabación de voces, por compartir su experiencia y sus sabios consejos, mis compañeros: Fis. Rosalba Castañeda de Pérez, Sra. Ma. Eustolea Salazar Pizaño, Fis. Arturo Orozco Santillán, Ing. Antonio Pérez López y M. en C. Ricardo Ruiz Boullosa.

Atención especial merecen mis amigos durante todos estos años, el Ing. Arturo Gutiérrez Reed y el Pas. José Manuel Guerrero Morales, sin olvidar, por supuesto, a la Srita. Ma. de los Angeles Peralta Jiménez (que actualmente ya no trabaja en el laboratorio), quienes, además de brindarme una amistad sincera, han sabido comprenderme, aconsejarme y apoyarme en momentos de tedio, de hastío, de desesperación y de dolor. A todos ellos les hago un reconocimiento.

También quiero agradecer al Fis. Mario González Cardel por compartir sus conocimientos y disponer de su tiempo cuando lo requería, así como al Ing. Antonio Garcés, al Ing. Antonio Domínguez y al Ing. Jesús Ramírez, por prestarme auxilio cuando lo necesitaba.

A continuación haré mención de los nombres de cada uno de los voluntarios -todos ellos pertenecientes a este Centro o relacionados indirectamente- que gentil, amable y desinteresadamente dispusieron de su tiempo para colaborar en la grabación de las voces. Ellos son (en orden de aparición durante las grabaciones):

<b><u>NOMBRE</u></b>	<b><u>DEPARTAMENTO</u></b>
Paula Calderón Delgadillo	Secretaría Técnica
Mario Fco. González Cardel	"
Bertha B. Galicia Cedillo	Secretaría Académica
Ma. Antonieta Flores Montiel	"
Guillermina Araujo M.	Secretaría Administrativa
Rosa Ma. Moreno Garduño	"
Sra. Paula	"
Esperanza Silvia García Sánchez	"
Claudia Gordillo Gómez	"
Josefina Elizalde Torres	Química de materiales
Esther Mata Zamora	"
Ma. Eugenia Jerezana	Enseñanza experimental de las ciencias
María Guadalupe López Molina	Procesamiento de imágenes
Veneranda Guadalupe Garcés Chávez	Laboratorio de Optica
Pablo Loza Alvarez	"
Luis Armando González Gutierrez	"
Alejandro Cervantes Franco	"
Claudia Arreola C.	Dirección
Mónica Isabel García Sandoval	PUIDE
Saúl de la Rosa Nieves	"
Héctor A. Sosa Rojas	"
Eloy Martínez M.	"
Gabriel García Gama	"
Luis Bustamante Murillo	"

Consuelo Molina Guardado	Intendencia
Lilia Granados Ramírez	Op. Maq. Comp. Tip.
Ma. Elena Posadas Pacheco	Almacén
Eduardo Trejo Alvarado <sup>†</sup>	Mantenimiento Cómputo/Electrónica
Asur Guadarrama Santana	"
José de la Cruz Martínez	"
Cayetano Hirata Nagasako	"
Arturo Ugalde Salas	"
Jorge Alberto Miss Paredes	Metrología
Benjamín Valera Orozco	"
Elizabeth Vázquez Cruz	Particular
Mónica Galicia Cedillo	"
Ma. de Lourdes Calderón Delgadillo	"
Raquel Araujo Medina	"
Ricardo Velasco Chavez	"

Ahora toca el turno a quienes me ayudaron a efectuar la prueba subjetiva (todos ellos excelentes compañeros):

Rosalba Castañeda de Pérez	Acústica
Antonio Pérez López	"
Bertha B. Galicia Cedillo	Secretaría Académica
Juan Manuel Almanza	Óptica
José Ocotlán Flores Flores	Química de materiales
Clara Alvarado Zamorano	Enseñanza Experimental de las Ciencias

A todos ellos mi reconocimiento y, una vez más, **GRACIAS** por su colaboración, pues me permitió llevar a cabo mi trabajo de tesis.

---

<sup>†</sup> Quiero señalar el lamentable fallecimiento de nuestro excelente compañero y amigo, el Ing. Eduardo Trejo Alvarado, una persona a quien siempre admiré por su capacidad, su motivación y su agradable forma de ser, cuyo deceso ocurrió poco antes de imprimir esta tesis. Nunca lo olvidaré. Descanse en paz.

# Dedicatorias

## **A la memoria de mi PADRE:**

Porque siempre sabías que iba a lograrlo  
y a pesar de no encontrarte con nosotros,  
este trabajo es mi humilde homenaje.

(Que estés con Dios papá)

Dr. Emilio Pastrana Medina †

(1929-1993)

## **A mi MADRE:**

Por tu cariño, apoyo y comprensión, discúlpame por  
haber sido intolerable en ocasiones, pero es el precio  
de realizar un gran esfuerzo, pues aquí esta el resultado.

## **A mis HERMANOS: (Araceli, Gabriel y Emilio)**

Como lo saben, este trabajo me costó un gran esfuerzo, esfuerzo  
en el cual estuvieron involucrados indirectamente por todo lo  
que hemos pasado, estemos juntos ó no. Les dedico esta  
tesis como una esperanza de lograr cosas mejores.

Y también dedico mi tesis a todos mis **FAMILIARES** y **AMIGOS** que creyeron en mí y  
siempre tuvieron palabras de motivación y aliento para culminar este trabajo; no los nombro  
porque no quiero omitir nombres.

*'Es tan cómodo y tan fácil dejar que los demás creen y construyan y luego echarles en cara los errores o fallos inherentes a cualquier obra, aún la más perfecta'.*

**LYNDON B. JOHNSON**  
(Presidente de los EU de 1964 a 1969.)

# **Contenido**

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>
<b>Capítulo 2</b>	<b>Fundamentos físicos del sonido</b>
<b>Capítulo 3</b>	<b>Métodos de medición de la inteligibilidad del habla en recintos</b>
<b>Capítulo 4</b>	<b>Análisis de la Función de Transferencia de Modulación</b>
<b>Capítulo 5</b>	<b>Mediciones Subjetivas (Prueba de Articulación) y Mediciones Objetivas (Método RASTI)</b>
<b>Capítulo 6</b>	<b>Resultados y Conclusiones</b>
<b>Apéndice</b>	<b>Modelos de aproximación para la obtención del índice STI</b>
<b>Bibliografía</b>	



# Capítulo

# 1

## INTRODUCCION

### INTRODUCCION

¿Qué es la Inteligibilidad? .....	1-2
Introducción .....	1-4

### **¿Qué es la inteligibilidad?**

El diccionario proporciona la siguiente información:

**inteligibilidad** *f. Calidad de inteligible.*

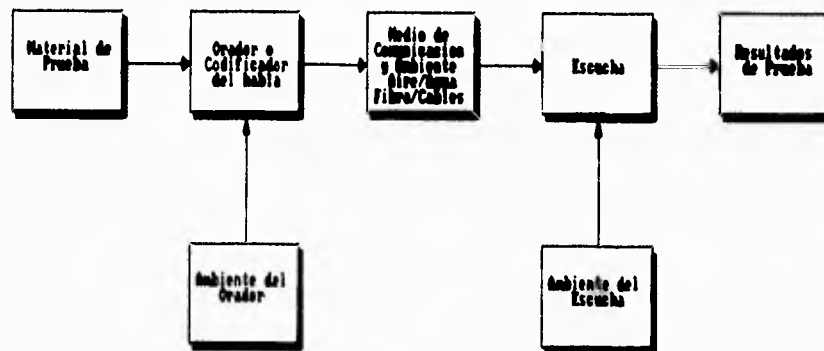
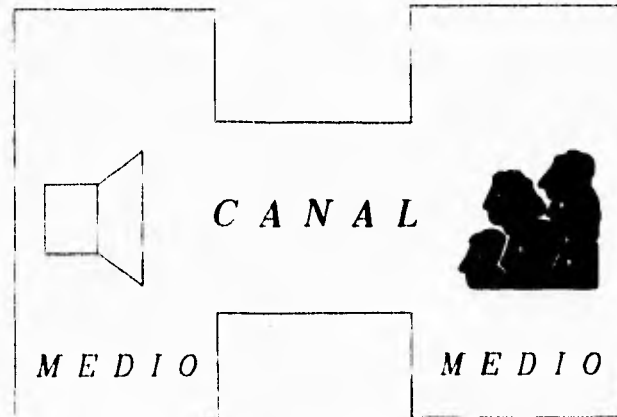
**inteligible** *adj. Que se puede comprender. //Que se oye clara y distintamente: sonido inteligible.*

Como se lee, el diccionario señala la claridad y consecuentemente la comprensión del sonido en general, pero no especifica que tipo de sonido; si, por ejemplo, el producido por el despegue de un avión ó el producido por un instrumento musical ó tal vez el producido por alguna fuente de ruido.

En esta tesis se considera al sonido producido por la voz humana durante un diálogo a través de un sistema de comunicación; así, en el transcurso de este trabajo cada vez que se haga referencia al término inteligibilidad, salvo que se especifique otro concepto, se referirá a la inteligibilidad del habla, de la voz, del diálogo ó de la palabra (del inglés *speech intelligibility*).

Como el significado que establece el diccionario es muy vago, la siguiente definición muestra el otro enfoque visto desde la acústica arquitectónica. Esta definición aparece en la norma estadounidense ANSI S3.2-1989: **[20]**

**Inteligibilidad.** *Es aquella propiedad que permite identificar las unidades del habla; la inteligibilidad del habla en un sistema de comunicación es la propiedad que permite a escuchas entrenados recibir e identificar un diálogo hablado por oradores entrenados cuando los oradores y los escuchas están conectados a través de un sistema de comunicación del habla (comúnmente un recinto).*



*Diagrama de bloques simplificado de un sistema de comunicación del habla.*

## **Introducción**

La comunicación a través del habla constituye una de las actividades primordiales del ser humano. En muchos casos esta comunicación se dificulta considerablemente por alteraciones nocivas que degradan el mensaje; dichas alteraciones pueden deberse a que el mensaje se haya emitido previamente con cierta degradación ó que el mensaje haya sido generado correctamente y en su camino al receptor a través de un sistema de comunicación, como un recinto ó por cableado telefónico, por ejemplo, lo enmascare una señal ajena que se agrupa bajo el nombre genérico de ruido (en este contexto, ruido es cualquier señal que degrade la transmisión del mensaje fuente) ó aún que el mensaje pudiera haberse deteriorado en algún punto de su recepción y en consecuencia sea mal interpretado.

El objetivo fundamental de esta tesis es el de evaluar la eficiencia de un recinto para la transmisión de la voz humana durante un discurso, es decir, ¿que tan bueno es el teatro, el auditorio ó alguna sala de conferencias para la transmisión de la voz? ó ¿cómo evaluar la degradación del mensaje fuente en un recorrido hasta un punto de recepción y con base a esta degradación que mejoras se pudieran acondicionar en el recinto medido para mejorar su inteligibilidad?

La utilidad de esta tesis es que mediante la instrumentación de un método de evaluación a través de una microcomputadora personal (IBM PC y compatibles), recurso comúnmente disponible, permitirá conocer el grado de inteligibilidad de un recinto. Con base a los resultados obtenidos se puede deducir el origen de la distorsión lo que ya es una ventaja para saber como acondicionarlo ó mejorarlo para incrementar la inteligibilidad.

Dentro del campo de la acústica, el problema de evaluar la eficiencia con que un recinto transmite la voz humana ya es muy conocido debido a que son muchos los ambientes en los que es necesario contar con una buena inteligibilidad, como es el caso de teatros, auditorios, salas de conferencia, etc. Los escuchas pueden tolerar problemas que estén asociados con la

respuesta en frecuencia -como algún ruido de interferencia ó aún la localización de la fuente sonora-. pero si el habla es difícil de entender las quejas no se harán esperar. Para cuantificar el grado de inteligibilidad en un recinto existen diversos métodos: el método de evaluación más inmediato consiste en la lectura de palabras sin sentido pero fonéticamente balanceadas, las que son escuchadas por un grupo de personas entrenadas y del número de palabras entendidas correctamente se deduce el grado de inteligibilidad.

A este método subjetivo se le conoce como *PRUEBA DE ARTICULACION*. Sin embargo, existe también otro método subjetivo denominado *PRUEBA DE INTELIGIBILIDAD*; la distinción entre un método y el otro radica en la forma en que se calificuen. Si el sentido del significado de la palabra, frase u oración es el de interés, a la prueba se le conoce como Prueba de Inteligibilidad, mientras que si se mide la eficiencia en la comunicación en términos de fonemas individuales ó sonidos aislados, la prueba es conocida como Prueba de Articulación. (17) págs. 67-68)

En la práctica, lo que una persona oye depende fuertemente de la forma en que la otra persona habla; por ejemplo los gestos que hace al hablar, sus señas, el tono de su voz, el que pronuncie ó no correctamente las palabras, etc. Además de esto también depende de lo que se está diciendo; si se desconoce el tema del que se esté hablando se dirá que no se entiende ó que no se oye ó más bien que no se reconoce tal ó cual palabra, por lo que esto conlleva a plantear la necesidad de controlar tres parámetros importantes: 1) la caracterización de la voz del orador, 2) el texto que el orador lea y, 3) que las personas que colaboren en las pruebas para evaluar un recinto tengan oídos sanos.

Como se puede observar, los parámetros involucrados en este tipo de pruebas no son fáciles de controlar. Por ejemplo, ¿cómo evitar que influya un amplio ó un reducido vocabulario?, es decir, ¿qué palabras ó sonidos individuales de palabras deben utilizarse para evitar este problema? Lo que se les ocurrió a varios investigadores fue crear listas con las palabras más frecuentes en su idioma ó listas de palabras formadas con las combinaciones de letras más

frecuentes; esto implica un amplio conocimiento del idioma de que se trate, es decir, un estudio de las palabras ó sonidos que más se hablen en un país por lo que se creó la necesidad de estudiar la frecuencia de aparición de cierto tipo de combinaciones de fonemas. ([4] Cap. I para el caso del idioma español)

Ahora, supóngase que de alguna manera se caracterizan los parámetros involucrados en la inteligibilidad y que se está en disposición de aplicar una prueba. ¿Cómo se puede saber qué tan válidos serían los resultados sin tener un punto de comparación? Para esta interrogante ya existen varios métodos objetivos que también permiten medir la inteligibilidad en recintos y de los cuales a dos de ellos se les ha probado ampliamente y han mostrado su exactitud: el cálculo del Índice de Articulación (AI - Articulation Index) y el del Índice de la Transmisión del Habla (STI - Speech Transmission Index); existe una versión rápida de este último denominado Índice Rápido de la Transmisión del Habla (RASTI - Rapid Speech Transmission Index), el cual es el más preciso y más fácil de usar en condiciones de campo y se emplea para reducir considerablemente el tiempo en los cálculos requeridos.

Los dos métodos objetivos descritos anteriormente son puramente instrumentales y pueden servir como estimadores ó predictores de las pruebas subjetivas para medir la inteligibilidad en recintos.

Una de las ventajas que presentan los métodos objetivos es que al depender de parámetros medibles objetivamente, como el tiempo de reverberación por ejemplo, se pueden indicar las condiciones del recinto que se pueden corregir. En este trabajo no se contempla la manera de medir dichos parámetros ni se indican los criterios para obtenerlos pero en su momento se señalará a la referencia correspondiente; también cabe mencionar que en el momento de realizar este trabajo, ya se habían llevado a cabo estudios del idioma español lo cual me permitió emplear uno de los métodos objetivos para compararlo, por vez primera en el campo de la investigación, con resultados subjetivos en español y no en inglés, que es el idioma original con el cual había sido probado ampliamente (una evaluación para varios lenguajes por

el método RASTI está ampliamente documentado en [9], en donde se utilizan los idiomas de países como Inglaterra, Finlandia, Francia, Alemania, Hungría, Italia, Holanda, Nueva Zelanda, Polonia, Suecia y Yugoslavia).

Ahora bien, el hecho de que se empleó un método objetivo para reemplazar a uno subjetivo no implica que se desechen los métodos subjetivos para medir la inteligibilidad, puesto que éstos son mucho más fáciles y rápidos de realizar además de que no dependen de instrumentos de medición.

En esta tesis se profundizará en el método objetivo denominado RASTI (por razones que se expondrán en el Capítulo 2), para el cual se desarrolló un modelo de aproximación basado en la técnica del trazo de rayos mediante un programa de computadora (realizado en lenguaje C), que permite predecir los índices STI que se obtendrían al aplicar éste método; también se comparan los resultados obtenidos con los índices STI medidos y los índices STI estimados ó predichos.

A continuación se describirá el contenido de este trabajo que además de esta introducción, se compone de cinco capítulos, un apéndice y la bibliografía:

El Capítulo 2 presenta los conceptos básicos dentro del área de la acústica que están involucrados en el desarrollo de este trabajo.

En el Capítulo 3 se describen los métodos subjetivos y objetivos más comunes para medir la inteligibilidad en recintos y se presentan las razones en la selección de uno de ellos (método RASTI, que por cierto ya se convirtió en norma internacional; se le conoce como IEC 268 PT 16-88 Sound System Equipment Part 16: The objective rating of speech intelligibility in auditoria by the RASTI method; first edition. 31 pp).

En el Capítulo 4 se presenta el análisis detallado de la función de transferencia de modulación, concepto a partir del cual se origina el método STI, y se incluyen además los cálculos necesarios.

El capítulo 5 describe en detalle el equipo de medición empleado y se muestran las conexiones efectuadas para llevar a cabo la instrumentación del método. También se resumen las características de construcción y de acondicionamiento para cada uno de los recintos seleccionados y finalmente se muestra el procedimiento de medición para la obtención de los índices STI usando el método RASTI.

Los resultados obtenidos así como las consideraciones, conclusiones y recomendaciones se presentan detalladamente en el Capítulo 6. En el Apéndice se resumen dos modelos de aproximación para la obtención de los índices de modulación así como la relación de la función de transferencia de modulación con la respuesta al impulso. Al final del Apéndice se indican todas las referencias consultadas en la elaboración de este trabajo, señalándolas como libros, artículos de revistas y normas.



# Capítulo

# 2

## FUNDAMENTOS FISICOS DEL SONIDO

### FUNDAMENTOS FISICOS DEL SONIDO

Definición de sonido .....	2-3
Rangos .....	2-3
Ruido .....	2-4
Intensidad .....	2-4
Niveles sonoros .....	2-5
Descripción de una señal en un espectro de frecuencias .....	2-8
El espectro sonoro .....	2-10
Espectro sonoro lineal .....	2-11
Espectro sonoro continuo .....	2-13
Sonidos de espectro continuo .....	2-13
La voz humana .....	2-15
El espectro del habla .....	2-15

La audición .....	2-17
Fisiología del oído humano .....	2-17
Umbral de audición .....	2-20
Enmascaramiento .....	2-22
Sonoridad y nivel de sonoridad .....	2-23
Evaluación del ruido (parámetros empleados en la evaluación del ruido) .....	2-25
Nivel sonoro ponderado en A .....	2-25
Nivel de presión sonora equivalente continuo con ponderación en A ( $L_{Aeq}$ ) .....	2-26
Conceptos básicos de la acústica de recintos .....	2-29
Fuente de sonido .....	2-29
Monopolo ó fuente omnidireccional .....	2-29
Factor de directividad .....	2-30
Fenómenos de interacción entre la onda sonora y el medio .....	2-31
- Absorción .....	2-31
- Transmisión .....	2-32
- Reflexión .....	2-32
Eco .....	2-33
Reverberación .....	2-33
Tiempo de reverberación ( $T_{60}$ ) .....	2-33
Tiempo de reverberación según Sabine .....	2-33
Coeficiente de absorción .....	2-34
Relación entre $T_{60}$ e inteligibilidad .....	2-35

## FUNDAMENTOS FISICOS DEL SONIDO

### Definición de sonido

Se define el sonido como la vibración mecánica de un medio gaseoso, líquido ó sólido (medio elástico) a través del cual la energía se transfiere fuera de la fuente por ondas sonoras progresivas las cuales pueden ser percibidas por el oído humano ó detectadas por instrumentos. Cada vez que un objeto se mueve o vibra, una pequeña proporción de la energía involucrada se pierde en el medio ambiente como sonido. Como todos los fenómenos ondulatorios, el sonido tiene características mensurables y varias propiedades asociadas a estas; en consecuencia el sonido tiene amplitud, longitud de onda, frecuencia, período y velocidad de propagación.

### Rangos

El estudio del sonido lo podemos clasificar en tres grandes grupos: infrasonido, rango audible y ultrasonido; el rango audible (suponiendo el oído humano en buenas condiciones) abarca desde los 20 Hz hasta los 20 kHz, aproximadamente. La figura 2.1 lo ilustra.



Fig. 2.1. Límites aproximados para los rangos audibles de diferentes mamíferos y rangos de frecuencia de diferentes fuentes de sonido

## Ruido

El ruido es un sonido indeseado; es una señal sonora que interfiere a otra evitando una recepción clara y nítida. Desde el punto de vista psicoacústico, el ruido es una señal sonora que provoca malestar y hasta dolor, inclusive, en un escucha. También se define como "un sonido aleatorio compuesto de muchas frecuencias diferentes no relacionadas armónicamente. Si el ruido tiene una intensidad demasiado elevada impedirá la inteligibilidad del habla y de la música, reduciendo el placer del escucha" (Gutierrez, R. A. **"Tesis: Instrumentación de un método para medir potencia sonora en una cámara reverberante"**, Cap. 1, pág. 5).

## Intensidad

La intensidad (conocida también como intensidad acústica) es la razón de cambio del flujo de energía a través de una superficie unitaria, perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Sus unidades en el SI son  $W/m^2$ . Al desglosar estas unidades, se tiene que  $[W/m^2] = [N \cdot m \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}]$ . La intensidad acústica es diferente para varios tipos de campos acústicos.

Para un campo libre en el cual la onda sonora llega únicamente de la dirección de la fuente:<sup>1</sup>

$$I = \frac{p^2_{rms}}{\rho c^2}$$

Para un campo difuso, tal y como ocurre en un recinto reverberante ideal, en el cual existe igual probabilidad de incidencia de sonido en cualquier dirección, la intensidad neta es cero; sin embargo, la intensidad de sonido que pasa a través de un sólo lado de un plano de área unitaria es:

---

<sup>1</sup>La deducción de ésta y muchas otras ecuaciones que se verán posteriormente en este trabajo, se hacen a partir de la ecuación de onda en base a la presión sonora, por lo que sugiero consultar la referencia [6] en la bibliografía para seguir detalladamente la secuencia matemática.

$$I = \frac{p_{rms}^2}{4\rho c}$$

en donde:  $p_{rms}$  es la presión acústica eficaz.

$\rho$  es la densidad del medio ( $\rho_{aire} = 1.2 \frac{Kg}{m^3}$ )

$c$  es la velocidad del sonido en el medio ( $c_{aire} = 340 \frac{m}{s}$ )

Al producto  $\rho c$  se le conoce como impedancia característica

(para el aire, a 20° C,  $\rho c = 408 \frac{Kg}{m^2 s}$ )

### Niveles sonoros

Normalmente se acostumbra expresar la presión en Pascales, dinas/cm<sup>2</sup> ó bares, pero cuando hablamos del rango de presión acústica que somos capaces de percibir, nos encontramos con que es demasiado amplio tal y como lo muestra la Tabla 2.1:

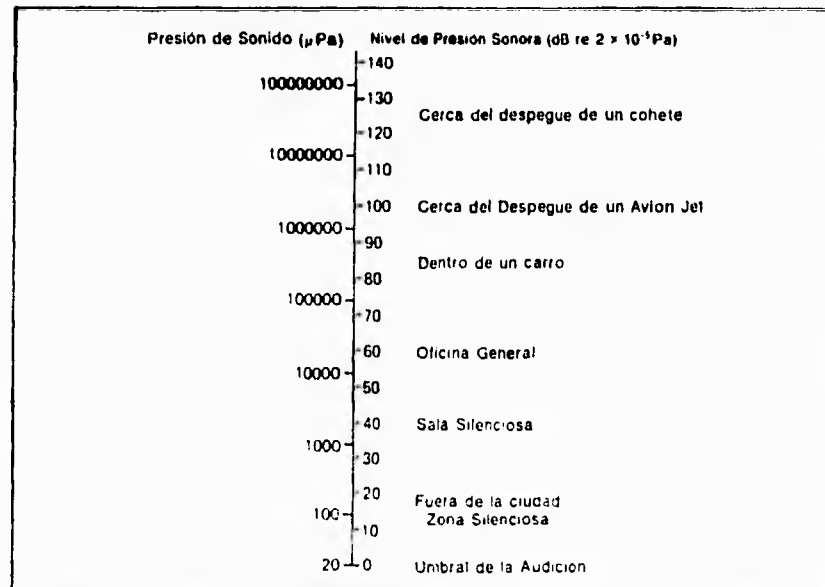


Tabla 2.1. Algunos niveles de presión sonora típicos.

2-6

Observando la tabla nos damos cuenta de que podemos oír niveles de presión sonora que van desde los 20  $\mu\text{Pa}$  (debido a que esta cantidad es la mínima presión sonora que puede percibir el oído humano, se elige como presión de referencia para determinar niveles de presión sonora) hasta los 100 Pa aproximadamente.

Entonces, para expresar este amplio rango de valores, se ha visto que es conveniente hacerlo empleando una escala logarítmica, y una forma de lograr esto es usando el decibel (dB).

Un decibel (dB) es la razón de energía, potencia ó intensidad que cumple con la siguiente definición:

$$\text{Log } R = \frac{1}{10}$$

Para expresar una relación en decibeles (dB), primero debemos escoger un valor de referencia y luego aplicar la definición:

$$\text{Nivel en dB} = 10 \text{ Log} \left( \frac{\text{cantidad}}{\text{cantidad de referencia}} \right)$$

Supongamos que queremos expresar una relación de intensidades en dB; en este caso se tendrá:

$$L_I = 10 \text{ Log} \frac{I}{I_0}$$

donde :  $L_I = \text{Nivel de Intensidad.}$

$I = \text{Intensidad.}$

$I_0 = \text{Intensidad de referencia.} \left( 1 \times 10^{-12} \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2} \right)$

Como se mencionó anteriormente, la intensidad acústica para una onda progresiva libre (es decir, una onda que se propaga en el aire libre y en un medio sin fronteras) es:

$$I = \frac{\dot{p}^2}{\rho c} \left[ \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2} \right]$$

donde :  $p$  = presión eficaz  
 $\rho$  = densidad del medio.  
 $c$  = velocidad del sonido.

Reemplazando en la definición anterior se tendrá:

$$L_p = 10 \text{ Log } \frac{\dot{p}^2}{p_o^2} = 20 \text{ Log } \frac{p}{p_o}$$

donde :  $p_o$  es la presión de referencia. (20  $\mu\text{Pa}$ )

Se puede ver que al nivel de intensidad anterior le corresponde un nivel de presiones; este nivel tomará el nombre de nivel de presión sonora  $L_p$  y quedará definido como:

$$L_p = 20 \text{ Log } \frac{p}{p_o}, \quad \text{donde : } p_o = 20 \mu\text{Pa}.$$

Es conveniente aclarar que la definición de decibel es una sola y que el número 20 que aparece en la expresión de  $L_p$  es sólo una consecuencia matemática.

Habiendo llegado a este punto, es conveniente volver a dar una mirada a la tabla 2.1. Se puede observar claramente la ventaja de expresar la presión en decibeles puesto que los números son más pequeños y manejables.

Siempre que se esté trabajando con cantidades expresadas en decibeles, se deben de tener en cuenta varios factores importantes. Por ejemplo, un nivel de cero decibeles no significa una ausencia de ruido, sólo implica que el nivel en cuestión es igual al nivel de referencia. Otro de los hechos más importantes y uno de los que debe estar claramente entendido en las mediciones del control de ruido, es que debido al uso de las unidades logarítmicas, la suma y resta convencionales no pueden emplearse directamente en cantidades que estén expresadas en

decibeles. Por ejemplo, supongamos que se tienen dos fuentes sonoras, cada una produciendo un nivel de presión sonora de 60 dB; cuando éstas sean medidas por separado, no producirán 120 dB si emiten al mismo tiempo.

Para obtener el nivel correcto se deben de considerar las dos presiones sonoras instantáneas de las dos fuentes en un punto en el espacio. En este caso no necesitamos encontrar las presiones sino sus razones a la presión de referencia; también es importante asumir que las ondas sonoras de las dos fuentes sonoras tienen diferentes frecuencias. La razón de la presión sonora cuadrática media cuando la fuente 2 se combina con la fuente 1 es

$$\left(\frac{p_r}{p_{ref}}\right)^2 = \left(\frac{p_1}{p_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{p_2}{p_{ref}}\right)^2$$

$$\text{con } \left(\frac{p_1}{p_{ref}}\right)^2 = \text{antilog} \frac{Lp_1}{10}, \text{ y } \left(\frac{p_2}{p_{ref}}\right)^2 = \text{antilog} \frac{Lp_2}{10}$$

### Descripción de una señal en un espectro en frecuencias

Como trabajar las formas de onda descritas en función del tiempo es una labor muy complicada, se acostumbra descomponer la onda en sus componentes senoidales (armónicas) y al hacerlo de esta manera se estará trabajando en el dominio de la frecuencia.

La figura 2.2 muestra una onda periódica no armónica y, en este caso, para hablar de frecuencias será necesario descomponerla en sus armónicas; la figura 2.3 muestra a la misma onda a la que se le han superpuesto las dos armónicas que la conforman.

Una forma más simple de expresar lo mismo es hacerlo en función de la frecuencia; a este tipo de gráfico se le conoce como **espectro en el dominio de la frecuencia**. La figura 2.4 muestra la relación que existe entre ambas formas de describir una onda.



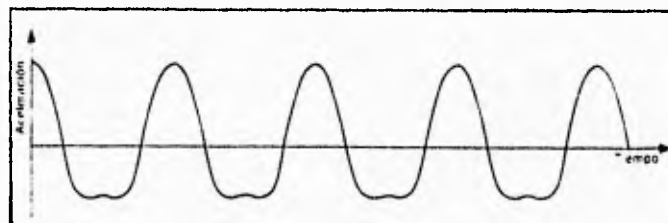


Fig. 2.2. Forma de onda no armónica.

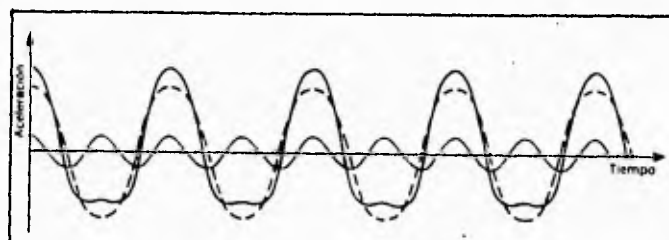


Fig. 2.3. Ilustración de como la onda de la figura 2.2 puede descomponerse en la suma de dos senoidales relacionadas armónicamente.

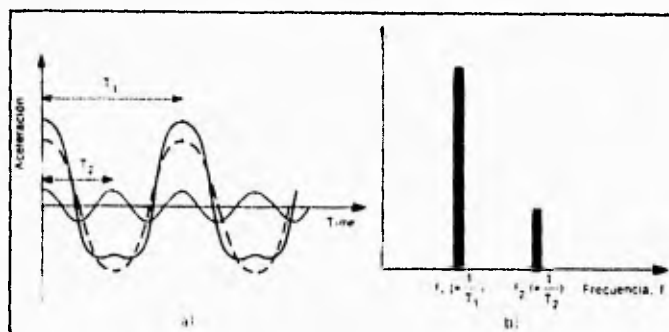
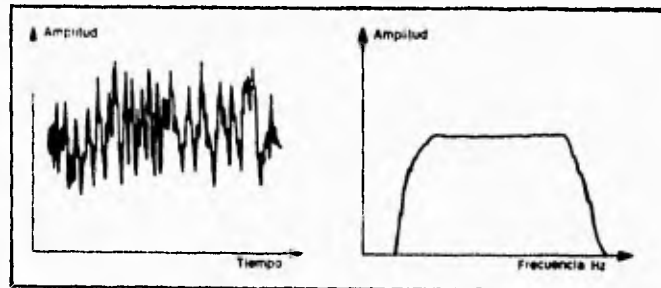


Fig. 2.4. Ilustración de como la señal de la figura 2.2 puede ser descrita en términos de un espectro de frecuencias:

- a) Descripción en el dominio del tiempo
- b) Descripción en el dominio de la frecuencia

Conforme la onda se hace más y más compleja, el espectro se va haciendo más y más denso hasta hacerse continuo como lo muestra la figura 2.5:



*Fig. 2.5. Una señal compleja en el tiempo tiene un espectro continuo en el dominio de la frecuencia.*

### **El espectro sonoro**

Los sonidos fuera del laboratorio raramente son tonos puros; dichos sonidos pueden ser una combinación de tonos puros cuyas frecuencias estén relacionadas armónicamente, tales como las producidas por un instrumento musical, ó pueden ser ruido.

La composición del ruido ó de un tono musical se determina por un análisis espectral (análisis en frecuencias) y por este análisis se determina la presión cuadrática media ó el nivel de presión sonora de una onda sonora en cada banda de un conjunto de bandas de frecuencia contiguas y se grafica como función de la frecuencia central de la banda. Las bandas empleadas para el análisis pueden ser del mismo ancho ó pueden tener anchuras que sean proporcionales a las frecuencias centrales de sus respectivas bandas, ó tal vez puedan obedecer a alguna otra relación. El ancho de banda normalmente se elige para ser tan angosto como sea necesario, siempre y cuando proporcione un análisis satisfactorio para el procedimiento en cuestión. Por ejemplo, los instrumentos empleados para medir la distribución del sonido sobre el rango de frecuencias audible se les conoce como *analizadores de espectros*. El analizador de espectros de uso común divide el rango de frecuencias audible en bandas que tienen un ancho de una octava (una octava es un intervalo de frecuencias entre dos sonidos cuya razón de frecuencias es 2, por ejemplo de

707 a 1414 Hz) ó bien tienen un ancho de una tercia de octava, que se emplea cuando sea requerida una información más detallada (ver Tabla II).

En muchos trabajos de control de ruido las fases relativas entre las componentes de algún ruido no son importantes, de tal manera que se obtiene la información necesaria (en amplitud) a partir de una gráfica que tiene una de las formas de la figura 2.6.

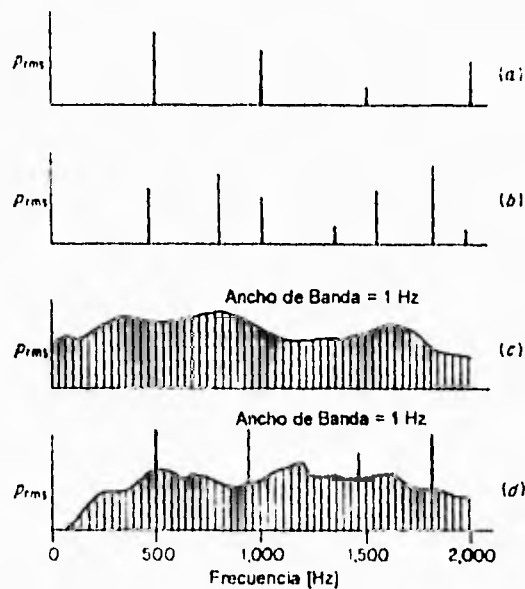


Fig. 2.6. (a) Espectro lineal relacionado armónicamente; (b) espectro lineal no relacionado armónicamente; (c) espectro continuo; (d) combinación de un espectro lineal y continuo (espectro complejo).

### Espectro sonoro lineal

La gráfica superior (a) de la figura 2.6 muestra el espectro de presión sonora rms de un grupo de cuatro componentes relacionados armónicamente con una frecuencia fundamental de 500 Hz. A esta gráfica se le conoce como espectro lineal.

Banda N°	Frecuencia Hz		
	Central	Inferior	Superior
12	16 (-)	14.0	18.0
13	20	18.0	22.4 (-)
14	25	22.4 (-)	28.0
15	31.5 (-)	28.0	35.5
16	40	35.5	45 (-)
17	50	45 (-)	56
18	63 (-)	56	71
19	80	71	90 (-)
20	100	90 (-)	112
21	125 (-)	112	140
22	160	140	180 (-)
23	200	180 (-)	224
24	250 (-)	224	280
25	315	280	355 (-)
26	400	355 (-)	450
27	500 (-)	450	560
28	630	560	710 (-)
29	800	710 (-)	900
30	1.000 (-)	900	1.120
31	1.250	1.120	1.400 (-)
32	1.600	1.400 (-)	1.800
33	2.000 (-)	1.800	2.240
34	2.500	2.240	2.800 (-)
35	3.150	2.800 (-)	3.550

Tabla 2.11 Frecuencias Centrales, Inferiores y Superiores para bandas por 1/3 de octava.

(-) Significa también una cantidad apropiada para una banda por octava. La banda por octava de 1.000 Hz, por ejemplo, tiene una frecuencia inferior de 710 Hz y una frecuencia superior de 1.400 Hz.

La combinación (suma) de un número de ondas no relacionadas armónicamente (figura 2.6 *(b)*) produce una onda resultante que no es armónica. Se puede estimar la amplitud de dicha onda mediante un análisis estadístico.

### **Espectro sonoro continuo**

Un tipo de sonido muy común es el que está formado por componentes continuos tales como el ruido producido por el escape del motor de un jet ó por el silbido del aire. Para producir tal ruido a partir de tonos puros se requeriría de un número infinito de ondas.

Un ejemplo de un espectro continuo se muestra en la gráfica *(c)* de la figura 2.6. Cuando éste se combina con un espectro lineal, se produce un espectro complejo del tipo mostrado en la misma figura. *(d)*.

### **Sonidos de espectro continuo**

Muchos sonidos son de espectro continuo; cuando se trata con este tipo de sonidos se acostumbra considerar a la presión sonora cuadrática media en una banda de frecuencias dada. Tal banda de frecuencias puede dividirse en un número dado de incrementos y una presión cuadrática media puede asignársele a cada incremento. Debido a que ninguno de estos dos incrementos tiene la misma frecuencia, las contribuciones incrementales se combinan como tonos puros de diferentes frecuencias. Por lo tanto la presión cuadrática media total se determina sumando los valores apropiados de la presión cuadrática media para los incrementos individuales de frecuencia ([3] pág. 42).

Así, la presión cuadrática media para una banda de frecuencias compuesta de un número de sub-bandas es:

$$\dot{p}_{\text{banda}}^2 = \dot{p}_a^2 + \dot{p}_b^2 + \dot{p}_c^2 + \dot{p}_d^2 + \dots$$

donde:  $\dot{p}_a^2, \dot{p}_b^2$ , etc. son las presiones cuadráticas medias para las sub-bandas.

Un caso de especial interés ocurre cuando cada sub-banda tiene un ancho de 1 Hz. Si la presión cuadrática media (ó el nivel de presión sonora) para las sub-bandas es  $\dot{p}_1^2$  (donde  $\dot{p}_1^2$  es el promedio de todas las presiones que pertenecen a todas las sub-bandas), entonces la presión cuadrática media para la banda superior es

$$p_{\text{banda}}^2 = \dot{p}_1^2 \Delta f$$

donde:  $\Delta f$  es el ancho en Hertz de la banda superior.

Expresado en decibeles, el nivel de presión sonora re  $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$  es

$$L_{p_{\text{banda}}} = 10 \text{ Log } \frac{p_{\text{banda}}^2}{p_{\text{ref}}^2} = 10 \text{ Log } \frac{\dot{p}_1^2}{p_{\text{ref}}^2} + 10 \text{ Log } \frac{\Delta f}{(\Delta f)_0}$$

ó

$$L_{p_{\text{banda}}} = L_{p_1}(f) + 10 \text{ Log } \Delta f \quad \text{dB re } 2 \times 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

donde:  $L_{p_1}(f)$  es el nivel espectral (dB re  $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ) en la frecuencia  $f$ .  
 $(\Delta f)_0$  es igual a 1 Hz.

En otras palabras, el nivel espectral es el nivel promedio de presión sonora (para una componente de un ancho de banda de 1 Hz) al cual cuando se le suma  $10 \text{ Log } (\Delta f/1.0)$  produce el nivel de presión sonora de la banda superior. El nivel espectral  $L_{p_1}(f)$  raramente se mide con un analizador de ancho de banda unitario, más bien se determina a partir de  $L_{p_{\text{banda}}}$  por:

$$L_{p_1}(f) = L_{p_{\text{banda}}} - 10 \text{ Log } \Delta f \quad \text{dB re } 2 \times 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

### **La voz humana**

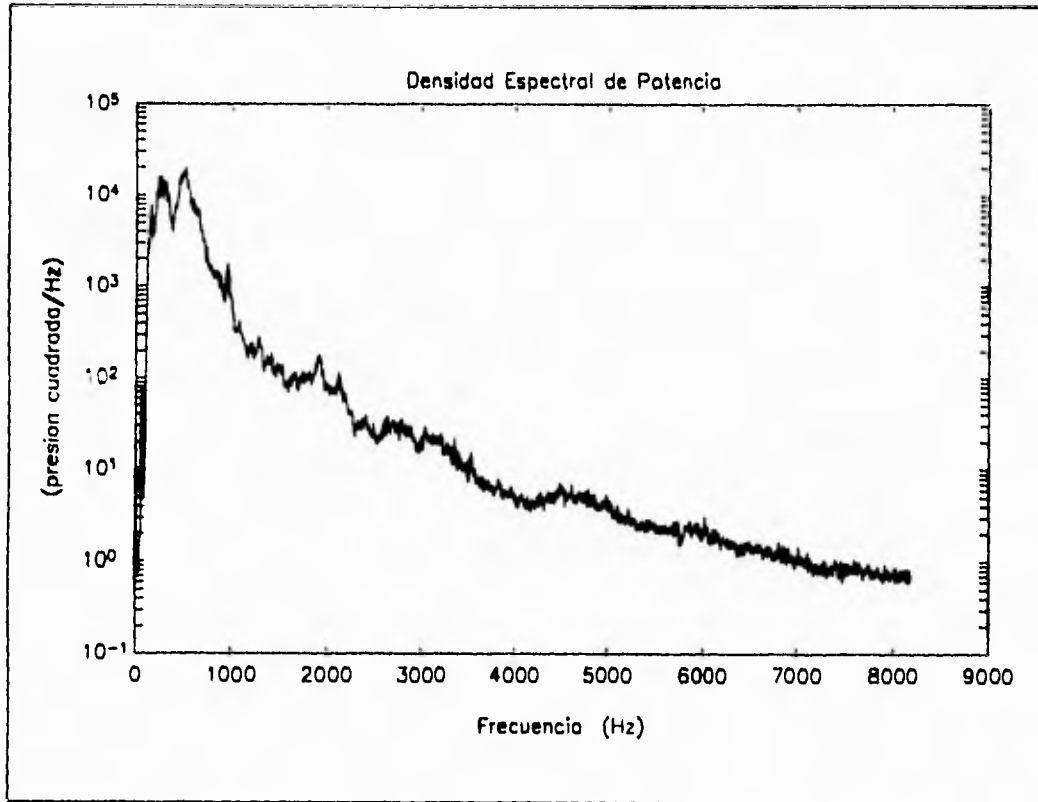
Cuando una persona habla, el aire frente a sus labios se comprime y se expande inmediata y alternativamente por lo que la presión del aire se incrementa ó decrementa en una cantidad medible con respecto a la presión atmosférica de la zona. Este "exceso de presión" produce una onda sonora viajera cuya amplitud decrece por un factor a la mitad (6 dB) conforme se duplique la distancia siempre y cuando se asuma que no existan pérdidas en el aire ó en las superficies limitantes. La manera en la cual se produce la voz es muy complicada debido a que involucra el uso coordinado de pulmones, cuerdas vocales y conductos resonantes en la garganta, boca y nariz. Muchos músculos cooperan en el proceso, incluyendo aquellos involucrados en el cambio constante de las características resonantes del sistema a través del posicionamiento de la lengua, paladar, mejillas, labios y dientes.

### **El espectro del habla**

El habla es una sucesión de pronunciaciones que produce una onda y en el que las frecuencias y las amplitudes cambian rápidamente con el tiempo. La voz humana (15 voces femeninas y 15 voces masculinas mezcladas) tiene en promedio una densidad espectral de potencia -en bandas por octavas- que alcanza su valor pico en 500 Hz y decae a una razón de 8 dB/octava a partir de los 1000 Hz (figura 2.7). Se ha mostrado también que en altas frecuencias la voz es direccional, es decir, la distribución de energía alrededor de un orador no es uniforme ([1] pág. 407). Mediciones hechas por los Laboratorios Bell así como las pruebas reportadas por French y Steinberg<sup>2</sup> indican que el rango dinámico útil de la voz en cada banda de frecuencias es 30 dB y que la información en la voz está contenida en el intervalo de frecuencias desde 200 Hz hasta 6 kHz aproximadamente (la voz humana tiene un espectro en frecuencias de banda ancha).

---

<sup>2</sup>N. R. French y J.C. Steinberg, "Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds", *J. Acoust. Soc. Amer.* 19, 90-119 (1947).



*Fig. 2.7. Gráfica **Densidad Espectral de Potencia vs. Frecuencia**; 30 voces (15 masculinas y 15 femeninas) fueron seleccionadas de una muestra de grabaciones y fueron mezcladas. Dicha mezcla fue digitalizada (frecuencia de muestreo: 16,390 Hz) y almacenada en computadora. Unidades: [Pa<sup>2</sup>/Hz]*

Cada sílaba de una palabra dura casi 1/8 de segundo y el intervalo promedio entre sílabas es de 1/10 de segundo ([1] pág. 407). Algunos sonidos como las vocales, por ejemplo, se producen en las cuerdas vocales mientras que otros son producidos por los ruidos del movimiento del aire a través de boca, lengua y labios. El espectro de frecuencias de cada tipo de sonido está formado por las cavidades resonantes formadas por garganta, boca, dientes y labios.



Los sonidos de las vocales no son tan críticos a la inteligibilidad del habla como los sonidos de las consonantes, ya que estos últimos son muy débiles y por lo tanto son muy fáciles de enmascarar por el ruido. Algunos lenguajes, como el hebreo por ejemplo, no incluyen vocales sino consonantes.

## La audición

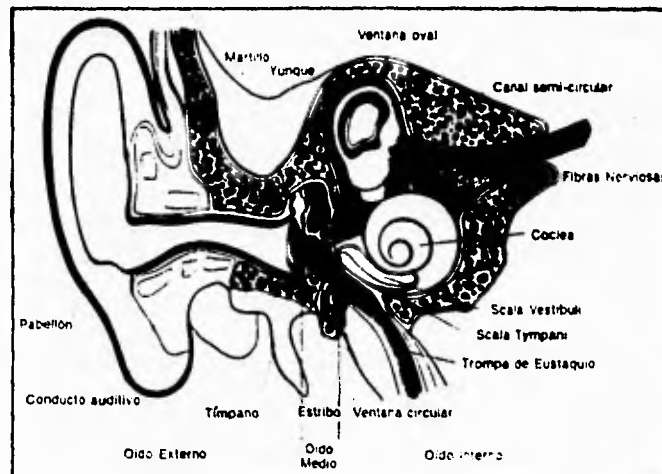
### Fisiología del oído humano (5)

*"Las propiedades del oído humano son fenomenales. El oído es capaz de responder en un rango de frecuencias desde 20 Hz hasta 20 kHz aproximadamente, y en 1 kHz puede detectar sonidos que desplazan el tímpano una décima parte del diámetro de la molécula de hidrógeno". (16, p. 257)*

Oír es necesario para muchas cosas deseables: para comunicarse, para disfrutar la música ó para localizar fuentes sonoras, así como para detectar el medio a través del cual recibimos algún tipo de ruido indeseable. Desde tiempos muy remotos, el hombre ha ido evolucionando en medios hostiles que le obligan siempre a estar pendiente de todo lo que le rodea, motivo por el cual ha ido desarrollando cada uno de sus sentidos y especialmente el del oído, que le ayuda a percibir de una manera más clara el medio en donde se encuentre; por este motivo el rango de frecuencias de nuestra voz (200-6.000 Hz) es menor que el de nuestro oído (20-20.000 Hz) ([1] pág. 407).

La recepción y análisis del sonido es un proceso complicado el cual aún no está completamente entendido, y el oído mismo es un instrumento complejo capaz de discriminar bastante bien un amplio rango de frecuencias e intensidades sonoras.

El oído humano consiste de tres partes: el oído externo, el oído medio y el oído interno (ver figura 2.8). El oído externo está conformado por el pabellón de la oreja y el canal auditivo. El pabellón de la oreja es pequeño comparado con las longitudes de onda del sonido (por este motivo presenta un efecto direccional pobre). En la percepción de altas frecuencias tanto la cabeza como el pabellón del oído y el torso tienen importancia en la localización de fuentes sonoras ubicadas en los planos frente-arriba-atrás.



*Fig. 2.8. Las partes principales del oído.*

La función del oído externo es recepcionar y canalizar la onda incidente recibida hasta el tímpano, membrana que está unida a tres huesecillos -martillo, yunque y estribo-, conjunto que conforma el oído medio. Es importante mencionar que el oído está comunicado con la cavidad bucal a través de la trompa de Eustaquio, conducto que nos permite igualar la presión que actúa sobre el tímpano en caso necesario (en un avión, por ejemplo).

Los tres huesecillos actúan como un acoplador de impedancia, ó sea un adaptador de impedancia entre el oído externo y el oído interno: esta adaptación es necesaria pues cuando a través de los huesecillos la onda incidente llega al oído interno vía ventana oval tendrá que

propagarse en un medio líquido. Además de la función mencionada anteriormente, los huesecillos tienen una segunda función que es la de proteger de daños al oído interno en presencia de niveles de sonido peligrosos (los huesecillos se desvían lateralmente).

Finalmente se encuentra el oído interno conformado por la ventana oval y la cóclea. Al vibrar la ventana oval por acción de los huesecillos, se provoca que la onda de sonido se propague a través del fluido que contiene la cóclea; ésta se encuentra dividida en dos partes por la membrana basilar donde se encuentran distribuidos los sensores del sonido, los que a su vez están conectados a las terminales nerviosas; estos sensores son capaces de discriminar las diferentes frecuencias que conforman la onda. Aún existe, en un mecanismo más de defensa, la ventana circular la cual disipa, vibrando, el exceso de presión que pueda existir en la cóclea.

La figura 2.9 ilustra con un esquema las diferentes partes del oído en donde además se muestran las zonas de detección de las distintas frecuencias.

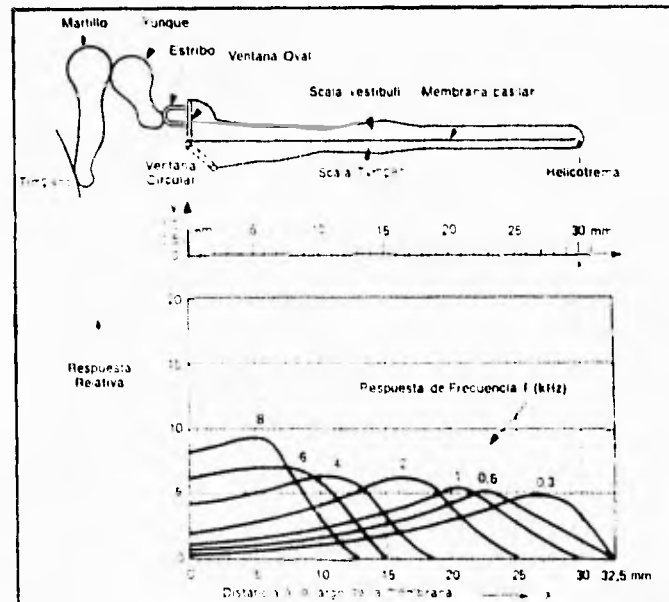
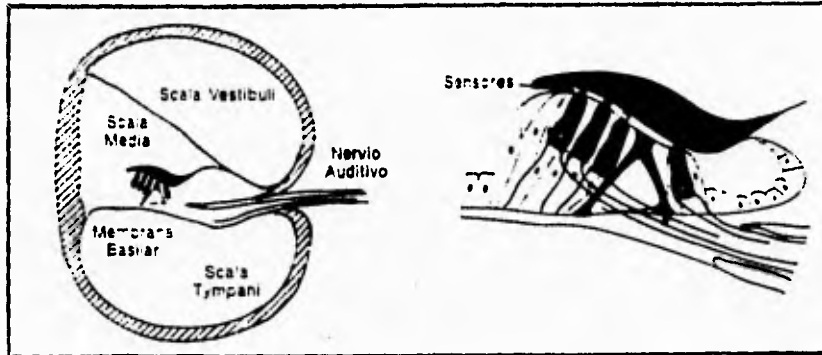


Fig. 2.9. Sección longitudinal de la cóclea en donde se muestran las zonas de respuesta máxima.

La figura 2.10 muestra un corte de una parte de la cóclea en donde se pueden apreciar los sensores y las terminales nerviosas.



*Fig. 2.10. Sección transversal de la cóclea.*

Desafortunadamente no existe una relación simple entre el nivel de presión sonora medible y la percepción humana del mismo sonido. La sonoridad de un tono puro de nivel sonoro constante, que es quizás la señal acústica más simple de todas, varía con su frecuencia; asimismo la de un pulso corto varía con su duración aunque la presión sonora puede ser la misma en ambos casos. El estudio del ruido y sus efectos es un problema complicado del cual deben de considerarse una gran variedad de parámetros para asegurar una buena correlación entre las mediciones y la percepción ó reacción humana resultante.

#### **Umbral de audición**

El nivel de presión sonora más bajo de una frecuencia particular que puede ser escuchado por el oído es una característica individual que depende del escucha así como de su edad. Cuando un nivel de referencia específico (*re*) se expresa como el mínimo nivel de presión sonora audible, se le considera como umbral de audición.

El umbral de audición se muestra en la figura 2.11. Aquí se puede observar la región de la sensibilidad auditiva, que es en donde caen todos los sonidos que se puedan catalogar como provechosos. En la parte más baja se encuentra el umbral de audición para personas sin defectos auditivos ([2] pág. 195).

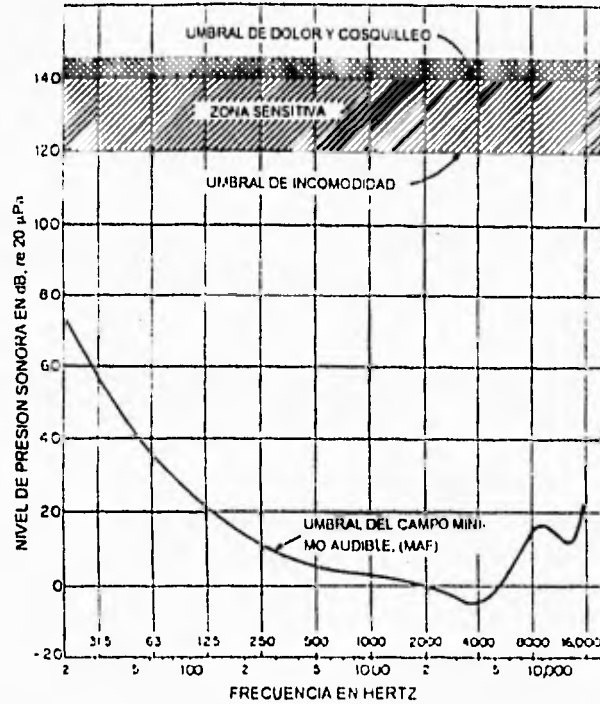


Fig. 2.11. El área de la sensibilidad auditiva. Los límites superiores están definidos por el umbral de incomodidad, de sensibilidad, y de dolor y cosquilleo. El límite inferior es el umbral mínimo audible (minimum audible field, MAF).

En la parte alta de la figura, tres umbrales están asociados con sonidos fuertes. El umbral de incomodidad ocurre cuando el escucha diga algo parecido a "esto suena muy fuerte, bájale el volumen". Entre 120 y 140 dB la incomodidad se incrementa con una sensibilidad tal que el sonido se "siente" en el oído. Después de 140 dB, el oído experimenta dolor y cosquilleo.

### **Enmascaramiento**

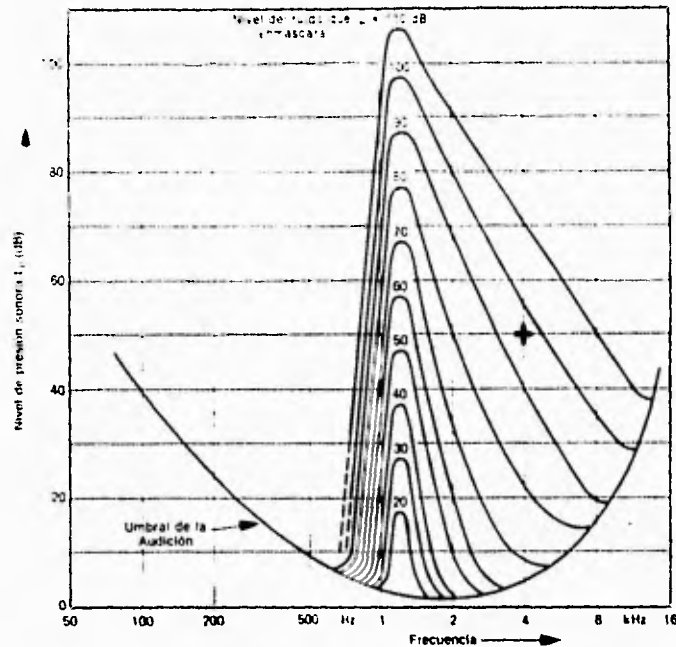
En la vida diaria es muy común que no estemos expuestos a un solo tipo de sonido a la vez sino a varios simultáneamente.

Cuando, por ejemplo, nos encontramos hablando con otra persona y de pronto un ruido impide que entendamos con claridad, entonces diremos que el ruido ha enmascarado nuestra conversación.

Mucho se ha investigado al respecto, pues las características del sonido enmascarado y el que enmascara son muy diversas. Como resultado de dichas investigaciones se puede concluir que:

- a) Un ruido de banda angosta produce más enmascaramiento que un tono puro de la misma intensidad y centrado a la misma frecuencia.
- b) A bajos niveles, el enmascaramiento queda restringido a una banda angosta alrededor de la frecuencia central del ruido que enmascara, y conforme se incrementa el nivel del ruido que enmascara, se incrementará el ancho de banda sobre el cual tiene efecto.
- c) El efecto de enmascaramiento no es simétrico alrededor de la frecuencia central del ruido que enmascara; las frecuencias mayores que la frecuencia central serán enmascaradas con mayor facilidad que las frecuencias menores.

La figura 2-12 ilustra las conclusiones anteriores gráficamente; se puede observar que al producirse un enmascaramiento en realidad se está produciendo un corrimiento del umbral de la audición en un determinado ancho de banda.



*Fig. 2.12. Efecto de enmascaramiento a varios niveles de un ruido de banda angosta centrado a 1200 Hz. Un tono de 4 kHz a 50 dB (marcado con +) puede oírse si el nivel del ruido que enmascara es 90 dB, pero éste será enmascarado si el nivel sube a 100 dB.*

### Sonoridad y nivel de sonoridad

A la fecha, se han llevado a cabo innumerables experimentos con el afán de investigar cómo responde el oído humano a los diferentes niveles de presión sonora. Se ha experimentado con tonos puros y ruido de distintos anchos de banda, así como en distintos ambientes.

La sonoridad es una cantidad subjetiva; se define como la característica de la sensibilidad auditiva en términos de cuales sonidos pueden ser ordenados en una escala que va de "suave" a "fuerte". La sonoridad es, principalmente, una función del nivel de presión sonora, pero también depende de la frecuencia y de la composición del sonido. El rango de la sonoridad se divide subjetivamente en unidades iguales llamadas *SONES*.

La sonoridad de un sonido de un nivel de presión sonora dado y en una frecuencia dada, puede ser muy diferente de la sonoridad de un sonido del mismo nivel y en una frecuencia diferente. No obstante, los escuchas pueden ajustar el nivel de un tono para marcar la sonoridad de otro, y normalmente se obtiene un acuerdo satisfactorio entre observadores. Tales experimentos proveen una escala objetiva útil de sonoridad, llamada nivel de sonoridad. El nivel de sonoridad de un tono (en *FONES*) es numéricamente igual al nivel de presión sonora de un tono de 1000 Hz el cual *suenan igual de fuerte*. La figura 2.13 muestra un conjunto de curvas denominado *de igual sonoridad*: las curvas mostradas expresan desde el punto de vista subjetivo como varía la sonoridad de un tono puro con la frecuencia. Los números en los contornos indican los niveles de sonoridad en fones. Estos contornos se obtuvieron bajo condiciones de campo libre, y la ordenada de la curva es el nivel de presión sonora en campo libre.

Para su trazado, se ajusta la sonoridad de un tono de una determinada frecuencia hasta que tenga la misma sonoridad que un tono de 1000 Hz tomado como referencia. Este proceso se repite bajo condiciones especiales hasta conseguir la familia de curvas mostradas a continuación:

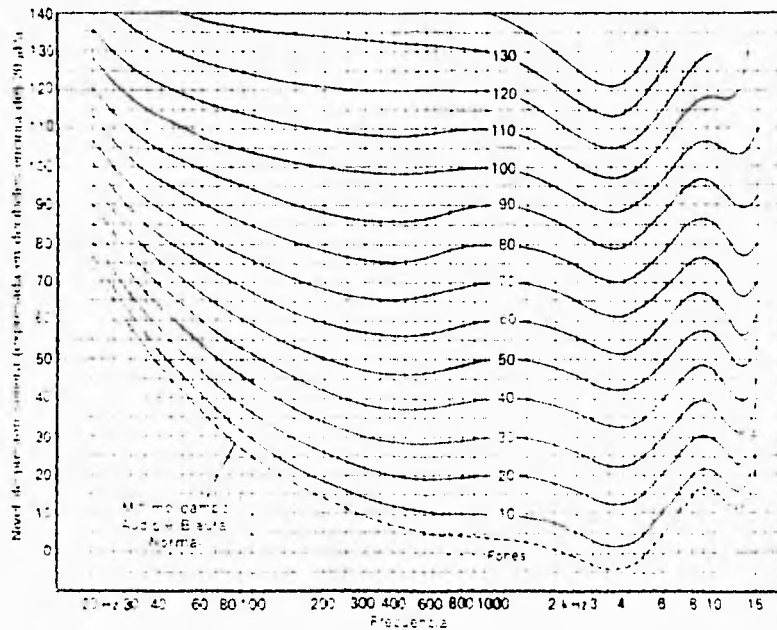


Fig. 2.13. Contornos normales de igual sonoridad para tonos puros.



La menor presión que el oído humano puede percibir es de  $20 \mu\text{Pa}$ , valor que ha sido adoptado como referencia. Para tener una idea de la sensibilidad del oído diremos que la presión atmosférica es de aproximadamente  $1 \times 10^{11} \mu\text{Pa}$  y que una presión de  $20 \mu\text{Pa}$  corresponde, a la frecuencia de  $1000 \text{ Hz}$ , a un desplazamiento de las moléculas del aire del orden de  $0.1 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-8} \text{ m}$ ).

Observando la familia de curvas de la figura 2.13 podemos notar que, en general, el oído percibe sonidos de bajas y altas frecuencias con más dificultad que los sonidos de medias frecuencias aunque se puede apreciar como las curvas se hacen más uniformes conforme el nivel del sonido sube, lo cual quiere decir que la respuesta en frecuencia del oído se hace más uniforme.

### **Evaluación del ruido (parámetros empleados en la evaluación del ruido)**

#### **Nivel sonoro ponderado en A**

La respuesta del oído humano no es lineal ni en la percepción de los niveles de presión ni en la percepción de frecuencias (el oído no tiene una respuesta de frecuencia plana), por lo que a un incremento de nivel de presión sonora (nivel de sonoridad) de  $10 \text{ dB}$  corresponderá un incremento de sonoridad del doble. Por lo tanto, cuando se quiera evaluar el nivel global de un determinado ruido, generalmente será necesario *ponderar* la respuesta en frecuencia del instrumento empleado.

Inicialmente, se definieron las ponderaciones (A), (B), y (C), y éstas se usaban de acuerdo al nivel del ruido que se quería evaluar. Hoy en día, de las ponderaciones anteriores, prácticamente sólo se usa la ponderación (A), pues se ha visto que existe una aceptable correlación entre los resultados medidos y las apreciaciones subjetivas. Cuando se emplea dicha ponderación, el nivel de presión sonora se denota por  $L_A$  y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L_A = 10 \text{ Log} \left( \frac{P_A}{P_0} \right) \text{ dBA}$$

donde.  $P_A$  es la presión eficaz evaluada con ponderación (A).  
 $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$

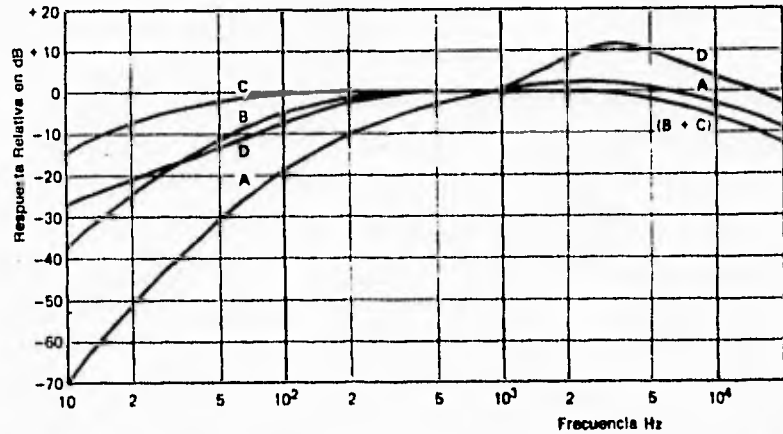


Fig. 2.14. Curvas de ponderación estandarizadas internacionalmente para sonómetros.

El término "**ponderado en A**" asigna a cada frecuencia un "peso ó ponderación" que está relacionado con la sensibilidad del oído a esa frecuencia. Por ejemplo, en un medidor de nivel sonoro (sonómetro), la señal recibida se filtra con la red de ponderación en A y se visualiza el nivel de la señal filtrada. La red de ponderación en A fue originalmente diseñada para reflejar el contorno del nivel de sonoridad a 40 Fones.

#### Nivel de presión sonora equivalente continuo con ponderación en A ( $L_{Aeq}$ )

Es el valor del nivel de presión sonora continuo con ponderación en A, que produciría la misma energía sonora ponderada en A que un ruido fluctuante evaluado durante un período de tiempo determinado. Se define como:

$$L_{Aeq} = 10 \text{ Log } \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{P_A(t)}{P_0} \right)^2 dt$$

donde:  $P_A(t)$  es la presión sonora instantánea con ponderación en A  
 $P_0 = 20 \mu Pa$   
 $T$  es el periodo de medición.

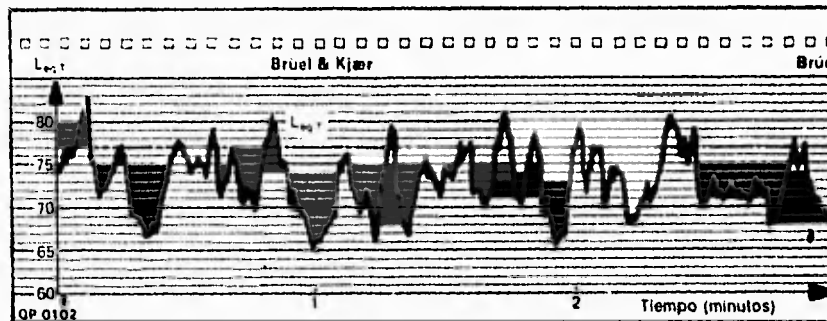


Fig. 2.15. La figura muestra el nivel equivalente continuo de una señal aleatoria.

La fórmula anterior se puede escribir como:

$$L_{Aeq} = 10 \text{ Log } \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt$$

donde:  $L_{pA}(t)$  es el nivel de presión sonora instantáneo con ponderación (A)

Si se tienen lecturas discretas de niveles en dB evaluados con ponderación (A) durante intervalos iguales de tiempo, se puede calcular el valor  $L_{Aeq}$  mediante la siguiente expresión:

$$L_{Aeq} = 10 \text{ Log } \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{pA}}{10}}$$

donde:  $L_{pA}$  es el nivel de presión sonora evaluado con ponderación (A)  
en cada intervalo de tiempo  
 $N$  es el número de mediciones

En general, para distintos intervalos de tiempo, la fórmula anterior puede escribirse como:

$$L_{Aeq} = 10 \text{ Log} \frac{\sum_{i=1}^N t_i 10^{\frac{L_{p,i}}{10}}}{\sum_{i=1}^N t_i}$$

donde:  $t_i$  son los intervalos de tiempo  
 $L_{p,i}$  son los niveles de presión sonora evaluados con ponderación en A  
 en cada intervalo de tiempo  
 $i = 1, 2, 3, 4, \dots, N$

desarrollando la expresión anterior se tendrá para este caso:

$$L_{Aeq} = 10 \text{ Log} \left( \frac{t_1 10^{\frac{L_{p,1}}{10}} + t_2 10^{\frac{L_{p,2}}{10}} + t_3 10^{\frac{L_{p,3}}{10}}}{t_1 + t_2 + t_3} \right)$$

La figura 2.16 muestra un caso en el que se han evaluado tres niveles de presión sonora durante distintos intervalos de tiempo.

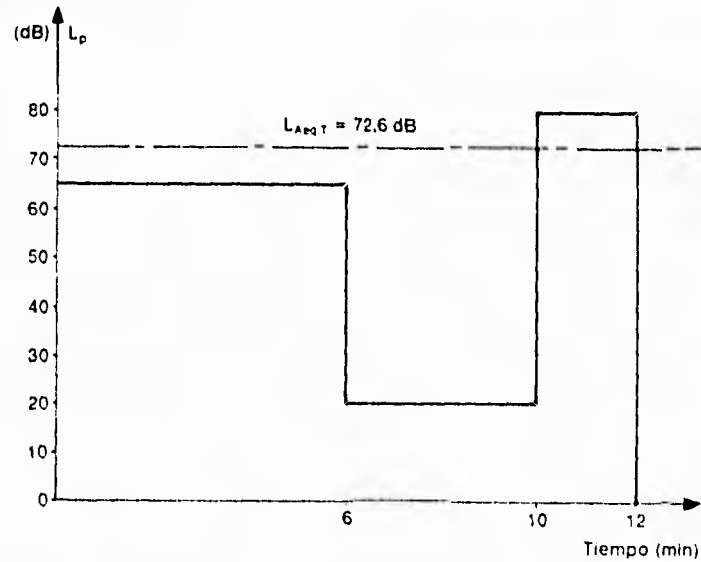


Fig. 2.16. Nivel  $L_{Aeq}$  correspondiente a los tres niveles  $L_p$  medidos durante tres intervalos de tiempo distintos.

## Conceptos básicos de la acústica de recintos

### Fuente de sonido

En acústica muchas veces es necesario conocer las características de la fuente de sonido; por ejemplo, el patrón de radiación de un altavoz a diferentes frecuencias ó la radiación de la intensidad acústica emitida por una máquina. A continuación se mencionará brevemente la característica de un tipo de fuente básica:

### Monopolo ó fuente omnidireccional

Si se tiene una esfera pulsante, ésta radiará sonido uniformemente en todas las direcciones del espacio; el patrón de radiación de este tipo de fuente son esferas de igual nivel de presión sonora.

Muchas fuentes se comportan por lo menos en primera aproximación como un monopolo ó conjunto de monopolos; este es el caso, por ejemplo, de un altavoz en su gabinete radiando sonido de baja frecuencia.

Es importante conocer cómo disminuye el nivel de presión sonora de la fuente con la distancia. La intensidad acústica emitida por un monopolo radiando en condiciones de campo libre a una distancia será:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

donde:  $W$  es la potencia.  
 $r$  es la distancia de la fuente a un punto cualquiera del espacio.

Tomando logaritmos y expresando como niveles la ecuación anterior, se tiene:

$$L_r = L_w - 20 \log r - 10 \log(4\pi)$$

2-30

Se puede ver claramente que cada vez que se duplica la distancia, el nivel de presión sonora disminuirá en 6 dB. A esto se le conoce como la **ley del inverso al cuadrado**. La figura 2.17 muestra un monopolo radiando.



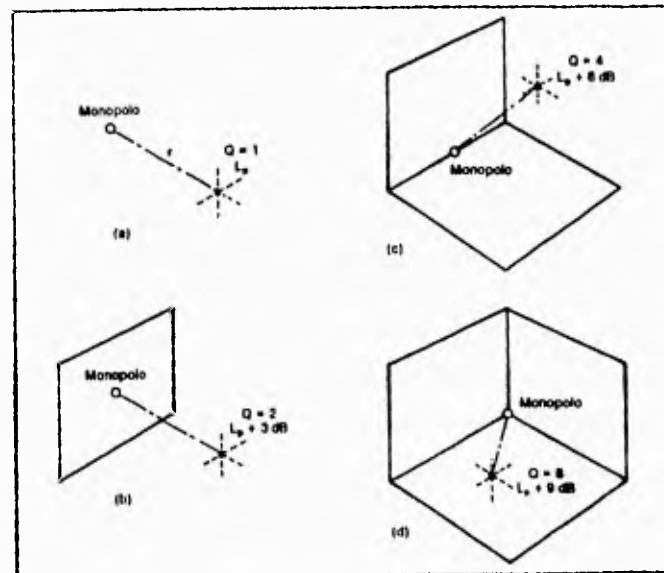
Fig. 2.17. *El monopolo, una esfera pulsante.*

### **Factor de directividad**

Es una forma de expresar la directividad de una fuente de sonido; se define como la razón de la intensidad evaluada en un eje a una cierta distancia de una fuente, a la intensidad que produciría una fuente puntual (omnidireccional) de la misma potencia a la misma distancia sobre el mismo eje. El factor de directividad se denota por la letra Q:

$$Q = \frac{I}{I_{ref}}$$

donde :  $I$  = intensidad de la fuente.  
 $I_{ref}$  = intensidad de la fuente puntual.



**Fig. 2.18.** Los esquemas muestran un monopolo radiando en diferentes condiciones de frontera:

- a) en condiciones de campo libre*
- b) en un plano infinito*
- c) en la arista de dos planos infinitos perpendiculares*
- d) en un vértice de tres planos infinitos perpendiculares*

### Fenómenos de interacción entre la onda sonora y el medio

#### - Absorción

Al incidir una onda acústica sobre un material, parte de la energía de la onda se disipará dentro del material debido a pérdidas producidas por rugosidades y porosidades. Esta energía se pierde, por ejemplo, en forma de calor.

### - Transmisión

Cuando una onda incide sobre una pared, parte de ésta se transmite hacia el otro lado.

### - Reflexión

Al incidir una onda sobre una superficie, una parte de su energía será reflejada y el resto absorbida ó transmitida. En acústica, al igual que en óptica, se tendrá que todo rayo que incide con un ángulo sobre una superficie reflectora será reflejado con el mismo ángulo (se entenderá por rayo a la recta que sigue la dirección normal a los frentes de onda). La figura 2.20 muestra un frente de onda reflejándose en una superficie.

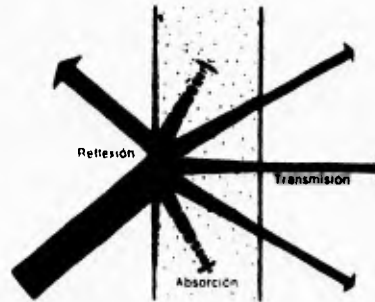


Fig. 2.19. Ilustración de los fenómenos de reflexión, absorción y transmisión.

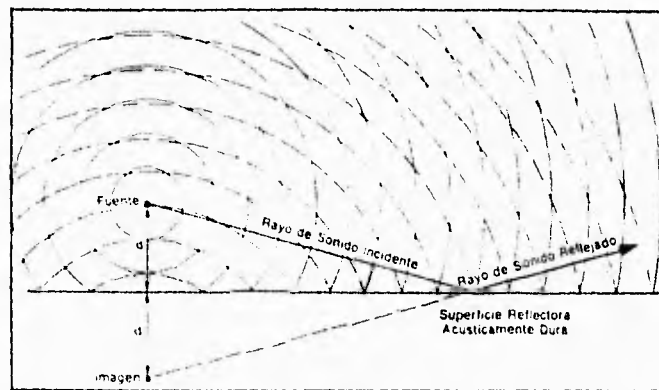


Fig. 2.20. Reflexión debido a una superficie plana.



### **Eco**

Es un sonido definido y distinguible que se escucha separado y atrasado como resultado de la reflexión del sonido. Cuando un sonido llega con un retardo de 50 ms respecto al sonido emitido por la fuente después de haber sido reflejado, decimos que se percibe eco.

### **Reverberación**

Es la persistencia del sonido en un ambiente debido a la energía de los modos de vibración<sup>3</sup> y de las reflexiones múltiples, la cual decae gradualmente después de que ha cesado de emitir sonido la fuente de excitación.

#### **Tiempo de reverberación ( $T_{60}$ )**

Es el tiempo necesario expresado en segundos para que el nivel de presión sonora en un recinto, decaiga 60 dB después de que la fuente ha cesado de emitir sonido. Para el cálculo del tiempo de reverberación existen diversas fórmulas y fueron deducidas tomando en cuenta la influencia de distintos parámetros; en la práctica, estas fórmulas se usan de acuerdo a las condiciones que se tengan y al grado de precisión que se desee. El método comúnmente empleado es el descrito por Sabine.

#### **Tiempo de reverberación según Sabine**

A comienzos de este siglo, W. C. Sabine dedujo experimentalmente la siguiente expresión para el cálculo del tiempo de reverberación:

---

<sup>3</sup> Cuando se resuelve matemáticamente el problema de una onda armónica propagándose dentro de un recinto rectangular, lo que se obtiene como resultado es una serie matemática que describe todas las posibles ondas estacionarias (resonancias) que pueden existir a las diferentes frecuencias. A las resonancias se les conoce "modos" y a las frecuencias a las que estas ocurren como "frecuencias propias"

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{A}$$

donde :  $T_{60}$  = Tiempo de Reverberación, [s].

$V$  = Volumen del recinto, [ $m^3$ ].

$A$  = Absorción total del recinto, [ $m^2$ ].

(0.161 es una constante de proporcionalidad en el sistema MKS)

El modelo de Sabine asume que la absorción de los materiales es independiente de la fuente así como de la posición relativa entre la fuente de sonido y el resto de las superficies.

Llegado este punto es necesario definir el concepto del coeficiente de absorción de un material.

#### **Coeficiente de absorción**

Se define al coeficiente de absorción de un material como:

$$\alpha_n = \frac{\text{Energía de sonido absorbida}}{\text{Energía de sonido incidente}}$$

Ahora es posible definir la absorción promedio de un recinto como:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n}$$

donde :  $\alpha_n$  es el coeficiente de absorción de cada material.

$S_n$  representa las áreas de los diferentes materiales.

Entonces la absorción total del recinto quedará definida como

$$A = \bar{\alpha} S$$

$$\text{donde : } S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n$$

Dentro de un ambiente la reverberación tiene un efecto importante en la inteligibilidad del habla; en un local con demasiada reverberación la inteligibilidad será mala y por otro lado un ambiente con muy poca reverberación también puede ser perjudicial.

La figura 2.21 muestra tiempos de reverberación típicos en función del volumen y uso del recinto. En el caso de salas de conciertos y otros locales similares no es el criterio de la inteligibilidad del habla el que domina sino que existen otros como la apreciación subjetiva de la música, por ejemplo.

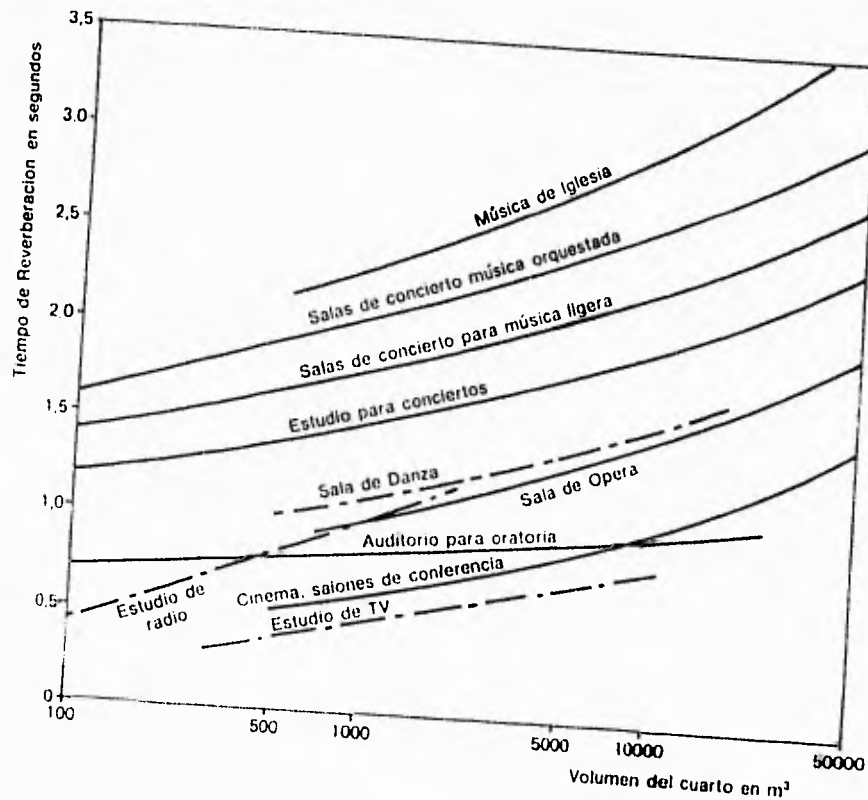


Fig. 2.21. Tiempos de Reverberación típicos en función del volumen considerados adecuados.

La reducción de la inteligibilidad en plantas industriales, con demasiada reverberación, se debe a dos causas: una, por el nivel del ruido de fondo, y dos, por las reflexiones que se suman al sonido directo incrementando su nivel. pues en ciertas regiones alejadas de la fuente sonora se crean campos reverberantes ó difusos que dificultan las conversaciones telefónicas o la comunicación oral entre los trabajadores, especialmente si se encuentran alejados unos de otros. Ambas causas combinadas pueden ser peligrosas pues podrían enmascarar una llamada de alarma en un momento dado. Si en un local la falta de inteligibilidad se debe a una reverberación excesiva ó a problemas de ruido, se puede determinar fácilmente el grado de distorsión de ambos efectos mediante el uso de un método de medición de la inteligibilidad, para posteriormente corregir el problema. De esto último se profundizará en el siguiente capítulo.

# Capítulo

# 3

## MÉTODOS DE MEDICION DE LA INTELIGIBILIDAD DEL HABLA EN RECINTOS

### MÉTODOS DE MEDICION DE LA INTELIGIBILIDAD DEL HABLA EN RECINTOS

Métodos Subjetivos .....	3-2
Introducción .....	3-2
Prueba de Articulación .....	3-3
Prueba de Inteligibilidad .....	3-3
Métodos Objetivos .....	3-4
Introducción .....	3-4
Índice de Articulación .....	3-4
Nivel de Interferencia del Habla .....	3-7
Índice de la Transmisión del Habla .....	3-10

## MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA INTELIGIBILIDAD DEL HABLA EN RECINTOS

### Métodos Subjetivos

#### Introducción

El enmascaramiento de la señal de la voz por ruido se puede determinar en términos de la degradación de resultados de pruebas del entendimiento del habla en presencia de ruido. Estas pruebas son conocidas como *pruebas de inteligibilidad* ó *pruebas de articulación*, la distinción radica con base a como se evalúan; si tiene sentido el significado de la palabra, frase u oración la prueba es denominada prueba de inteligibilidad; pero si se mide la eficiencia de la comunicación en términos de fonemas individuales ó sonidos aislados, a la prueba se le denomina prueba de articulación.

La principal característica de estas dos pruebas es que no requieren instrumentos de medición, pues se basan en la participación directa de personas clasificadas como oradores y escuchas; tanto oradores como escuchas son la fuente principal de las variaciones ajenas en cualquiera de las pruebas subjetivas diseñadas para evaluar los procedimientos de la inteligibilidad del habla.

Las personas participantes deberán tener el idioma castellano (para el caso de nuestro país) como su lengua natal, además de un cierto nivel de educación y cultura; entre los oradores no debe aparecer ningún acento regional marcado y en los escuchas se requiere que tengan oídos sanos, es decir, que sus niveles del umbral de audición no sean mayores a 20 dB ni menores a -10 dB de HL (del inglés *Hearing Level*) en una prueba de audiometría normalizada dentro de un rango en frecuencias desde 125 Hz hasta 8000 Hz. ([19] ANSI S3.2-1989 Pág. 2)

### **Prueba de articulación**

Una medida cuantitativa de la inteligibilidad del habla puede obtenerse al contar el número de unidades discretas del habla que sean correctamente reconocidas por un escucha. El objetivo de esta prueba es evaluar la eficiencia relativa de un sistema de comunicación (comúnmente un recinto) en la transmisión del habla cuando exista algún ruido de nivel arbitrario en una ó más partes del sistema. El procedimiento por el cual se obtiene esta medida cuantitativa es conocido como *prueba de articulación*. Un análisis muy detallado se encuentra en ([2] Cap. 17). Un orador lee listas de sílabas, palabras u oraciones a un grupo de escuchas y al porcentaje de ellas correctamente percibidas por los escuchas se le denomina *resultado de articulación* (este porcentaje se toma como una medida de la inteligibilidad del habla).

### **Prueba de inteligibilidad**

Desde la primera prueba de inteligibilidad (prueba de rima) descrita por G. A. Campbell en 1910, se han ideado muchas pruebas para medir la inteligibilidad del habla en sistemas de comunicación. Las investigaciones llevadas a cabo durante la década de los 30's acerca de los factores que afectan la inteligibilidad del habla en sistemas telefónicos y durante los 40's en equipos militares de comunicación condujeron a establecer, particularmente para las fuerzas armadas estadounidenses, un método para la medición de la inteligibilidad del habla en sistemas de comunicación. En 1953 la Asociación Estadounidense de Normas y la Sociedad Acústica Estadounidense comenzaron a trabajar en una norma y la denominaron ANSI S3.2-1960 (R1982), que hoy en día se conoce como ASA Standard 85-1989 ([20]). Existe también otra norma para la conducción y calibración de pruebas de la inteligibilidad del habla, la ISO/TR 4870:1991(E). ([21])

---

Aunque el término articulación se emplea algunas veces para denotar inteligibilidad (como en el término Índice de Articulación), en la práctica se prefiere reservar el término articulación para describir la habilidad de un individuo que produzca sonidos que se puedan identificar, tales como los del habla.

## Métodos objetivos

### Introducción

En estos métodos se requiere el uso de instrumentos de medición puesto que se evalúan los niveles de ruido y, solamente en uno de ellos, el tiempo de reverberación; los resultados dependerán de la influencia que los parámetros acústicos de un recinto ejerzan sobre una señal de prueba. Esta influencia aparece tanto en el dominio del tiempo (reverberación, ecos, control automático de ganancia [AGC]) como en el dominio de la frecuencia (ruido de fondo, limitantes paso-banda) y el grado en que afecten a dicha señal de prueba, servirá para estimar el grado de inteligibilidad de un recinto. A continuación describo a cada uno de estos métodos:

### Índice de articulación [Articulation Index (AI)]

Con base a datos relacionados a la inteligibilidad del habla -filtrada- y a ciertas suposiciones respecto a la equivalencia del ancho de banda y al nivel de la señal (cuando ambos se midan en potencia equivalente), French y Steinberg<sup>2</sup> establecieron un procedimiento en el que podría calcularse un índice para la inteligibilidad del habla a partir de mediciones puramente físicas. Ellos llamaron a este cálculo el índice de articulación (AI).

El concepto del AI establece que la inteligibilidad del habla es proporcional a la diferencia promedio en dB entre el nivel de enmascaramiento de ruido y el nivel rms de larga duración más 12 dB de la señal del habla tomada en la frecuencia central de 20 bandas de frecuencia, relativamente angostas. El espectro del enmascaramiento de un ruido puede ser diferente del espectro del ruido debido al alcance del enmascaramiento en sí y por otro enmascaramiento remoto. Esta proporcionalidad considera que la diferencia cae entre 0 y 30 dB. Estas 20 bandas, las cuales se eligieron porque se encontró que contribuyen de igual manera al entendimiento del

---

<sup>2</sup>N. R. French y J.C. Steinberg, "Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds", *J. Acoust. Soc. Amer.*, 19:90-119 (1947).

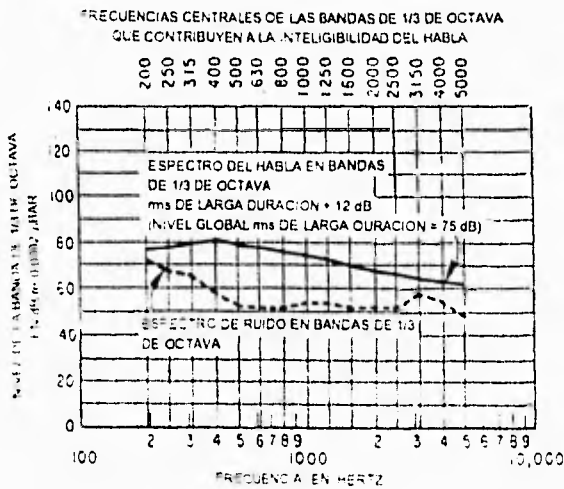
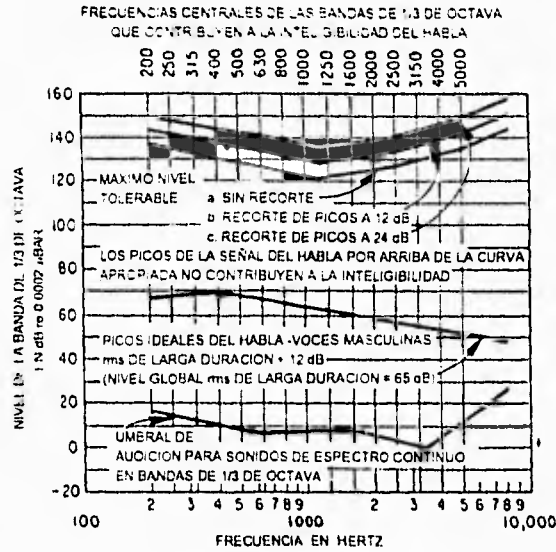


habla, son proporcionales al ancho de banda crítico del oído tal y como se determinara a partir de los estudios de la sonoridad y el enmascaramiento.

Los pasos a seguir en el cálculo del AI han sido desarrollados extensivamente y también han sido publicados como una norma ANSI S3.5-1969 (**(19)**). La figura 3.1 muestra la hoja de trabajo empleada para calcular el AI a partir del espectro del habla y del ruido en bandas por tercias de octava junto con un ejemplo del cálculo del AI. La figura 3.2 muestra la relación general entre el AI y otras mediciones de la inteligibilidad del habla.

En la norma se establecen dos puntos que merecen repetirse aquí: (1) el AI puede aplicarse propia y únicamente a sistemas de comunicación bajo ambientes ruidosos, tal y como se especifica en dicha norma; y (2), existen ciertos tipos de sistemas de comunicación y situaciones de enmascaramiento de ruido que solamente pueden evaluarse a través de pruebas directas de la inteligibilidad del habla u otras pruebas de eficiencia. En particular, los sistemas de comunicación que procesan las señales del habla de tal forma que compriman el ancho de banda, no pueden ser evaluadas correctamente por el procedimiento del AI.

En la misma norma se indican algunas sugerencias para refinar el AI tomando en cuenta algunos efectos tales como el esfuerzo vocal del orador, el enmascaramiento por ruido, la conversación cara a cara y la reverberación presente en la ambientación de los escuchas. Precisamente de éste último efecto cabe mencionar que se han propuesto otros procedimientos para tomar en cuenta la reverberación además de lo que se indica en la norma referida. Bolt y Mc Donald sugieren que los efectos de la reverberación podrían considerarse adecuadamente sumándole, al nivel del ruido medido, una cantidad que solamente dependa del tiempo de reverberación. Recientemente, Janssen recomendó que al nivel medido de la señal del habla se le reduzca un nivel eficaz por una cantidad que también dependa del tiempo de reverberación exclusivamente.



BANDA fc	PICOS DEL HABLA MENOS RUIDO [dB]	PCNDERA CION	COLS 2+3
200	4	0.0004	0.0016
250	10	0.0010	0.0100
315	13	0.0010	0.0130
400	24	0.0014	0.0336
500	26	0.0014	0.0364
630	26	0.0020	0.0520
800	24	0.0020	0.0480
1000	21	0.0024	0.0504
1250	18	0.0030	0.0540
1600	18	0.0037	0.0666
2000	15	0.0037	0.0555
2500	15	0.0034	0.0510
3150	6	0.0034	0.0204
4000	8	0.0024	0.0192
5000	12	0.0020	0.0240
IA :			0.5357

Fig. 3.1. Gráfica superior: Hoja de trabajo para el cálculo del AI. Método de las bandas por 1/3 de octava. Gráfica inferior: Un ejemplo del cálculo del AI por el método de las bandas por 1/3 de octava.

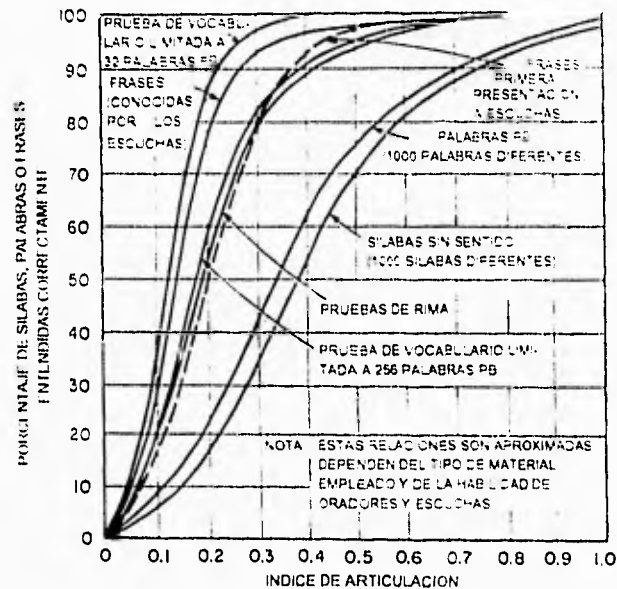


Fig. 3.2. Relación entre el AI y otras mediciones de la inteligibilidad del habla.<sup>1</sup>

### Nivel de interferencia del habla [Speech Interference Level (SIL)]

Beranek propuso una versión simplificada del AI para predecir la eficiencia de una comunicación a través de un diálogo de persona a persona en presencia de ruido. El estimó que el nivel promedio del habla podría estar en las bandas por octava de 600 a 1.200, 1.200 a 2.400 y 2.400 a 4.800 Hz a varias distancias de un orador empleando varios esfuerzos vocales. Asumiendo que el espectro de ruido sea un ruido continuo y de banda ancha, Beranek estimó además los niveles de ruido que podrían requerirse en esas mismas bandas por octava para dar un AI de aproximadamente 0.5. Los promedios de los niveles de las tres bandas por octava desde 600 a 4.800 Hz se tabularon para esta condición (ver tabla 3.1). A estos promedios se les llama SIL (niveles de interferencia del habla; del inglés *Speech Interference Levels*). Los SIL de la tabla 3.1, presumiblemente equivalentes a un AI de 0.5, predicen resultados correctos de la

<sup>1</sup>FRENCH, N. R. y J. C. STEINBERG. "Factors governing the intelligibility of speech sounds" J. Acoustical Society of America, Vol. 19, 1947, pp. 90-119, Bell Telephone System, Technical Publication Monograph B-1436, 1947

KRYTER, K. D. "Some comparisons between rhyme and PB-word intelligibility tests" J. Acoustical Society of America, Vol. 37, 1965, pag. 1146

inteligibilidad del 95% aproximadamente y resultados correctos de palabras PB (fonéticamente balanceadas, del inglés *Phonetically Balanced*) del orden del 75% (ver figura 3.2).

Distancia entre orador y escucha, en pies	Nivel de Interferencia del Habla, dB			
	Nivel de Voz			
	Normal	Elevado	Muy elevado	Gritando
0.5	71	77	83	89
1	65	71	77	83
2	59	65	71	77
3	55	61	67	73
4	53	59	65	71
5	51	57	63	69
6	49	55	61	67
12	43	49	55	61

*Tabla 3.I. Niveles de Interferencia del Habla que apenas si permiten una conversación confiable ó audición correcta del 75 %, aproximadamente, de palabras PB.*

Una modificación del método SIL para la evaluación de la inteligibilidad del habla se denomina PSIL (del inglés *Preferred Speech Interference Level*), el cual se define como el promedio aritmético de los niveles de ruido evaluados en bandas por octava a 500, 1000, 2000 y 4000 Hz. La evaluación de la inteligibilidad empleando el PSIL se hace utilizando la Tabla 3.II con el valor PSIL calculado; las dos columnas de la derecha dan la distancia en metros hasta la cual la inteligibilidad es satisfactoria empleando nivel normal y nivel elevado, respectivamente.

Nivel de Interferencia del habla	Máxima distancia a la cual una conversación normal se considera que tiene inteligibilidad satisfactoria	Máxima distancia a la cual una conversación con voz elevada se considera que tiene inteligibilidad satisfactoria
dB	m	m
35	7.5	15
40	4.2	8.4
45	2.3	4.6
50	1.3	2.6
55	0.75	1.5
60	0.42	0.85
65	0.25	0.5
70	0.13	0.26

*Tabla 3.II.*

Otras formas de medición del sonido existentes que proveerán estimaciones razonables de índices Al suponen que la energía en un enmascaramiento por ruido se concentra en la región de frecuencias cubiertas por el espectro del habla en condiciones normales. Aunado al método SIL los siguientes métodos también se han utilizado ([7] pág. 94): (a) lecturas con sonómetros que incluyen redes de ponderación en frecuencia A ó D, (b) Nivel de sonoridad en Fones y Nivel de Percepción de ruido en PNdB, y (c), los procedimientos para la obtención de los contornos de evaluación del ruido (NR, NC ó NCA). En los procedimientos en la evaluación del ruido (NR - Noise Rating), criterio del ruido (NC - Noise Criteria) y compromiso del criterio del ruido (NCA - Compromise Noise Criteria), el espectro de un ruido en bandas de octava se traza en gráficas especiales. Los pasos para el cálculo del nivel de sonoridad propuestos por S.S. Stevens (Fon (S)) y por E. Zwicker (Fon (Z)), además del nivel de percepción del ruido en PNdb, se presentan detalladamente en el capítulo 5 de la referencia citada anteriormente.

Mientras que estos métodos, particularmente el SIL, han mostrado ser razonablemente exactos para evaluar una comunicación del habla bajo muchos ambientes de ruido, a diferencia del AI, no deben aplicarse a espectros de ruido que tengan componentes intensos en bajas ó altas frecuencias. Otras limitantes del SIL y los otros procedimientos, comparados con el AI, son que deben de asumirse ciertas suposiciones generales en su uso con respecto a las interacciones entre recintos acústicos, el ruido presente, el esfuerzo vocal empleado por el orador, y el nivel del habla percibido por los escuchas.

### **Índice de la transmisión del habla [Speech Transmission Index (STI)]**

La técnica objetiva más precisa desarrollada hasta el momento se basa en el cálculo del STI (11), a tal grado que a fines de la década pasada se convirtió en una norma internacional conocida como **RASTI**<sup>1</sup>. Cuando un orador se dirige a un auditorio emite una señal de voz la cual, cuando llega al oyente, lo hace ya con un cierto grado de distorsión; esto debido a características del recinto tales como el ruido de fondo y la reverberación.

Es posible entonces hacer un paralelo entre la situación antes descrita y un sistema de transmisión de sonido, el cual puede describirse mediante su Función de Transferencia de Modulación (MTF - Modulation Transfer Function).

Para entender esta técnica es necesario imaginarnos la voz emitida por el orador en la posición en donde él se encuentre como una señal de cierta intensidad que modula al 100 % a una portadora. Esta señal, cuando llega al escucha, lo hace ya con un porcentaje menor de modulación debido a los efectos del ruido de fondo y reverberación, principalmente (figura 3.3).

La señal, tal y como llega al escucha, puede describirse en función de la MTF y con base a esta función de transferencia se obtienen los índices de transmisión del habla (STI) empleados para evaluar cuantitativamente la inteligibilidad. La figura 3.4 ilustra con un esquema esta técnica.

---

<sup>1</sup>International Standard IEC PT 16-88, Sound System Equipment part 16

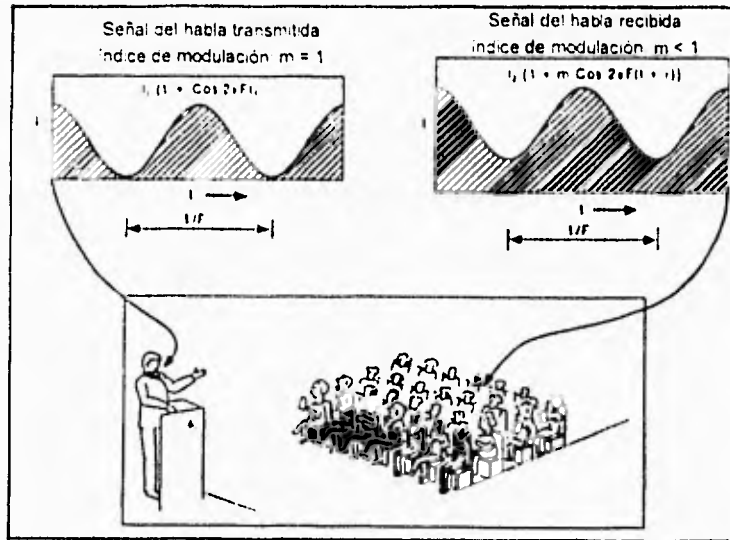


Fig. 3.3. Ilustración de la reducción en la modulación de una señal de voz ocasionada por ruido de fondo y reverberación.

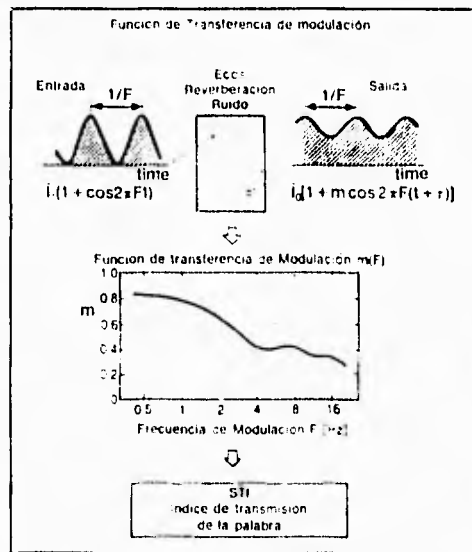


Fig. 3.4. La figura ilustra mediante un esquema el cálculo del STI

El método seguido en la práctica consiste en emitir ruido rosa por octavas, en el rango de 125 a 8000 Hz, el cual se modula en cada caso con 14 frecuencias de modulación que van desde 0.63 hasta 12.5 Hz en intervalos de tercias de octava; esto da como resultado una matriz de 98 valores

los que pueden transformarse luego en valores STI; posteriormente es posible relacionar estos valores con una escala subjetiva como la mostrada en la figura 3.5.

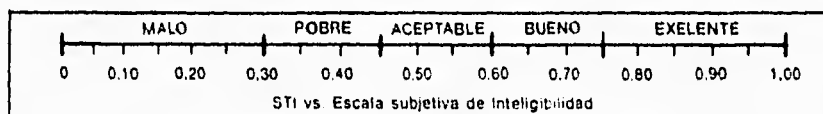


Fig. 3.5. STI vs. escala subjetiva de inteligibilidad.

Una técnica aplicable en trabajo de campo es la denominada RASTI (del inglés **RA**pid **S**peech **T**ransmission **I**ndex); esta técnica viene a ser la versión rápida del STI y la diferencia estriba en que en este caso sólo se usan las bandas por octavas correspondientes a las frecuencias centrales de 500 Hz y 2 kHz; asimismo se reducirán las frecuencias de modulación empleándose en este caso las de 1, 2, 4 y 8 Hz para la banda de 500 Hz y 0.7, 1.4, 2.8, 5.6 y 11.2 Hz para la banda de 2 kHz. Debido a esta reducción de datos es posible llevar a cabo, en forma rápida, esta técnica.

Con los nueve índices de modulación que se obtienen se calculan las respectivas relaciones señal a ruido **aparentes** ( $X_i$ ) donde ya están incluidos los efectos de la reverberación. Los valores ( $X_i$ ) se obtienen de:

$$X_i = 10 \text{ Log} \left( \frac{m_i}{1 - m_i} \right)$$

donde:  $X_i$  son las relaciones señal a ruido aparentes y  
 $m_i$  son los factores de reducción de modulación correspondientes.

Todos los valores de  $X_i$  comprendidos en el intervalo  $15 \text{ dB} > X_i > -15 \text{ dB}$  se tomarán como tales y los valores fuera de este rango se limitarán a  $15 \text{ dB}$  ó  $-15 \text{ dB}$  según sea el caso.

El valor RASTI (en el rango de 0.00 a 1.00) se calcula mediante la siguiente expresión:



$$RASTI = \frac{\bar{X} - 15}{30}$$

donde:  $\bar{X}$  es el promedio aritmético de los valores  $X_i$  calculados.

Los valores RASTI pueden relacionarse, al igual que el STI, con la misma escala subjetiva de inteligibilidad. La figura 3.6 muestra gráficamente la aplicación del RASTI.

En el siguiente capítulo se presenta el análisis detallado de la función de transferencia de modulación, principio del método STI para evaluar la inteligibilidad del habla en recintos.

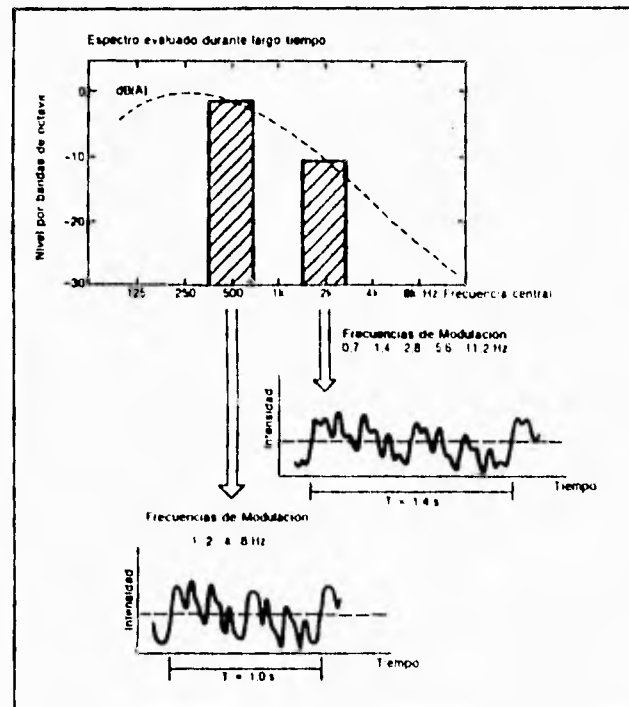


Fig. 3.6. Ilustración de la señal usada en la medición del RASTI. Se presentan dos bandas de ruido por octavas simultáneamente y dos envolventes, una con 4 frecuencias de modulación y la otra con 5 frecuencias, las cuales actúan simultáneamente, siendo los índices de modulación 0.4 y 0.32, respectivamente.

# Capítulo

# 4

## ANALISIS DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE MODULACION

### ANALISIS DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA DE MODULACION

Introducción .....	4-2
Función de Transferencia de Modulación .....	4-2
Determinación de la MTF .....	4-4
- caso I): $m$ independiente de $F$ .....	4-4
- caso II): $m$ dependiente de $F$ .....	4-6
Obtención del índice STI a partir de la MTF .....	4-9
La aplicación del método RASTI en auditorios .....	4-12
Contornos iso-RASTI .....	4-12

## ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE MODULACION

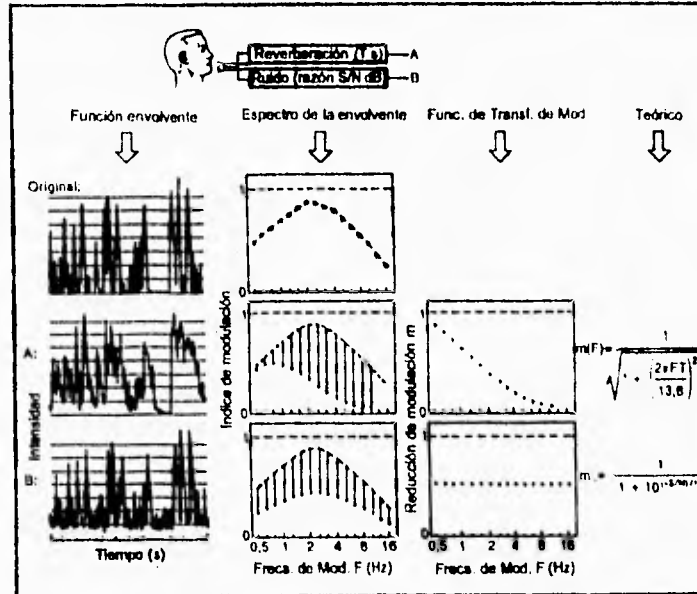
### Introducción

Cuando un orador se expresa ante una audiencia -ya sea en un recinto (auditorio ó sala de conferencias) ó al aire libre- la señal de su voz que alcance a un escucha estará distorsionada en cierto grado de tal forma que seguramente reducirá la inteligibilidad del habla. Las posibles causas son debidas a ecos y reverberación, deformación espectral, ruido ambiente, etc. Así, en términos de un sistema de transmisión de sonido con la señal del habla original producida por un orador como la entrada y el sonido que alcanza a un escucha como la salida, la eficiencia del sistema no es perfecta; en general la salida no es una copia perfecta de la entrada. Se mostrará que la imperfección de la relación entrada-salida de un sistema de transmisión de sonido puede describirse adecuadamente por la Función de Transferencia de Modulación (MTF), la cual puede usarse para cuantificar el efecto sobre la inteligibilidad del habla.

### Función de Transferencia de Modulación

El concepto de la MTF (Modulation Transfer Function) fue propuesto en el año de 1973 por dos investigadores -Houtgast y Steeneken- y cuantifica el grado en que la modulación en una señal se reduce en función de la frecuencia de modulación. Las modulaciones están definidas por la **envolvente de intensidad** de la señal: solamente en el dominio de la intensidad tanto el ruido de interferencia como la reverberación afectarán el grado de modulaciones de una onda de forma senoidal moduladora **sin** afectar la forma de onda senoidal. El esquema en la figura 4.1 ilustra como puede emplearse la MTF para cuantificar la relación entre la señal del habla original en la entrada y la señal de salida (A ó B). Debido a que las distorsiones pueden variar considerablemente en función de la frecuencia de la portadora, el análisis se especifica en bandas por octava. El ejemplo en la figura 4.1 considera una banda por octava únicamente, es decir, las envolventes en intensidad en la banda por octava con frecuencia central de 500 Hz. Se ilustran

dos sistemas de transmisión de sonido; uno con reverberación solamente (caso A;  $T = 2.5$  s) y uno con ruido de interferencia únicamente (caso B; razón señal a ruido  $S/N = 0$  dB).



*Fig. 4.1. La reducción de las fluctuaciones en la envolvente (en una banda por octava específica) de una señal de salida (A ó B) respecto a la señal original puede expresarse por la Función de Transferencia de Modulación. Las dos condiciones consideradas (reverberación ó ruido de interferencia), conducen a MTF's características, de acuerdo a las expresiones teóricas dadas en la parte derecha de la figura.*

En general el efecto de la reverberación ó ruido ambiente se manifiesta en una reducción de las fluctuaciones relativas en la función envolvente y puede cuantificarse por el **espectro de la función envolvente**. El espectro de la envolvente se obtiene de un análisis de frecuencias en bandas por tercias de octava de la función envolvente (normalmente una muestra de voces durante un minuto) y refleja la distribución espectral de las fluctuaciones de la envolvente respecto a la intensidad promedio: el índice de modulación como una función de la frecuencia de modulación. La diferencia entre los dos espectros de la envolvente (original y resultante) refleja la reducción de las fluctuaciones de la envolvente efectuadas por el sistema de transmisión de

sonido. Esto conduce a la obtención de la MTF: el factor de reducción del índice de modulación como una función de la frecuencia de modulación.

Como puede observarse en la figura 4.1, en el caso de reverberación, la MTF tiene la forma característica de un filtro paso-bajas: las fluctuaciones más rápidas son más sensibles al efecto de la reverberación, como era de esperarse. En el caso ideal de un proceso de reverberación puramente exponencial, la MTF se define matemáticamente por:

$$m ( F ) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\pi FT}{13.8} \right)^2}} \quad (1)$$

su característica paso-bajas se determina por el producto  $FT$  ( $F$ =frecuencia de modulación,  $T$ =tiempo de reverberación). En el caso de ruido de interferencia, la MTF se define por la razón  $S/N$  y es independiente de la frecuencia de modulación: el ruido de interferencia resulta en un incremento de la intensidad promedio y esto reduce el índice de modulación para todas las frecuencias de modulación por el mismo factor.

Es importante notar que la MTF (en una banda por octava específica) de un sistema de transmisión de sonido es **independiente** de la señal de entrada considerada: cuantifica la función de transferencia de modulación para cualquier señal de entrada, ya sea voces, música ó alguna señal artificial. considerando que dentro de esa banda por octava estas señales tengan la misma intensidad promedio (debido al ruido de interferencia, la razón  $S/N$  es importante).

#### Determinación de la MTF

##### - caso I): $m$ independiente de la frecuencia de modulación $F$

La MTF de un sistema de transmisión de sonido puede determinarse de varias maneras; el principio es que el factor de reducción del índice de modulación siempre se obtenga de una comparación de las modulaciones en intensidad (amplitud) en la salida y en la entrada del sistema.

En general, el índice de modulación ( $m$ ) dependerá de la frecuencia de modulación ( $F$ ) en cualquier banda de octava ( $k$ ) del rango de audiofrecuencia. A continuación se deducirá  $m$  para canales de transmisión con distorsiones en el dominio de la frecuencia (ruido de fondo y limitantes paso-banda), lo cual implica que  $m$  sea independiente de  $F$  para este análisis.

Si aplicamos una señal de prueba (con un índice de modulación  $m=1$ ) como entrada a un sistema de comunicación, la señal dentro de cada banda por octava ( $k$ ) puede describirse por:

$$I_k(t) = \bar{I}_k(1 + \cos 2\pi Ft) \quad (2)$$

en donde :  $\bar{I}_k$  es la intensidad promedio por octava  
 $F$  es la frecuencia de modulación

En el punto de recepción, la señal se convierte en:

$$I_k(t) = \bar{I}_k(1 + m_k \cos 2\pi Ft) \quad (3)$$

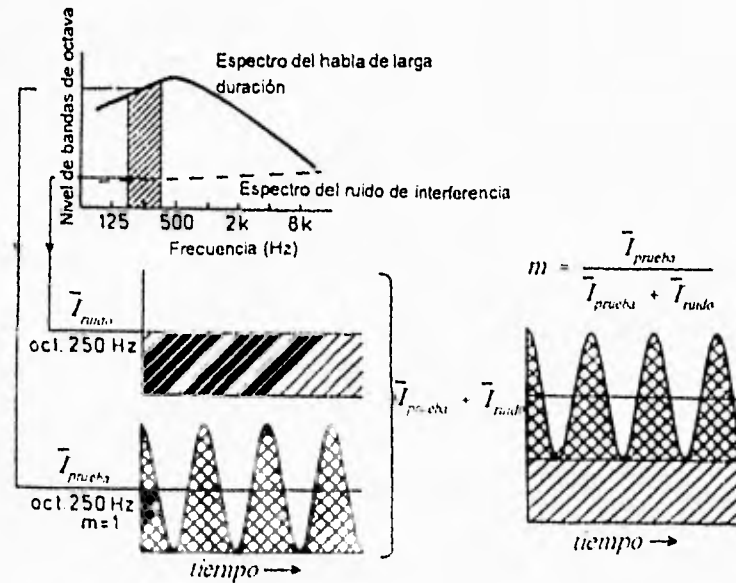


Fig. 4.2. Relación entre la razón señal a ruido y la reducción del índice de modulación  $m$  de una señal de prueba.

En general, el índice de modulación ( $m$ ) dependerá de la frecuencia de modulación ( $F$ ) en cualquier banda de octava ( $k$ ) del rango de audiodiferencia. A continuación se deducirá  $m$  para canales de transmisión con distorsiones en el dominio de la frecuencia (ruido de fondo y limitantes paso-banda), lo cual implica que  $m$  sea independiente de  $F$  para este análisis.

Si aplicamos una señal de prueba (con un índice de modulación  $m=1$ ) como entrada a un sistema de comunicación, la señal dentro de cada banda por octava ( $k$ ) puede describirse por:

$$I_k(t) = \bar{I}_k(1 + \cos 2\pi Ft) \quad (2)$$

en donde :  $\bar{I}_k$  es la intensidad promedio por octava  
 $F$  es la frecuencia de modulación

En el punto de recepción, la señal se convierte en:

$$I_k(t) = \bar{I}_k(1 + m_k \cos 2\pi Ft) \quad (3)$$

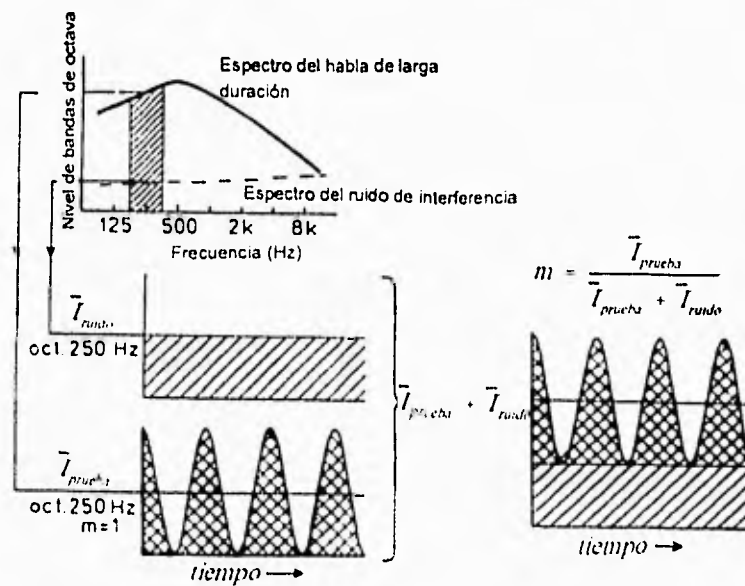


Fig. 4.2. Relación entre la razón señal a ruido y la reducción del índice de modulación  $m$  de una señal de prueba.

en donde el índice de modulación  $m_k$  depende de la razón de intensidades de la señal de prueba y del ruido de interferencia, y se denota por:

$$m_k = \frac{\bar{I}_{prueba}}{(\bar{I}_{prueba} + \bar{I}_{ruido})} \quad (4)$$

De esta manera, la razón señal a ruido puede obtenerse a partir de  $m_k$  por:

$$SNR = 10 \text{Log} \left( \frac{\bar{I}_{prueba}}{\bar{I}_{ruido}} \right) = 10 \text{Log} \left[ \frac{m_k}{(1 - m_k)} \right] \text{ dB} \quad (5)$$

o sea, el valor de  $m_k$  se obtiene correlacionando la función senoidal envolvente original con la función envolvente que llega al punto de interés (escucha). Así las fluctuaciones introducidas en la envolvente por el ruido de interferencia pueden eliminarse. Cuando la razón señal a ruido ( $S/N$ ) -en una banda por octava específica- se defina en un punto de recepción, de una ruta de transmisión (el nivel de presión que corresponda a la intensidad promedio de la señal de prueba menos el nivel de presión del ruido de interferencia), el factor de reducción del índice de modulación se obtiene despejando a  $m$  de la ecuación anterior (aquí  $m$  es independiente de las frecuencias de modulación):

$$m = \frac{1}{1 + 10^{\frac{(S/N)}{10}}} \quad (6)$$

#### - caso II): $m$ dependiente de la frecuencia de modulación $F$

Las distorsiones en el dominio del tiempo (reverberación, ecos, AGC: control automático de ganancia), afectan esencialmente la envolvente de la señal. La reverberación, por ejemplo, aplanan las fluctuaciones rápidas de la función envolvente. Esto implica que para cierto tipo de canal de transmisión el índice de modulación dependa de frecuencias de modulación. De esta forma para cada banda por octava el índice de modulación tiene que medirse como una función de cada frecuencia de modulación resultando en la función de transferencia de modulación para la



elección de las frecuencias de modulación ( $F_m$ ), hay que tomar en cuenta los ritmos de fluctuación encontrados en diálogos ó discursos que se llevan a cabo.

En general, la voz se puede describir como un flujo de sonidos que tienen un espectro en frecuencias que varían continuamente. Estas diferencias espectrales conducen a fluctuaciones en la envolvente de la señal dentro de bandas de octava individuales; la incógnita de cuales frecuencias de modulación son relevantes a la transmisión del habla está relacionada con la de las frecuencias de modulación que se presentan en la señal de voz producida por un orador. Esto ha sido investigado a través de un análisis en frecuencias de las fluctuaciones temporales en la envolvente de la intensidad del habla (filtrada en una banda de octava). Un ejemplo de una función envolvente se ilustra en la figura 4.3; se consideró, dentro de una reproducción de dos minutos y medio aproximadamente, una muestra de 10 segundos de un discurso continuo con diferentes oradores y un solo texto grabados dentro de una cámara anecoica; la señal de estas voces se filtró en la banda por octava de 2,000 Hz, se demoduló, se elevó al cuadrado (para obtener una envolvente que corresponda a la intensidad) y se filtró en paso-bajas, resultando en la envolvente de intensidad mostrada.

Esta función envolvente se analizó por medio de la densidad espectral de potencia; en la literatura ([10] Pág. 1071, [11] Pág. 322) encontré un análisis similar en donde se emplearon las bandas de 1/3 de octava (con frecuencias centrales desde 0.63 Hz hasta 12.5 Hz) además de que utilizaron una muestra de un minuto de duración; sin embargo, independientemente de que el espectro de voces de esa función envolvente se haya obtenido bajo diversas condiciones (distintos textos, diferentes modos de hablar), los resultados encontrados en este trabajo son muy parecidos (ver figura 4.5); los espectros de la figura 4.5 muestran un máximo entre los 3 y 4 Hz aproximadamente, y siguen el patrón dado en el ejemplo de la figura 4.4. Como se mencionó antes, el análisis se aplica a una señal de voces sin distorsión y grabada en silencio bajo condiciones anecoicas.

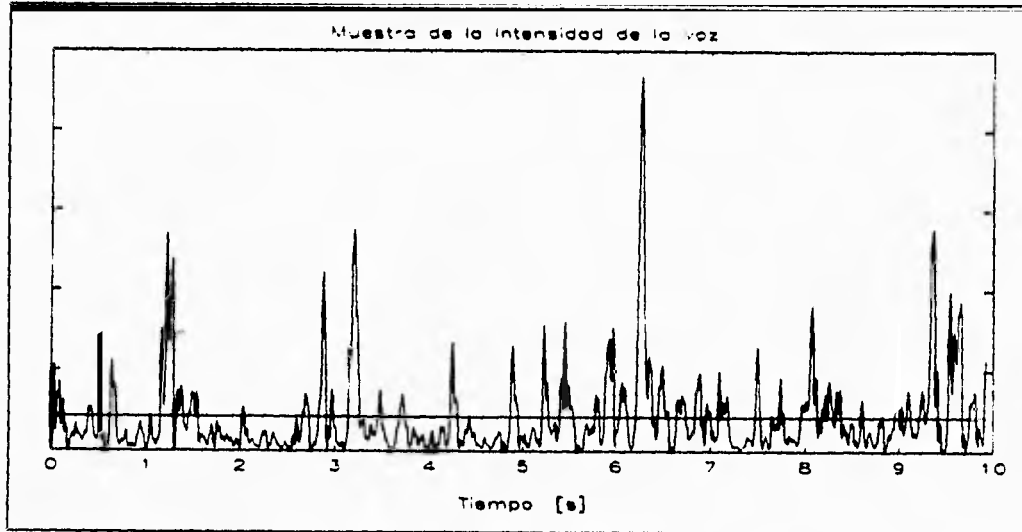


Fig. 4.3. Función envolvente de la señal de voces dentro de la banda por octava con frecuencia central de 2,000 Hz. La línea horizontal indica el valor promedio de la intensidad.

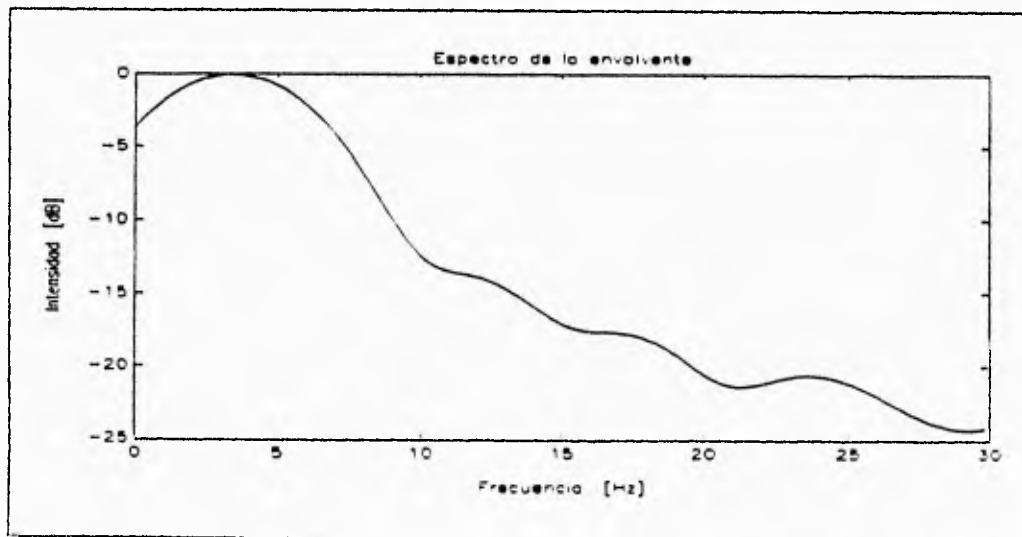


Fig. 4.4. Densidad espectral de potencia de la función anterior dentro de la banda por octava de 2 kHz

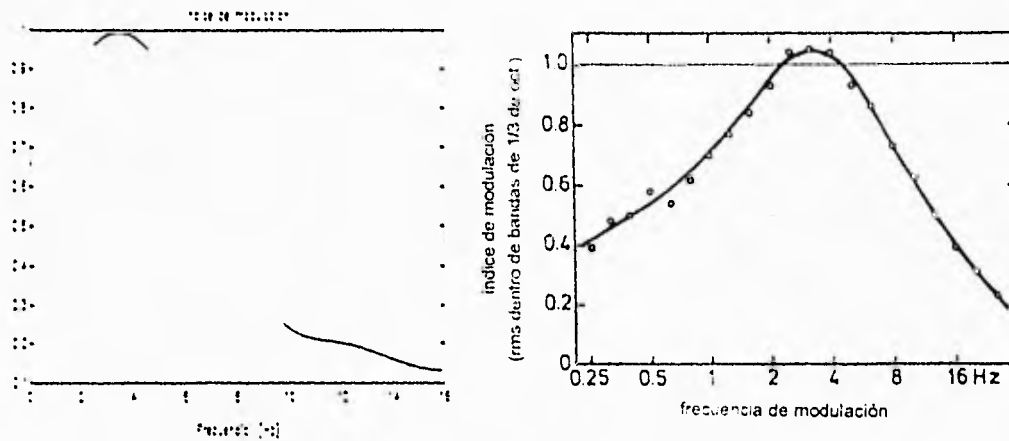


Fig. 4.5. Las fluctuaciones de la envolvente en intensidad de la señal de voces filtrada en la banda por octava (Fig. 4.3) se cuantifican en la forma de un espectro normalizado con respecto al valor promedio  $\bar{I}$ . De esta manera la ordenada de este espectro de la envolvente puede interpretarse como un índice de modulación. En la gráfica derecha se encuentra el mismo espectro mediante un análisis por tercias de octava. ([10] Pág. 1071, [11] Pág. 322)

#### Obtención del índice STI a partir de la Función de Transferencia de Modulación (MTF)

Aunque el espectro de la función envolvente del habla proporciona alguna información en el rango de las frecuencias de modulación relevantes en la transmisión de la voz, no proporciona una indicación directa en como transformar la MTF en un índice que esté relacionado con el efecto de un sistema de transmisión sobre la inteligibilidad del habla. La forma en que el STI se deduce a partir de la MTF lleva alguna relación con el Índice de Articulación: ambos índices reflejan la significancia de la razón señal a ruido con respecto a la inteligibilidad del habla. Un análisis completo de la MTF involucra siete MTF's en mismo número de bandas por octavas (frecuencias centrales desde 125 Hz hasta 8 kHz), con cada MTF consistiendo de 14 valores de  $m$  (para frecuencias de modulación desde 0.63 hasta 12.5 Hz en intervalos de tercias de octavas). La conversión de esta matriz de 7 x 14 valores de  $m$  en un índice STI involucra cinco pasos descritos a continuación: (ver figura 4.6)

1. Transformación a una razón señal a ruido aparente,  $(S/N)'$

Independientemente de las fuentes originales de distorsión (reverberación y/o ruido de interferencia), cada valor  $m$  se convierte en una correspondiente razón señal a ruido aparente,  $(S/N)'$ ; tal y como si el valor  $m$  resultara de ruido de interferencia únicamente. Esta transformación está dada por:

$$(S/N)' = 10 \text{Log} \left[ \frac{m}{(1-m)} \right] \text{ (dB)} \quad (7)$$

Teóricamente, debido a que  $0 < m < 1$ , esta razón señal a ruido aparente puede tomar valores entre  $-\infty$  y  $+\infty$ .

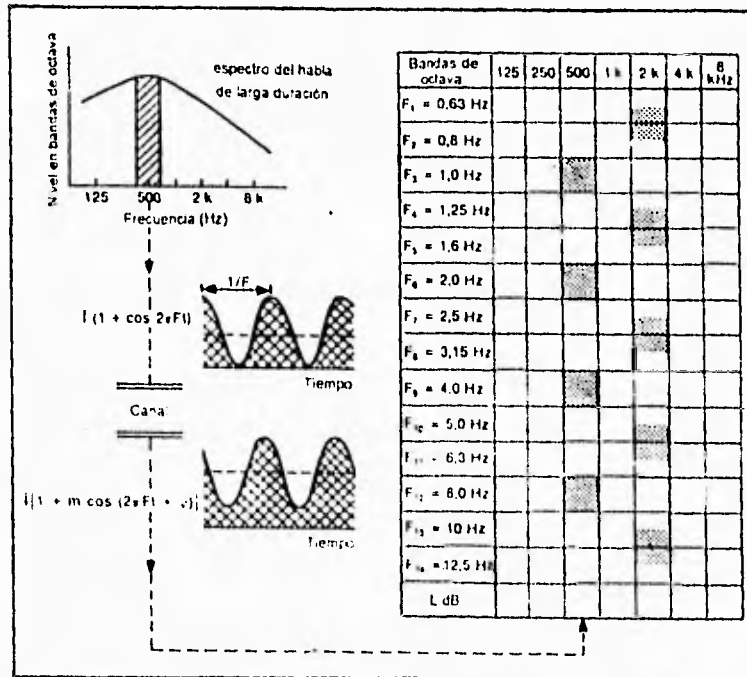


Fig. 4.6. Para un análisis completo, el factor de reducción  $m$  se determina para 14 frecuencias de modulación y para 7 bandas por octavas, resultando en una matriz de 98 puntos de datos. Los niveles de las bandas de octava se miden también. Para el procedimiento condensado (RASTI) se consideran solamente nueve factores de reducción, marcados por las zonas sombreadas en la matriz.

### 2. Limitando la razón $(S/N)'$ a un rango de 30 dB

Antes de aplicar un procedimiento de promediación a la matriz de 7 x 14 valores  $(S/N)'$ , estos valores se truncan cuando excedan el rango de  $\pm 15$  dB. Así, si  $(S/N)' > 15$ , se define  $(S/N)' = 15$  y, similarmente, si  $(S/N)' < -15$  se define  $(S/N)' = -15$  dB.

### 3. $(S/N)'$ promedio de una banda por octava específica

Todos los 14 valores de  $(S/N)'$  obtenidos a partir de una MTF en una banda por octava específica, se promedian sin aplicar algún factor de ponderación dependiente de la frecuencia de modulación. Esto resulta en una razón señal a ruido aparente de una banda por octava específica  $(S/N)'_k$ , donde el subíndice  $k$  se refiere a cada una de las siete bandas por octava consideradas.

### 4. Promedio global $(S/N)'$

Los siete valores de  $(S/N)'_k$  se promedian tomando en cuenta los factores de ponderación de la banda por octava específica,  $w_k$ .

$$\overline{(S/N)'} = \sum_{k=1}^7 w_k (S/N)'_k \quad (8)$$

Los valores de  $w_k$ , correspondientes a las siete bandas por octava con frecuencias centrales desde 125 Hz hasta 8 kHz, son 0.13, 0.14, 0.11, 0.12, 0.19, 0.17, y 0.14.

### 5. Conversión al STI

La razón señal a ruido aparente promedio global cae entre +15 dB y -15 dB (como resultado del paso 2), y se convierte en el índice STI por:

$$STI = \frac{[(S/N)^2 - 15]}{30} \quad (9)$$

Así, brevemente, el STI obtenido de la matriz de valores  $m$  refleja una razón señal a ruido "aparente" promediada junto con dos variables, denominadas frecuencia de modulación (envolvente) y frecuencia audible (portadora). Solo la frecuencia de modulación relaciona específicamente el concepto de la MTF tal y como se describe en [11].

### La aplicación del método RASTI en auditorios

La evaluación de la inteligibilidad para un auditorio, sala de conferencias ó en general para un recinto diseñado para la transmisión de voces, comprende varios aspectos tales como:

- el mapeo de la inteligibilidad a través de un auditorio;
- la investigación de la contribución de varios niveles de ruido de fondo;
- la evaluación de la contribución de un arreglo de altavoces -alineados- condicionado con varios niveles de ruido de fondo ó diferentes posiciones de los altavoces.

Todos estos aspectos pueden estudiarse con el método RASTI y, como se ha discutido en la literatura ([13]), no sólo se obtiene una estimación de la calidad en la transmisión del habla sino también la naturaleza de la pérdida de transmisión.

### Contornos iso-RASTI<sup>1</sup>

El procedimiento normal para determinar los contornos iso-RASTI es medir los índices RASTI en un gran número de posiciones uniformemente distribuidas a través

---

<sup>1</sup> En este trabajo se hace mención de los contornos solamente por su aplicación pero no se ejemplifican en los resultados obtenidos en los siguientes capítulos



Normalmente la sesión de medición se hace en ausencia de la audiencia, lo cual puede resultar en una absorción, junto con niveles de ruido, no representativa. La ausencia de un ruido de fondo representativo puede compensarse con la aplicación de una fuente de ruido artificial durante las mediciones ó corrigiendo el valor RASTI para un ruido de fondo imaginario. En este último caso también se pueden corregir las MTFs para un cierto nivel de ruido de acuerdo al factor de reducción de modulación combinando las ecuaciones 1) y 6):

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[2\pi F \frac{T}{13.8}\right]^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-(S/M)}{10}}} \quad (10)$$

donde  $F$  es la frecuencia de modulación en Hz,  $T$  el tiempo de reverberación en segundos y  $S/N$  es la razón señal a ruido en dB.



# Capítulo

# 5

## MEDICIONES SUBJETIVAS (PRUEBA DE ARTICULACION) Y MEDICIONES OBJETIVAS (METODO RASTI)

### MEDICIONES SUBJETIVAS Y OBJETIVAS

Introducción .....	5-3
Equipo de medición .....	5-3
Calibrador de nivel sonoro .....	5-4
Micrófono de condensador .....	5-4
Preamplificador para micrófono .....	5-6
Amplificador de medición .....	5-6
Filtro de bandas de octavas .....	5-6
Grabadora digital .....	5-8
Doble casetera estéreo .....	5-9
Amplificador de potencia .....	5-9

Altavoz .....	5-9
Tarjeta de procesamiento digital de señales (DSP32C) .....	5-9
<b>Recintos .....</b>	<b>5-11</b>
Salón de seminarios .....	5-11
Cámara anecoica .....	5-11
Auditorio del Centro de Instrumentos .....	5-14
Prueba de articulación .....	5-15
Aula 104 .....	5-19
Aula 111 .....	5-20
<b>Indices RASTI .....</b>	<b>5-21</b>
<b>I) Tono de calibración .....</b>	<b>5-21</b>
<b>II) Nivel de referencia .....</b>	<b>5-21</b>
<b>III) Medición de la señal RASTI .....</b>	<b>5-22</b>
<b>IV) Muestreo .....</b>	<b>5-23</b>
<b>V) Análisis .....</b>	<b>5-24</b>

## MEDICIONES SUBJETIVAS Y OBJETIVAS

### Introducción

Se realizaron mediciones en cinco recintos diferentes -todos ellos de forma rectangular- con volúmenes diversos (desde 60 m<sup>3</sup> hasta 260 m<sup>3</sup>), y solamente en uno de ellos realicé la prueba de articulación para comparar el método objetivo (cuatro de estos recintos tienen la característica de que están diseñados y acondicionados para la comunicación oral principalmente -salón de clases, sala de conferencias- y el otro es para llevar a cabo mediciones acústicas de precisión, que son necesarias en la calibración de sistemas). Algunos de ellos fueron caracterizados para evaluar exclusivamente las distorsiones dependientes de la señal de prueba (como ecos y reverberación) así como el ruido de fondo.

### Equipo de medición

Antes de llevar a cabo cualquier proyecto de medición del sonido es muy importante definir claramente el objetivo. Consecuentemente, se requiere de un programa de medición previamente organizado ya que éste nos va a indicar qué equipo de medición se debe utilizar. También es de suma importancia tomar en consideración que los instrumentos deben calibrarse (con base a normas) antes de comenzar las mediciones, tomando un valor conocido como patrón de referencia.

La característica de la señal de prueba (de voces en este caso), es la consideración más importante cuando se elijan los instrumentos apropiados así como el patrón de calibración, puesto que se conoce que es de banda ancha (aprox. 8 kHz) con amplitud máxima en la banda de octava de 500 Hz y además está modulada en intensidad (amplitud) con frecuencias de modulación desde los 0.63 Hz hasta 12.5 Hz. Por otra parte, en el punto de recepción (escucha), es imprescindible que el instrumento involucrado incluya una red de ponderación en "A" con objeto de simular la respuesta en frecuencia del oído humano en ese punto.

A continuación describo brevemente el equipo empleado en las mediciones.

*Calibrador de nivel sonoro (4230 B&K, BRÜEL AND KJÆR)*

El calibrador de nivel es una fuente sonora de bolsillo operada por batería y diseñado para una calibración de presión inmediata y directa; suministra un nivel de presión de 94 dB (igual a 1 Pa) a 1000 Hz (que es la frecuencia de referencia para las normas internacionales de redes de ponderación). Sin embargo, para las condiciones atmosféricas de la Cd. de México dicho nivel es de 93.4 dB. Cabe hacer la aclaración de que este calibrador es exclusivo para micrófonos del mismo fabricante.



*Fig. 5.1. Calibrador de nivel sonoro.*

*Micrófono de condensador (4165 B&K)*

Para mediciones precisas del sonido, se recomienda<sup>1</sup> el micrófono de condensador porque tiene una respuesta en frecuencia casi uniforme en el rango audible y su sensibilidad se mantiene estable por mucho tiempo. El micrófono seleccionado es un micrófono de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro con una sensibilidad de 50 mV/Pa y una gama de frecuencias de 2.6 Hz-20 kHz, con respuesta en frecuencia de campo libre.

<sup>1</sup>BIES, D.A. / HANSEN, C.H. "Engineering Noise Control", Urwing Hyman, G.B. 1988.



***Preamplificador p/micrófono (2639 B&K)***

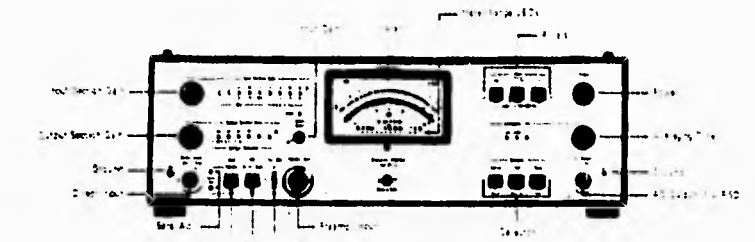
Es el preamplificador correspondiente al micrófono mencionado anteriormente; proporciona una alta impedancia de entrada, relación señal a ruido alta y provee el voltaje necesario para polarizar al micrófono de condensador.

***Amplificador de medición (2610 B&K)***

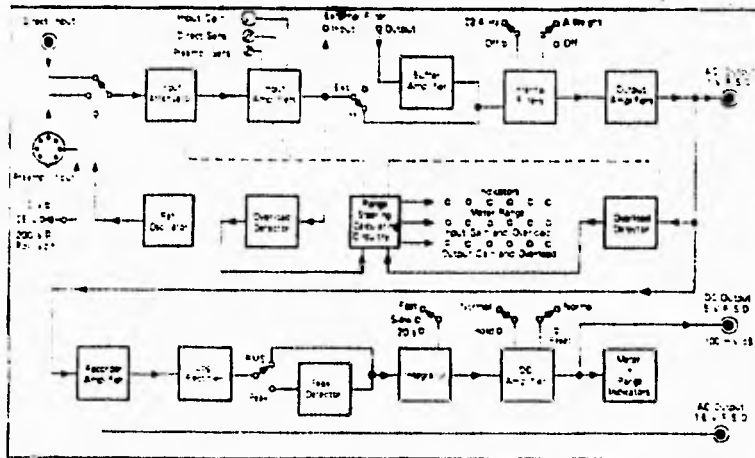
El amplificador 2610 es un voltmetro-amplificador calibrado con una versatilidad extrema, un rango de medición muy amplio y de alta precisión. Proporciona dos entradas alternativas para señales de AC -una entrada directa y una entrada para preamplificador- y ambas tienen una alta impedancia de entrada de  $1\text{ M}\Omega$  en paralelo con  $70\text{ pF}$  y puede manejar voltajes elevados de  $220\text{ V AC}$  ( $50\text{ Hz}$ ) ó  $400\text{ V DC}$ . Incluye dos secciones de ganancia -tanto a la entrada como a la salida-, tres interruptores para filtrado -uno para filtro externo, otro interno (filtro paso altas con frecuencia de corte de  $22.4\text{ Hz}$ ) y uno más con la red de ponderación en "A" de acuerdo con la norma IEC R 651 para sonómetros de precisión-; también incluye una perilla para el tiempo de promediación (integración) con tres posiciones: promediación (en la raíz cuadrática media) rápida, lenta y de 20 segundos.

***Filtro de bandas de octavas (1613 B&K)***

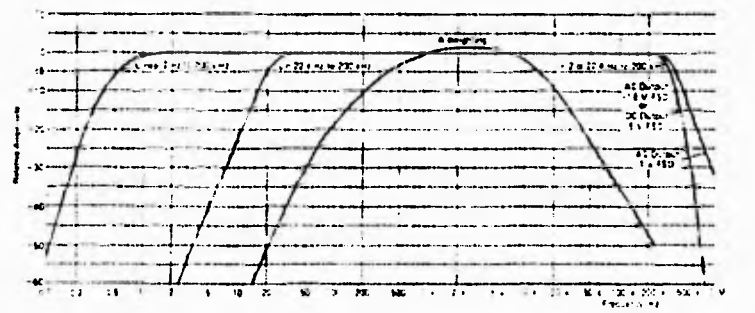
Este filtro contiene 11 filtros pasivos -Chebyshev con 6 polos- por octavas cuyas frecuencias centrales van desde  $31.5\text{ Hz}$  a  $31.5\text{ kHz}$ ; combinando el 1613 con un sonómetro cada filtro cumple con los puntos señalados en las normas IEC Recommendation 225, DIN 46 651 y ANSI S1.11-1966 Class II (ver figura 5.4).



a)

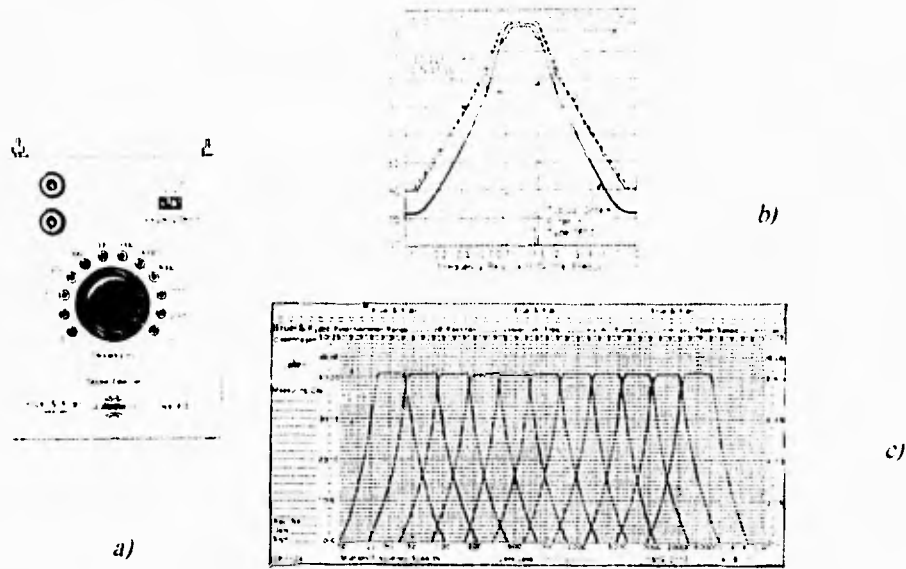


b)



c)

Fig. 5.3. El amplificador de medición B&K-2610. a) panel frontal. b) diagrama de bloques. c) respuesta en frecuencia total del 2610.



*Fig. 5.4. Filtro paso bandas de octavas B&K-1613. a) panel frontal. b) características típicas del filtro de octavas 1613 con las curvas de limitación IEC, DIN y ANSI señaladas. c) características en frecuencia de los 11 filtros de octavas en el 1613.*

#### *Grabadora Digital [Digital Audio Tape - DAT] (DENON)*

Esta grabadora-reproductora de cinta digital tiene un rango dinámico total muy amplio (90 dB), y emplea frecuencias de muestreo (para grabación/reproducción) a 32, 48 y 44.1 kHz. Tiene una respuesta en frecuencia plana desde los 2 Hz hasta los 22 kHz, aproximadamente.



*Grabadora Digital DENON DTR-2000*



*Doble Casetera Estéreo (TECHNICS)*

Esta grabadora reproductora analógica fue empleada en todos los casos para reproducir la señal de voces en una cinta de metal.



*Deck de doble casetera estéreo TECHNICS RS-T922*

*Amplificador de Potencia (PHILIPS)*

Este amplificador de potencia es un amplificador de clase A que suministra 40 Watts RMS por canal a 8 ohms manejando ambos canales y tiene una respuesta en frecuencia desde los 15 Hz hasta los 30 kHz ( $\pm 1$  dB) con no más de 0.2% THD (Total Harmonic Distortion).

*Altavoz (FISHER)*

El altavoz Fisher consta de tres vías: un Woofer de 8", un Midrange de 5" y un Tweeter de 3" de diámetro montadas en un gabinete (caja). Incluye un conducto que une la cavidad interna con la externa dentro del mismo gabinete; tiene una impedancia nominal de 8 $\Omega$  y una respuesta en frecuencia plana (dentro de  $\pm 2.5$  dB) desde los 50 Hz hasta los 20 kHz (en la norma RASTI se sugiere que el patrón de directividad del altavoz a emplear refleje el patrón de directividad de un orador natural).

*Tarjeta de Procesamiento Digital de Señales (DSP32C)*

Esta tarjeta para uso con microcomputadoras (IBM PC, XT, AT ó PS 2 y compatibles) tiene un ambiente que ofrece funciones de procesamiento digital de señales, manejo

automático de archivos, de gráficos y adquisición de señales en tiempo real junto con sus respectivas funciones de procesamiento. El hardware de adquisición (tarjeta LS1-TMS320C25) tiene un solo canal cuyo convertidor (A/D) es de 16 bits y el otro convertidor (D/A) también es de 16 bits; la ganancia tanto en la entrada como en la salida de la función de conversión analógica es activa (valores enteros en el rango de -32768 a 32767 para un (A/D) de 16 bits, -2048 a 2047 para un (A/D) de 12 bits, etc.); la máxima frecuencia de muestreo para esta tarjeta es programable hasta 50 kHz en y desde el disco duro (ambos A/D y D/A). Sin embargo, la tarjeta no tiene filtros "anti-alisantes" (paso-bajas) pero proporciona algunas sugerencias para remediar este problema ([23] Pág. 294).

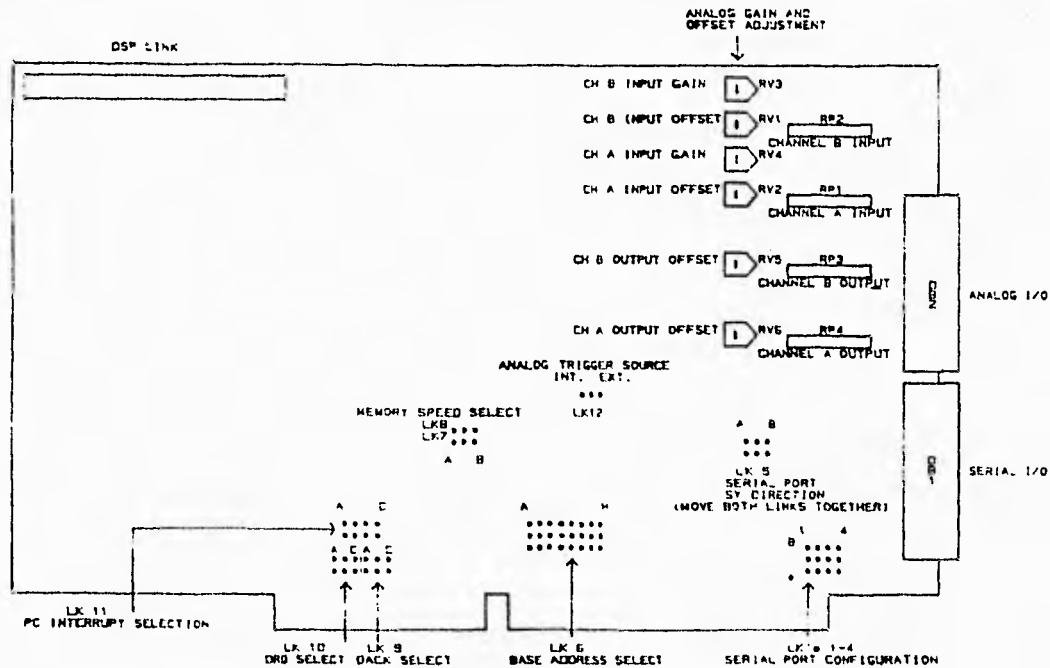


Fig. 5.5. Diagrama interno de la tarjeta DSP32C.

## Recintos

A continuación haré una descripción breve de cada uno de los recintos seleccionados indicando sus dimensiones, características y condiciones, respectivamente; el auditorio del Centro de Instrumentos representó el único caso en que realicé una prueba de articulación.

### Salón de seminarios del laboratorio de acústica

**Dimensiones:** 4.95 m de ancho por 5.30 m de largo y 2.25 m de alto.

**Volumen:** 59.03 m<sup>3</sup> **Área de la superficie:** 98.60 m<sup>2</sup>

**Características:** incluye un pizarrón, un librero, un archivero y cuatro mesas rectangulares con dos asientos cada una; las paredes son de concreto prefabricado y en la parte trasera del recinto se encuentran dos ventanas corredizas. (Ver ilustración)

**Condiciones:** Puerta y ventanas (junto con las cortinas) cerradas, lámparas del cuarto encendidas, una persona adentro.

### Cámara anecoica del laboratorio de acústica

**Dimensiones:** 5.76 m de ancho por 6.82 m de largo y 4.85 m de alto.

**Volumen:** 190.52 m<sup>3</sup> **Área de la superficie:** 200.59 m<sup>2</sup>

**Características:** la cámara anecoica es un recinto que tiene techo, piso y paredes del mismo grueso (es de una sola pieza de concreto armado) aislado físicamente del resto de la construcción (separación entre muros de 0.6 m); está totalmente cubierta (material absorbente) en sus seis paredes con cuñas de hule espuma distribuidas según se ilustra en la figura 5.8; como piso (acústicamente transparente) se tiene una red de rejillas metálicas que está lo suficientemente tensado para soportar cargas de 100 kg en la parte central con una deflexión no muy grande (de 1 a 2 cm). Como se mencionó anteriormente, la cámara está físicamente aislada del resto de la construcción (paredes y techo con doble muro) reposando en 6 soportes que son capaces de absorber o aislar las vibraciones para que la cámara esté libre de esta forma de interferencia que se traduce en sonido de muy bajas frecuencias.

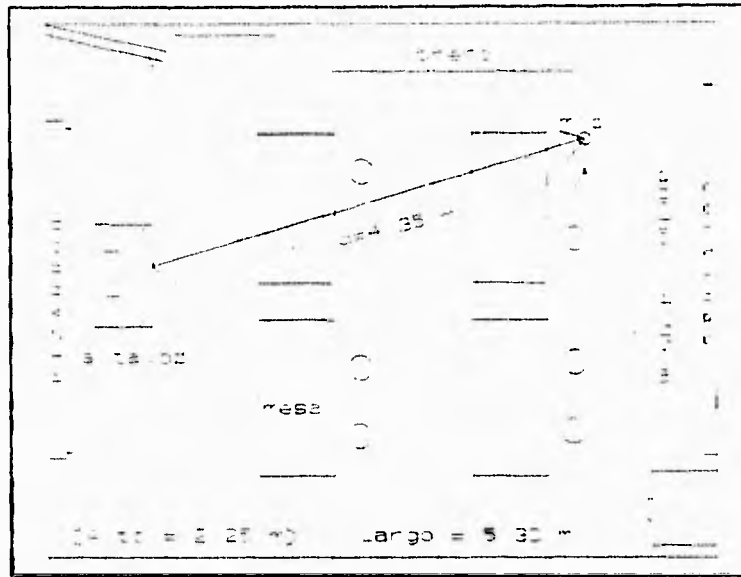


Fig. 5.6 Salón de seminarios del laboratorio de acústica (vista superior).

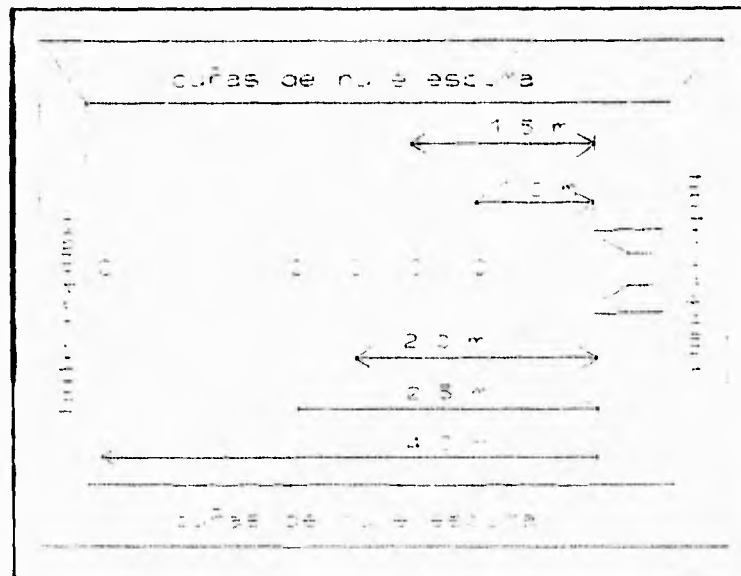
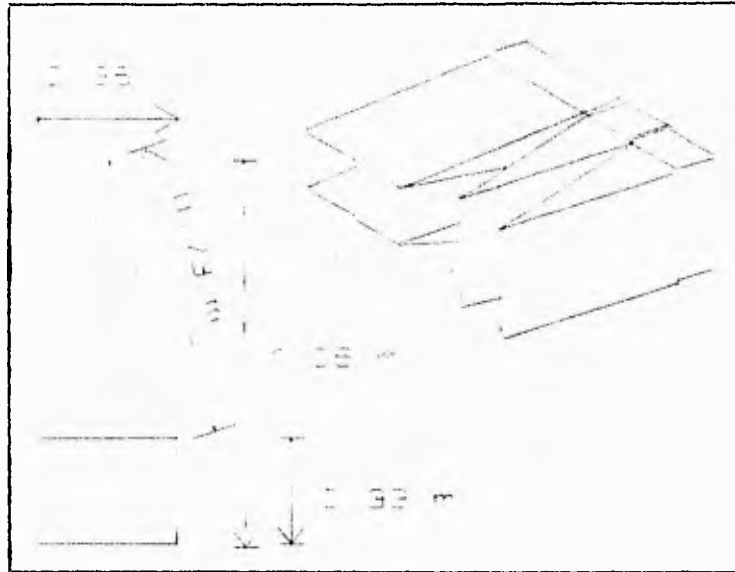


Fig. 5.7 Cámara anecoica del laboratorio de acústica (vista superior).



*Fig. 5.8 Ilustración de las cuñas que cubren en su totalidad la superficie interior de la cámara anecoica del laboratorio de acústica. Las cuñas están colocadas alternadamente como se muestra.*

La puerta de acceso a la cámara es una parte importante del recinto ya que representa un punto débil con respecto al aislamiento; el tamaño de dicha puerta es de 1.20 m de ancho por 1.85 m de alto. El diseño de esta puerta fue un proyecto de desarrollo de esta sección de acústica que requirió una sofisticada planeación y varias pruebas, ya que se tenía contemplado, originalmente, un tipo de puerta deslizable sobre rieles que se empotra a la entrada de la cámara (este tipo de puerta brinda más aislamiento y menos problemas con respecto a la absorción; recuérdese que el aislamiento de la puerta debe ser, teóricamente, del mismo valor que el de la pared). Por último, este recinto incluye un sistema de ventilación que provee un cambio de aire dentro de la cámara sin introducir ruido: dicho sistema cambia el aire interior con una rapidez de 10 a 15 veces por hora.

**Condiciones:** Puerta cerrada, lámpara del cuarto apagada, ninguna persona adentro.

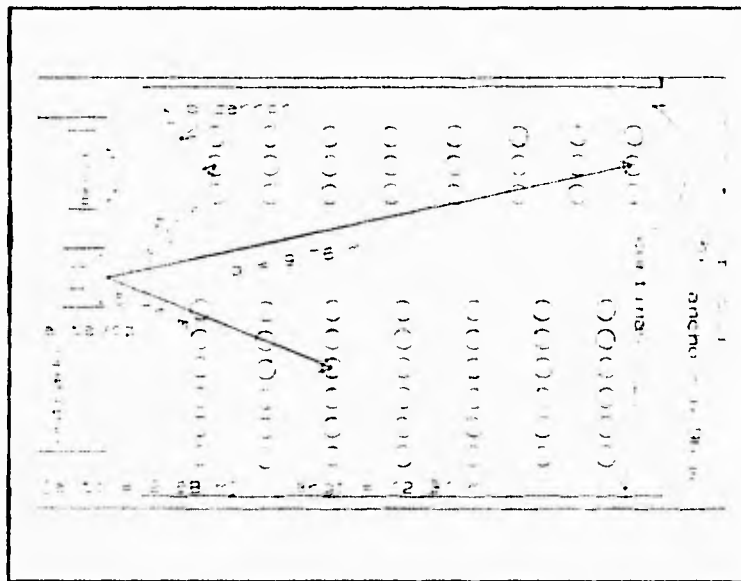
**Auditorio del Centro de Instrumentos**

**Dimensiones:** 6.96 m de ancho por 12.31 m de largo y 2.68 m de alto.

**Volumen:** 229.62 m<sup>3</sup> **Área de la superficie:** 274.64 m<sup>2</sup>

**Características:** hay un pizarrón frente a una de las columnas de asientos, tiene un estrado con una mesa de madera y los asientos son de plástico; las paredes son de madera y las paredes laterales tienen ventanas corredizas a lo largo; las cortinas son persianas de madera verticales y el recinto se encuentra totalmente alfombrado.

**Condiciones:** Puerta y ventanas (junto con las cortinas) cerradas, lámparas del cuarto encendidas en su totalidad, dos personas adentro.



*Fig. 5.9 Auditorio del Centro de Instrumentos (vista superior).*

### Prueba de Articulación

Se llevó a cabo esta prueba en el auditorio del Centro de Instrumentos con la participación de seis voluntarios (cuyas audiometrías, todas ellas aceptables, fueron evaluadas previamente y cuya edad promedio es de 32 años), pertenecientes al personal de este Centro quienes fueron ubicados aleatoriamente a todo lo largo y ancho del recinto; a cada uno de ellos se les entregó un papel (como el mostrado en la figura 5.10) en donde anotaron las combinaciones de los fonemas que les fueron dictados a través de una bocina (dichos fonemas ya habían sido grabados en cinta magnética por un orador que tiene "educada" su voz, es decir, que puede controlar el nivel de voz manteniéndolo constante y que además posee buena articulación).

La norma ([20], Pág. 4) establece que las palabras a usar en la prueba de inteligibilidad deben ser una muestra representativa de los sonidos críticos del habla bajo todas las condiciones de comunicación del diálogo en investigación; asimismo recomienda tres tipos de material de prueba que son: las listas de palabras fonéticamente balanceadas, la prueba de rima modificada y la prueba de rima de diagnóstico. De estos tres criterios se elige solamente uno como material de prueba, y elegí las listas de palabras fonéticamente balanceadas porque son las que se disponen en el laboratorio. (Más adelante muestro cuatro listas, como ejemplo, de palabras fonéticamente balanceadas que se pueden emplear para aplicar dicha prueba. Se recomienda colocar una oración previa antes de cada combinación, como por ejemplo "Usted escuchará *dep*", "A continuación escuchará *to*", etc.)

Durante la evaluación de la prueba adopté la convención de calificar las palabras por sonido y no por ortografía; por ejemplo si "jit" hubiera sido la palabra leída, entonces *jit*, *hit*, y *git* son igualmente correctas. El porcentaje de la inteligibilidad del recinto se obtiene sumando, por cada escucha, el número de combinaciones percibidas correctamente divididas por el número total de éstas y posteriormente se divide por el número de escuchas. El criterio a usar para clasificar el porcentaje obtenido es el que propuso Peutz ([4], Pág 39) y que establece que si la inteligibilidad es mayor o igual al 85 % el recinto posee muy buenas características de inteligibilidad; si la

calificación está entre el 70 y el 85 % se considera que es suficiente y si es menor del 70 % es necesario mejorar las condiciones del recinto.

Listas de palabras monosilábicas sin sentido, fonéticamente balanceadas desarrolladas en el laboratorio de Acústica del Centro de Instrumentos<sup>2</sup>.

Lista 1

BOY	SUS	DON	TI	OL	EG	CA	RAN	PAN	ET
SE	ARI	MA	TRES	GO	TES	LES	ADI	ACA	EPA
TA	DOT	DEC	FLAN	TAM	CI	BUEN	SIL	PIE	ISE
JUEZ	ERA	ENI	SER	POR	CO	DIOS	UNA	EM	ADA
VER	CON	SED	LOR	AN	MO	OM	LI	ERO	LO

Lista 2

NE	SA	ITA	POM	NES	LOD	FI	SIT	ARI	ONI
LAS	YO	BIC	TA	CUAL	TEN	SID	ATE	LE	LES
CO	UNA	SOR	TRES	RE	POR	DE	PAR	CUR	TE
UBA	IPA	UN	DEL	IME	ENE	AD	VO	ARA	GAZ
OMA	ODI	MOS	NOC	NE	JOS	ASE	ER	SER	LOG

<sup>2</sup>Castañeda G. Rosalba, Pérez Ruiz S. J., "Análisis fonético de las listas de palabras de uso más extendido en logaudiometría", ANALES DE OTORRINOLARINGOLOGIA MEXICANA, (Diciembre, Enero y Febrero, 1991), Vol. XXXVI No. 1, México.



Lista 3

OR	AM	KA	AN	FO	TAL	EN	APA	ESA	AME
SAR	ENE	PO	BIAL	AR	DEP	TO	SO	TA	UNA
RE	BE	DEL	OSI	KO	SON	LES	BIEN	NO	DU
UN	COS	SI	TRES	GA	ES	IGO	MIL	CAR	MUY
ERO	DE	KIR	DAD	ICI	JIT	LA	NOS	ER	TE

Lista 4

SI	ADA	MEN	TRAZ	YA	UNA	LER	ACI	KE	MOS
OL	POR	SU	LES	ITO	OCO	PIE	EMO	TEC	TEZ
SO	LIR	FOS	AT	ALO	TEN	DES	ETS	DAD	EG
ACA	VEN	EK	IR	JUEZ	MIR	RAN	ONA	ODA	DAR
ANI	INE	GRIS	PAL	BUEN	UR	SE	OLO	EBA	CON



LABORATORIO DE ACUSTICA  
CENTRO DE INSTRUMENTOS  
U.N.A.M.

Lugar : Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Instrumentos  
 Fecha : 9-1-72 Hora : 12:30  
 Texto No : 3 Distancia r = 4.1 m  
 Nombre : D. Ferrer B. Salinas Cedillo  
 Edad : 3 años

1	ca	am	ca	an	fo
2	tal	en	apa	so	ame
3	zur	ame	po	red	ar
4	det	to	se	tad	una
5	re	ve	del	osi	co
6	son	las	bien	no	du
7	un	cas	si	tres	ga
8	se	igo	mil	lar	muy
9	ero	de	rir	dat	su
10	set	la	nos	er	ted

Fig. 5.10 Muestra de una de las hojas en donde cada escucha anotó las palabras que le fueron leídas.

### Aula 104 de la Facultad de Ingeniería

**Dimensiones:** 7.50 m de ancho por 8.36 m de largo y 3.06 m de alto.

**Volumen:** 191.86 m<sup>3</sup> **Área de la superficie:** 222.46 m<sup>2</sup>

**Características:** Tiene un pizarrón y un estrado en donde hay un escritorio, los asientos son de madera cuya estructura es tubo de fierro y las paredes están construidas con ladrillo refractario; en una de las paredes laterales se tienen, a lo largo, tres ventanas en la parte superior mientras que en el otro lado se tienen cuatro paredes empotradas diagonalmente y en cuyo hueco se pusieron bloques de vidrio traslúcido para hacer la función de tragaluz.

**Condiciones:** Puerta cerrada, una ventana abierta, lámparas del salón encendidas, dos personas adentro.



*Fig. 5.11 Aula 104 de la Facultad de Ingeniería en Cd. Universitaria (vista superior). Distancias desde el altavoz hasta el punto de recepción (zona sombreada): 1) 3.30 m; 2) 5.55 m; y 3) 6.85 m.*

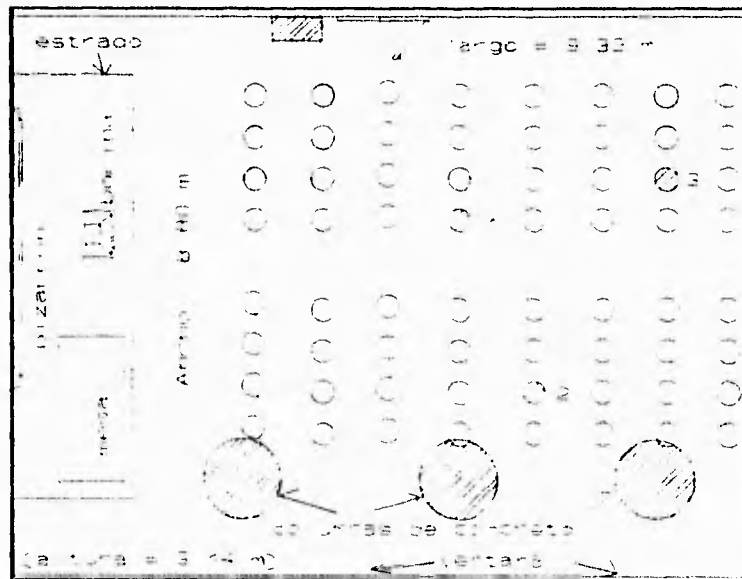
**Aula 111 de la Facultad de Ingeniería**

**Dimensiones:** 8.80 m de ancho por 9.33 m de largo y 3.14 m de alto.

**Volumen:** 257.81 m<sup>3</sup> **Área de la superficie:** 278.06 m<sup>2</sup>

**Características:** Tiene un pizarrón y un estrado en donde hay un escritorio; los asientos son de madera cuya estructura es tubo de fierro y las paredes están construidas con ladrillo refractario; en una de las paredes laterales se tienen seis ventanas en la parte superior mientras que en el otro lado (con vista a la alberca de C.U.) se tiene como pared un ventanal.

**Condiciones:** Puerta cerrada, tres ventanas abiertas por un lado y cuatro por el ventanal, lámparas del salón encendidas, dos personas adentro.

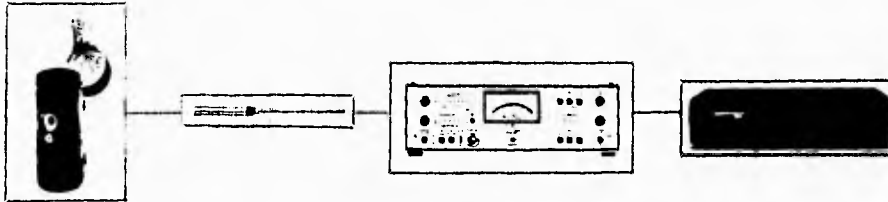


*Fig. 5.12 Aula 111 de la Facultad de Ingeniería en Cd. Universitaria (vista superior). Distancias desde el altavoz hasta el punto de recepción (zona sombreada): 1) 3.74 m; 2) 5.30 m; y 3) 6.55 m.*

## Indices RASTI

A continuación se muestra el diagrama de bloques del método instrumentado y los pasos seguidos posteriormente en el programa de análisis via software<sup>1</sup>.

### 1) Tono de calibración



Controles:

Calibrador:	Tono "93.4 dB re 20 $\mu$ Pa" @ 1000 Hz.
Amplificador de Medición:	Input "PREAMP" Ref. "OFF" Pol. Volt. "200 V" Input Gain "Cal" Filtros "OFF" Promediación "FAST" Detector "NORMAL-RMS" Input Section Gain "10 dB/300 mV" Output Section Gain "10 dB/0.3 V"
Grabadora Digital (DAT):	Graba con: Input level "6"

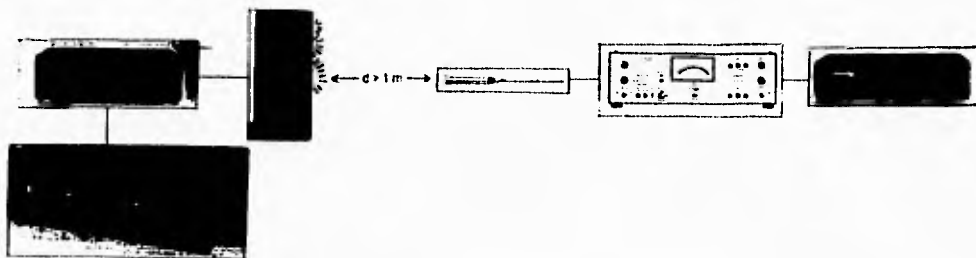
### II) Nivel de referencia



<sup>1</sup>PC-MATLAB (The Matlab Works Inc.) Debido al número de muestras empleado en el análisis, se requiere como mínimo el uso de una IBM-PC 386-SX (ó compatible).

## Controles:

Amplificador:	Se ajusta el nivel de volumen hasta que la aguja del amplificador de medición marque: @ 500 Hz: = 60 dBA @ 2,000 Hz: = 50 dBA
Filtro paso-banda:	Selector en 500 Hz y posteriormente en 2.000 Hz Weighting Switch "ON"
Amplificador de Medición:	Input "PREAMP" Ref. "OFF" Pol. Volt. "200 V" Input Gain "Cal" Filtro Ext. "ON" Filtro A "ON" Filtro 22,4 Hz "OFF" Promediación "SLOW" Detector "NORMAL-RMS" Input Section Gain "10 dB/300 mV" Output Section Gain "40 dB/0.01 V"

III) *Medición de la señal RASTI*

## Controles:

Amplificador:	(Intacto desde el punto II)
Amplificador de Medición:	Input "PREAMP" Ref. "OFF" Pol. Volt. "200 V" Input Gain "Cal" Filtro Ext. "OFF" Filtro A "ON"

Filtro 22.4 Hz "OFF"  
 Promediación "SLOW"  
 Detector "NORMAL-RMS"  
 Input Section Gain "10 dB 300 mV"  
 Output Section Gain "40 dB/0.01 V"

Grabadora Digital (DAT): Graba con: (Intacto desde el punto I)

#### IV) *Muestreo*



Una vez grabada la señal RASTI digitalmente a 44.1 kHz en el punto de recepción y reproducida analógicamente, se muestrea en una PC con la tarjeta DSP32C y dado que la frecuencia máxima del ancho de banda de la señal de voces se conoce que es 8 kHz y que el análisis se presenta por octavas, se elige la frecuencia superior de la banda de octava de 8 kHz (11,200 Hz) como la frecuencia de Nyquist y por consiguiente a 22.4 kHz ( $11,200 \times 2$ ) como la frecuencia mínima de muestreo.

Es importante mencionar que se puede muestrear con una frecuencia mucho menor para reducir el número de muestras usando el criterio siguiente: la señal se filtra externamente con un filtro por octavas en las bandas de 500 y 2,000 Hz respectivamente, y luego se muestrea a 5.6 kHz ( $2,800 \times 2$ ) con lo cual tendríamos 5,600 datos por segundo en vez de los 23,256 datos utilizados originalmente en el mismo intervalo de tiempo para de esta manera reducir considerablemente el espacio ocupado por el archivo de datos; sin embargo el uso de este criterio implica un punto desfavorable, pues se tendría una baja resolución en la reconstrucción de la señal debido al número tan reducido de muestras además de la incomodidad de tener que filtrar previamente la señal antes de proceder a muestrearla.

V) *Análisis*

Ya que la señal haya sido muestreada, almacenada como un archivo en código binario y convertida posteriormente en formato ASCII decimal como un vector columna, se estará en condiciones de trabajar en el ambiente MATLAB para su análisis que permitirá obtener el índice buscado. A continuación se resume el algoritmo del programa empleado y más adelante se muestra una réplica del mismo en su lenguaje original.

Al ejecutar el programa lo primero que es muy importante indicar es lo referente al nivel de la señal RASTI, ya que de la lectura obtenida en la sección de ganancia (tanto a la entrada como a la salida) del amplificador de medición, se tiene que considerar la suma algebraica de las cantidades en dB como la cantidad por atenuar (ó amplificar según sea el caso) a dicha señal y el programa solamente pide este valor.

Ya que la señal RASTI tenga su nivel real se procede a diseñar los filtros de octavas mediante la aproximación Butterworth; para este diseño es necesario especificar la plantilla de diseño y esta parte ya está incluida en el programa para las dos bandas de trabajo. Posteriormente se aplica el proceso de la demodulación que no es más que la multiplicación de la señal modulada por una función coseno -con frecuencia de la portadora- para trasladar el espectro de la función envolvente a su posición original<sup>2</sup> (una vez hecho el producto la señal original se puede recuperar mediante un filtro para bajas frecuencias que permita el paso del espectro hasta la frecuencia superior de la banda limitada). La función envolvente obtenida hasta ahora se eleva al cuadrado para obtener una envolvente correspondiente a la intensidad.

---

<sup>2</sup>HWEI P. HSU "Análisis de Fourier" Addison-Wesley Iberoamericana, 1987. Pags. 156-160  
[Modulación de Amplitud]



Hasta este punto se puede analizar en frecuencia a la función envolvente obtenida, pero existe el inconveniente de que se está trabajando con un vector de  $23,256 \text{ Hz} \times 10.04 \text{ s} = 233,472$  datos<sup>4</sup>, un número considerable para un análisis espectral en MATLAB tanto por el tiempo que llevaría analizarlos como por el espacio en memoria que requerirían; una alternativa para este problema es el uso del método conocido en inglés como *decimation*<sup>5</sup> (re-muestreo). El principio del re-muestreo se origina de la resolución en frecuencia del espectro de la transformada de Fourier (dado por  $\Delta f = f_s / n$ , donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo y  $n$  el número de muestras) y lo que hace es re-muestrear la secuencia del vector en  $1/n$  veces la frecuencia de muestreo original; así el vector re-muestreado resultante es  $n$  veces más corto.

Por último, se llega al análisis en frecuencias por 1/3 de octava. Una vez obtenido el valor promedio de la función envolvente (que va a servir para normalizar al espectro de la envolvente), se generan 9 filtros paso-banda en 1/3 de octava (cuatro para la banda de 500 Hz y cinco para la banda de 2 kHz), se filtra a la envolvente empleando a cada uno de estos nueve filtros, se le aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) y se obtiene un vector para cada banda de trabajo, el cual se normaliza para producir el índice de modulación en función de la frecuencia de modulación. Para calcular el valor RASTI se necesita la razón de los índices de modulación -de la señal transmitida (distorsionada) y de la señal original- y, una vez obtenido el RASTI (cuyo valor siempre será menor a 1), se determina la escala subjetiva de inteligibilidad que corresponde tanto a ese valor como a esa posición del escucha en particular.

A continuación se presenta el programa diseñado en MATLAB (se presenta en dos partes, uno como INDICES.M y el otro como RASTI.M) para el análisis mencionado anteriormente.

---

<sup>4</sup>La duración del intervalo de tiempo durante el cual se presenta el análisis de la señal de prueba tiene una marcada influencia en la exactitud del valor RASTI; para este caso se emplean 10 segundos de duración pero se ha encontrado que puede variar desde 8 hasta 32 segundos. (ver pág. 20 del siguiente capítulo)

<sup>5</sup>Bradley, J.S. "Auditorium acoustics measures from pistol shots", J. Acoust. Soc. Am. 80 (1), July 1986, Págs 201-202.

5-26

```
% PROGRAMA INDICES.M

% ESTE PROGRAMA CARGA, FILTRA EN
OCTAVAS (A 500 Y 2000 Hz) Y DEMODULA
LA SEÑAL RASTI (TANTO ORIGINAL COMO
DISTORSIONADA) PARA OBTENER LOS
INDICES DE MODULACION

clear, clg;

x=input('¿Desplegar gráficas? [s/n] (s) : ','s');
if isempty(x)
    x='s';
end
duda=input('Señal (O)riginal o (D)istorsionada? (d) : ','s');
if isempty(duda)
    duda='d';
end
k=input('Ganancia/Atenuación [dB] : ');k=(10)^(k/20);
load voces.m;

% UNA VEZ CARGADO EL ARCHIVO SE
PROCEDE A ELIMINAR EL ENCABEZADO
DEL MISMO Y A LA GANANCIA APLICADA

voces=(voces*(11.233482)^5)/(32767*k);clear k

% DISEÑO Y ELABORACION DE LOS FILTROS
PASO BANDA POR OCTAVAS (DE 6º ORDEN)

% A 500 Hz

Wp=[355 710]/11628,Ws=[105 290]/11628;
[n,Wn]=buttord(Wp,Ws,3,30),[b,a]=butter(6,Wn);
se_500=filter(b,a,voces);

% A 2,000 Hz

Wp=[1400 2800]/11628,Ws=[400 1200]/11628;
[n,Wn]=buttord(Wp,Ws,3,30),[b,a]=butter(6,Wn);
se_2k=filter(b,a,voces);

clear a b Wn voces

% SE DEMODULA LA SEÑAL (DETECCION DE
ENVOLVENTE)

t=(0:(1/23256):10.03917269)';
y_500=cos(2*pi*500*t) y_2k=cos(2*pi*2000*t);

se_500=(se_500)*(y_500);se_2k=(se_2k)*(y_2k);

clear y_500 y_2k t;

% DISEÑO Y ELABORACION DE UN FILTRO
PASO BAJAS CON FRECUENCIA DE CORTE
= 50 Hz (DE 5º ORDEN)

[n,Wn]=buttord(50/11628,100/11628,3,30);
[b,a]=butter(5,Wn);
se_500=filter(b,a,se_500);se_2k=filter(b,a,se_2k);

clear a b n Wn

% SE ELEVA AL CUADRADO PARA OBTENER
LA INTENSIDAD

se_500=(se_500)^(2);se_2k=(se_2k)^(2);

% AHORA SE RE-MUESTREAN AMBAS
SEÑALES FILTRADAS

y_500=decimate(se_500,57,'FIR');
y_2k=decimate(se_2k,57,'FIR');

if (x=='s' | x=='S')
    subplot(211),plot(se_500(1:81340));
    title('Señal filtrada en oct. de 500 Hz');
    subplot(212),plot(y_500(1:1427));
    title('Señal filtrada en oct. de 500 Hz
(re-muestreada)');

    pause, clg;
    subplot(211),plot(se_2k(1:81340));
    title('Señal filtrada en oct. de 2 kHz');
    subplot(212),plot(y_2k(1:1427));
    title('Señal filtrada en oct. de 2 kHz
(re-muestreada)');
    pause;
end

clear se_500 se_2k

if (duda=='o' | duda=='O')
    med_500=(23240/(57*4096));
    med_500=med_500*sum(abs(y_500)^(57/23240));
    med_2k=(23240/(57*4096));
    med_2k=med_2k*sum(abs(y_2k)^(57/23240));
    save med m med_500 med_2k;
end
```

```

if (duda=='d'|duda=='D')
    load med.m
end

Fs=(23240/57)/2;
f=((23240/57)*(1:2048)/4096);

% FRECUENCIAS LIMITES EN TERCIAS DE
OCTAVA

f1=[0.9 1.8 3.55 7.10 0.6236 1.2473 2.4945 4.9890
9.9781];

f2=[1.12 2.24 4.5 9.0 0.7857 1.5714 3.1429 6.2858
12.5716];

F=[f(10) f(20) f(40) f(80) f(7) f(14) f(28) f(56) f(113)];
fban=[f1 f2];

for cnt=1:9;
    Wn=fban(cnt,:)/Fs;
    [b,a]=butter(2,Wn);
    sal_500=filter(b,a,y_500);
    sal_2k=filter(b,a,y_2k);
    Y_500=abs(fft(sal_500,4096))*2/4096;
    Y_2k=abs(fft(sal_2k,4096))*2/4096;
    if (cnt<=4),
        Pxx(:,cnt)=Y_500;
    else
        Pxx(:,cnt)=Y_2k;
    end
end

clear cnt sal_500 sal_2k Y_500 Y_2k Wn a b Fs f1 f2

Pxx=Pxx(1:2048,:);

Pxx(:,1:4)=10*log10(Pxx(:,1:4)/med_500);
Pxx(:,5:9)=10*log10(Pxx(:,5:9)/med_2k);

P500=[Pxx(10,1) Pxx(20,2) Pxx(40,3) Pxx(80,4)];
if (x=='s'|x=='S')
    clg
    plot(F(1:4),P500, '*')
    xlabel('Frecuencia [Hz]')
    ylabel('dB')
    title('Banda de oct de 500 Hz [dB]')
    grid
    pause
end

P2k=[Pxx(7,5) Pxx(14,6) Pxx(28,7) Pxx(56,8)
Pxx(113,9)];
if (x=='s'|x=='S')
    plot(F(5:9),P2k, '*')
    xlabel('Frecuencia [Hz]')
    ylabel('dB')
    title('Banda de oct. de 2 kHz [dB]')
    grid
end

clear f fban Pxx x med_500 med_2k

m500=(10)^(P500/20);m2k=(10)^(P2k/20);

if (duda=='o'|duda=='O'),
    Pxx_500=P500;Pxx_2k=P2k;
    m_500=m500;m_2k=m2k;
end

if (duda=='d'|duda=='D'),
    Pxxr_501=P500;Pxxr1_2k=P2k;
    mr_501=m500;mr1_2k=m2k;
    % Pxxr_502=P500;Pxxr2_2k=P2k;
    % mr_502=m500;mr2_2k=m2k;
    % Pxxr_503=P500;Pxxr3_2k=P2k;
    % mr_503=m500;mr3_2k=m2k;
    % Pxxr_504=P500;Pxxr4_2k=P2k;
    % mr_504=m500;mr4_2k=m2k;
end

clear duda m500 m2k P500 P2k

return

```

5-28

```
% PROGRAMA RASTI.M
% ESTE PROGRAMA OBTIENE EL INDICE
% RASTI UNA VEZ CONOCIDOS LOS INDICES
% DE MODULACION TANTO DE LA SEÑAL
% ORIGINAL COMO DE LA DISTORSIONADA
```

```
resp=input('¿ Señal receptora número? [1] : ');
```

```
if isempty(resp)
```

```
    resp=1;
```

```
end
```

```
if (resp==1),
```

```
    m500=m_500;m501=mr_501;
```

```
    m2k=m_2k;m2kr=mr1_2k;
```

```
end
```

```
if (resp==2),
```

```
    m500=m_500;m501=mr_502;
```

```
    m2k=m_2k;m2kr=mr2_2k;
```

```
end
```

```
if (resp==3),
```

```
    m500=m_500;m501=mr_503;
```

```
    m2k=m_2k;m2kr=mr3_2k;
```

```
end
```

```
if (resp==4),
```

```
    m500=m_500;m501=mr_504;
```

```
    m2k=m_2k;m2kr=mr4_2k;
```

```
end
```

```
m500=m500/0.4;m501=m501/0.4;
```

```
m2k=m2k/0.32;m2kr=m2kr/0.32;
```

```
plot(F(1:4),m500,F(1:4),m501,':')
```

```
title('Índice de modulación')
```

```
ylabel('m')
```

```
xlabel('Frecuencia [Hz] (Banda de oct. 500 Hz)')
```

```
pause
```

```
plot(F(5:9),m2k,F(5:9),m2kr,':')
```

```
title('Índice de modulación')
```

```
ylabel('m')
```

```
xlabel('Frecuencia [Hz] (Banda de oct. 2 kHz)')
```

```
pause
```

```
plot(F(1:4),m500,F(1:4),m501,F(5:9),m2k,F(5:9),m2kr)
```

```
title('Índice de modulación')
```

```
ylabel('m')
```

```
xlabel('Frecuencia [Hz] (Ambas bandas de oct.)')
```

```
pause
```

```
m5=m501 m500,m2=m2kr./m2k
```

```
for cnt=1:4,
```

```
    if m5(cnt)>=1,
```

```
        m5(cnt)=0.9690;
```

```
    end
```

```
    if m5(cnt)<=0,
```

```
        m5(cnt)=0.0310;
```

```
    end
```

```
end
```

```
for cnt=1:5,
```

```
    if m2(cnt)>=1,
```

```
        m2(cnt)=0.9690;
```

```
    end
```

```
    if m2(cnt)<=0,
```

```
        m2(cnt)=0.0310;
```

```
    end
```

```
end
```

```
plot(F(1:4),m5)
```

```
title('Factor de reducción de modulación')
```

```
ylabel('m')
```

```
xlabel('Frecuencia [Hz] (Banda de oct. 500 Hz)')
```

```
pause
```

```
plot(F(5:9),m2)
```

```
title('Factor de reducción de modulación')
```

```
xlabel('Frecuencia [Hz] (Banda de oct. 2 kHz)')
```

```
pause
```

```
plot(F(1:4),m5,F(5:9),m2,':')
```

```
title('Factor de reducción de modulación')
```

```
ylabel('m')
```

```
xlabel('Frecuencia [Hz]')
```

```
pause
```

```
m=[m5' m2'];
```

```
snapp=10*log10(m./(1-m));
```

```
for cnt=1:9,
```

```
    if (snapp(cnt)>15)
```

```
        snapp(cnt)=15;
```

```
    end
```

```
    if (snapp(cnt)<(-15))
```

```
        snapp(cnt)=(-15);
```

```
    end
```

```
end
```

```
RASTI=(mean(snapp)+15)/30;
```

```
if (RASTI<=0.3),
    escala='MALO (0 a 0.3)';
end
if (RASTI>0.3 & RASTI<=0.45),
    escala='POBRE (0.3 a 0.45)';
end
if (RASTI>0.45 & RASTI<=0.6),
    escala='ACEPTABLE (0.45 a 0.6)';
end
if (RASTI>0.6 & RASTI<=0.75),
    escala='BUENO (0.6 a 0.75)';
end
if (RASTI>0.75 & RASTI<=1),
    escala='EXCELENTE (0.75 a 1)';
end

sprintf('RASTI ==> %g ',round(RASTI*100)/100)
fprintf(escala)
fprintf('\n\n')

clear m500 m2k m5 m2 m501 m2kr
clear m snapp ans cnt resp escala RASTI

return
```

# Capítulo

# 6

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Intervalos de calificación .....	6-2
I) Salón de seminarios del laboratorio de acústica .....	6-2
II) Cámara anecoica del laboratorio de acústica .....	6-5
III) Auditorio del Centro de Instrumentos .....	6-7
IV) Aula 104 de la Facultad de Ingeniería .....	6-10
V) Aula 111 de la Facultad de Ingeniería .....	6-12
Discusión de resultados .....	6-14
Consideraciones hechas en la instrumentación del método .....	6-16
Análisis de errores .....	6-17
Conclusiones y recomendaciones .....	6-20

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### Intervalos de calificación

Se presentan los resultados obtenidos en cada una de las mediciones realizadas incluyendo también las gráficas del índice de modulación (tanto para la señal sin transmitir como para la señal recibida) y del factor de reducción en cada una de las posiciones elegidas; los intervalos de calificación (Malo ... Excelente) se basan en un amplio estudio ([9] Pag. 196, Sec 6.2, "*RASTI and articulation-test results*") que involucra varias pruebas de inteligibilidad en varios idiomas. En esta tesis los valores STI fueron obtenidos por una instrumentación del método RASTI a través de una PC (386 SX-25 MHz) y los intervalos de calificación proveen una guía para la interpretación de las mediciones STI llevadas a cabo. A continuación se muestran dichos intervalos:

0.00	≤	STI	≤	0.30	(MALO)
0.30	<	STI	≤	0.45	(POBRE)
0.45	<	STI	≤	0.60	(ACEPTABLE)
0.60	<	STI	≤	0.75	(BUENO)
0.75	<	STI	≤	1.00	(EXCELENTE)

#### 1) *Salón de Seminarios del Laboratorio de Acústica*

Distancia medida:  $R_1 = 1.0$  m  
 Índice STI obtenido: **0.76**  
 Escala subjetiva: **EXCELENTE**

Distancia medida:  $R_2 = 4.35$  m  
 Índice STI obtenido: **0.59**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

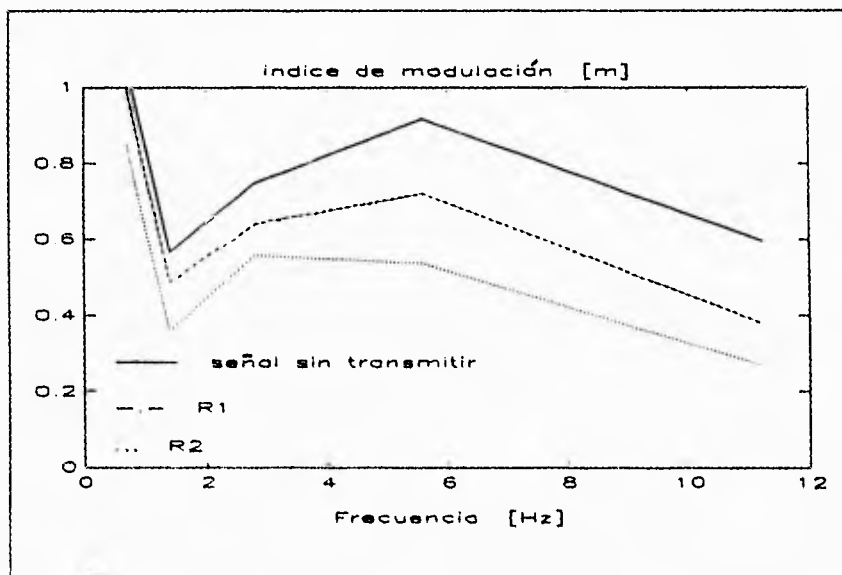
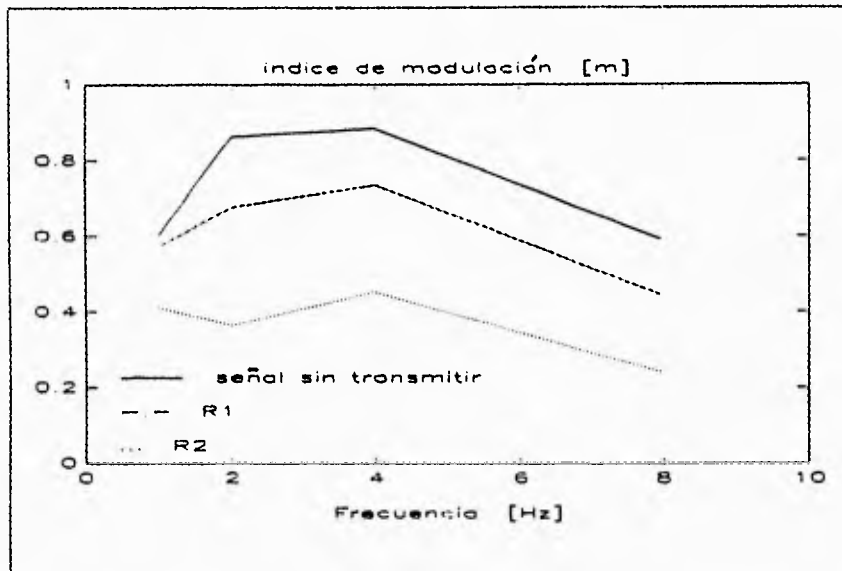


Fig. 6.1. Gráficas de los índices de modulación en el salón de seminarios para las bandas de 500 Hz (fig. superior) y 2.000 Hz (fig. inferior), para las señales sin transmitir y recibida



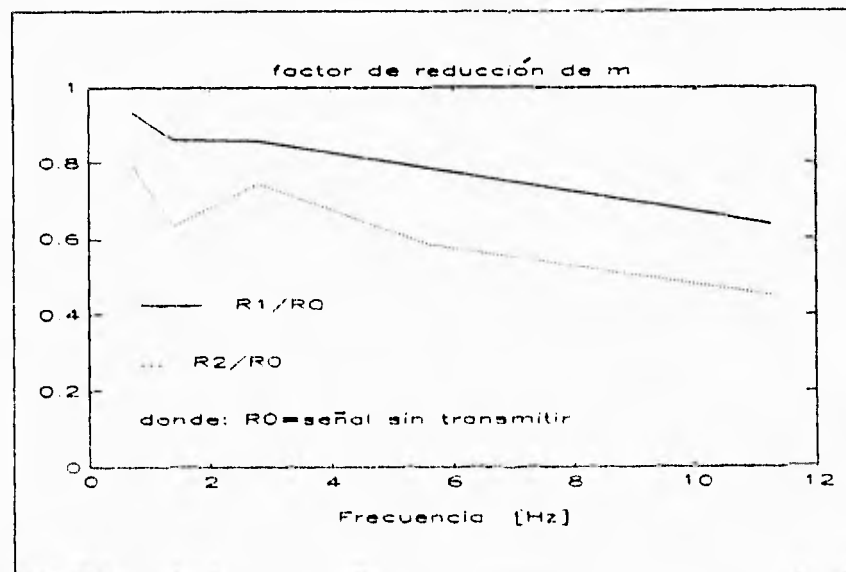
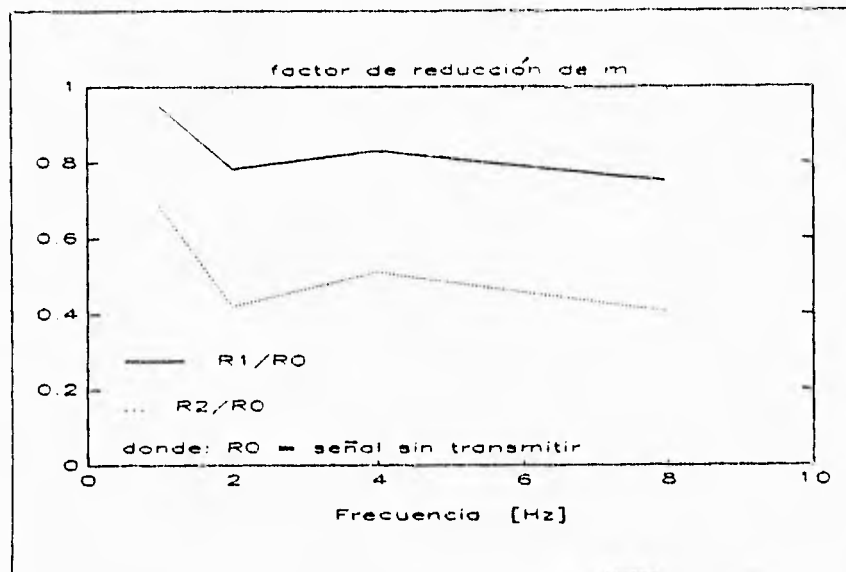


Fig. 0.2 Gráficas del factor de reducción del índice de modulación en el salón de seminarios para las bandas de 500 Hz: (fig superior) y 2,000 Hz: (fig inferior)

## II) Cámara Anecoica del Laboratorio de Acústica

Distancia medida:  $R_1=1.0$  m  
 Índice STI obtenido: **0.86**  
 Escala subjetiva: **EXCELENTE**

Distancia medida:  $R_2=2.5$  m  
 Índice STI obtenido: **0.42**  
 Escala subjetiva: **POBRE**

Distancia medida:  $R_3=1.5$  m  
 Índice STI obtenido: **0.64**  
 Escala subjetiva: **BUENO**

Distancia medida:  $R_4=4.0$  m  
 Índice STI obtenido: **0.31**  
 Escala subjetiva: **POBRE**

Distancia medida:  $R_5=2.0$  m  
 Índice STI obtenido: **0.49**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

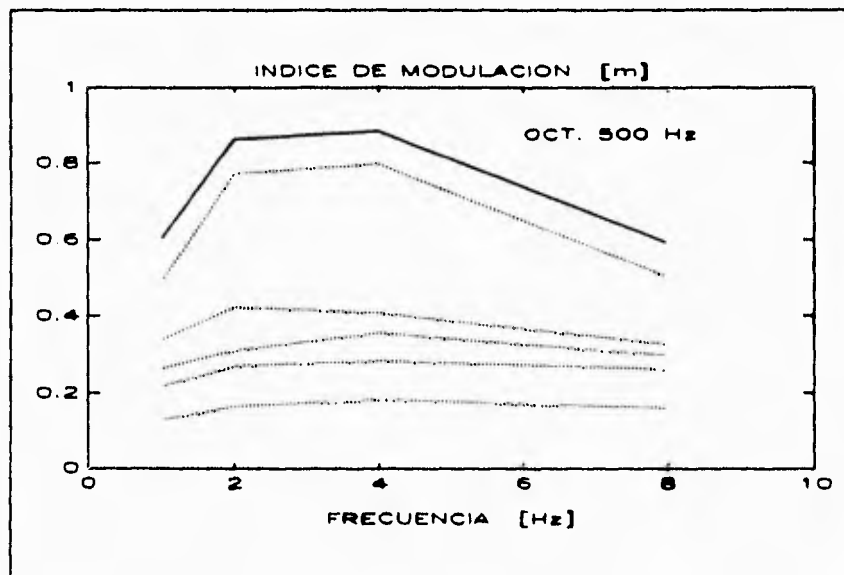


Fig. 6.3. Gráfica del índice de modulación en la cámara anecoica para la banda de 500 Hz. tanto para la señal sin transmitir (línea continua) como para las señales recibidas (líneas punteadas). Las distancias en la recepción -líneas punteadas en orden decreciente- son 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 4.0 metros, respectivamente.

6.6

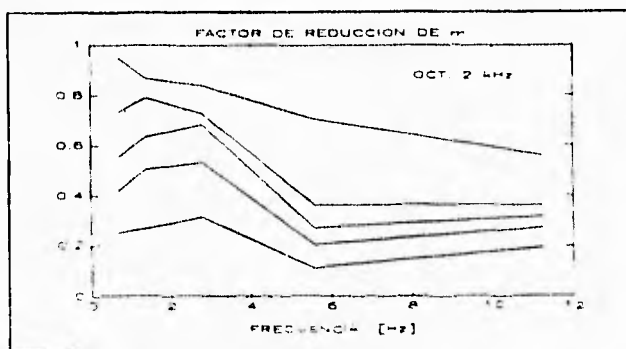
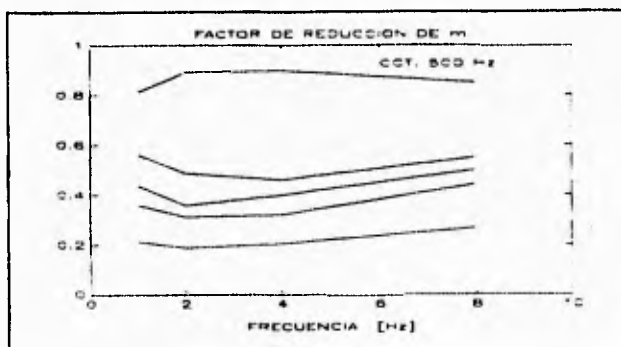
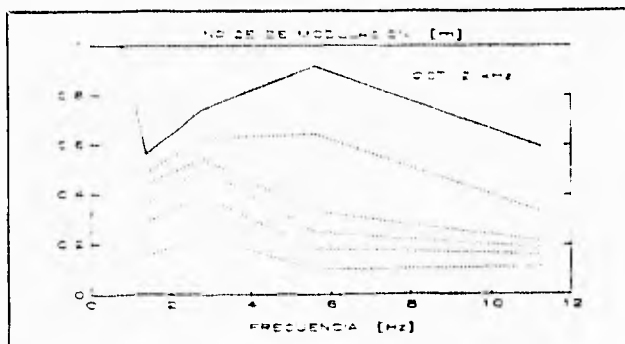


Fig. 6.4. (Fig. superior) Gráfica del índice de modulación en la banda de 2 kHz. (Figs. central e inferior) Gráficas del factor de reducción del índice de modulación para las bandas de 500 Hz y 2 kHz, respectivamente.

## III) Auditorio del Centro de Instrumentos

Distancia medida:  $R_1=1.0$  m  
 Índice STI obtenido: **0.82**  
 Escala subjetiva: **EXCELENTE**

Distancia medida:  $R_2=5.11$  m  
 Índice STI obtenido: **0.54**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

Distancia medida:  $R_3=3.92$  m  
 Índice STI obtenido: **0.58**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

Distancia medida:  $R_4=9.76$  m  
 Índice STI obtenido: **0.47**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

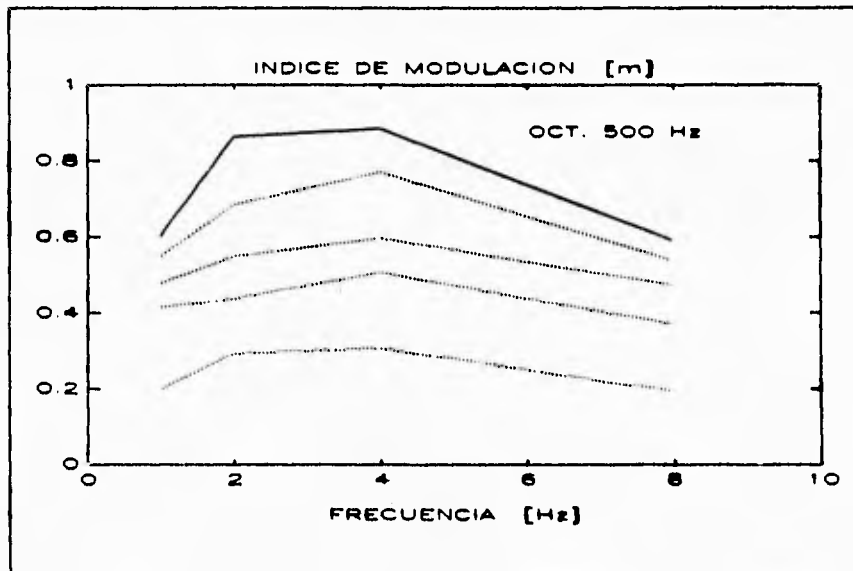
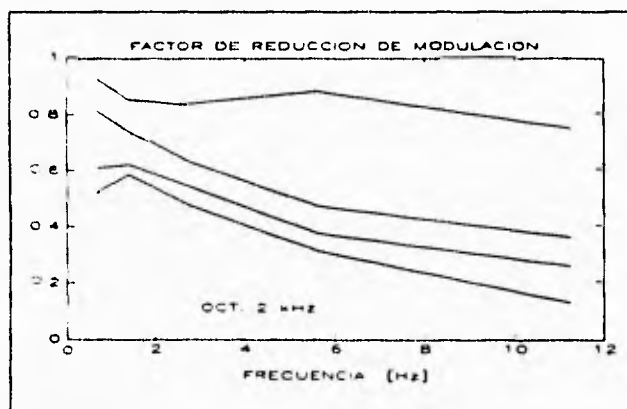
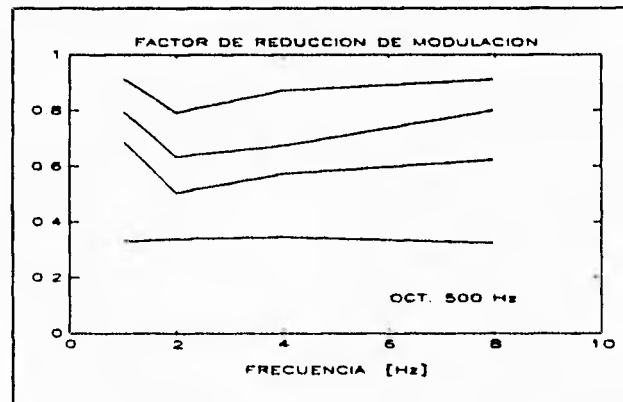
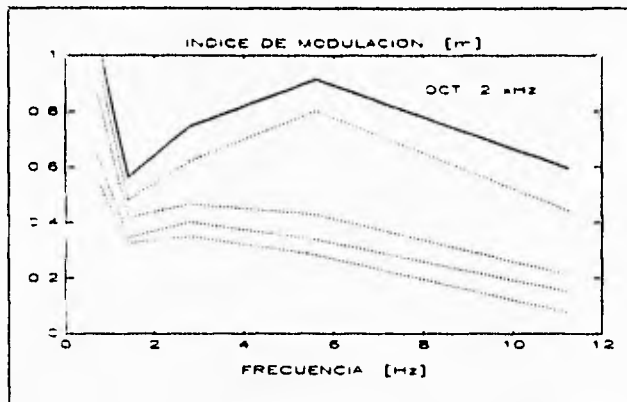


Fig. 6.5. Gráfica de los índices de modulación en el auditorio para la banda de 500 Hz (las líneas punteadas, en orden decreciente, indican las distancias de los puntos de recepción  $R_1$  a  $R_5$ ). Página posterior: en la gráfica superior se muestran los índices de modulación para la banda de 2 kHz; en la gráfica central el factor de reducción del índice de modulación (como una función de la frecuencia de modulación) para la banda de 500 Hz y en la gráfica inferior la misma reducción pero para la banda de 2 kHz.



Los resultados obtenidos en la prueba de articulación son: (F-E: Fuente-Escucha)

Distancia F-E: **5.18 m** (Sujeto D1)  
 Porcentaje de inteligibilidad: **100 %**  
 Escala de inteligibilidad: **MUY BUENA**

Distancia F-E: **6.35 m** (Sujeto D2)  
 Porcentaje de inteligibilidad: **92 %**  
 Escala de inteligibilidad: **MUY BUENA**

Distancia F-E: **6.36 m** (Sujeto D3)  
 Porcentaje de inteligibilidad: **92 %**  
 Escala de inteligibilidad: **MUY BUENA**

Distancia F-E: **7.96 m** (Sujeto D4)  
 Porcentaje de inteligibilidad: **88 %**  
 Escala de inteligibilidad: **MUY BUENA**

Distancia F-E: **9.29 m** (Sujeto D5)  
 Porcentaje de inteligibilidad: **84 %**  
 Escala de inteligibilidad: **MUY BUENA**

Distancia F-E: **9.76 m** (Sujeto D6)  
 Porcentaje de inteligibilidad: **92 %**  
 Escala de inteligibilidad: **MUY BUENA**

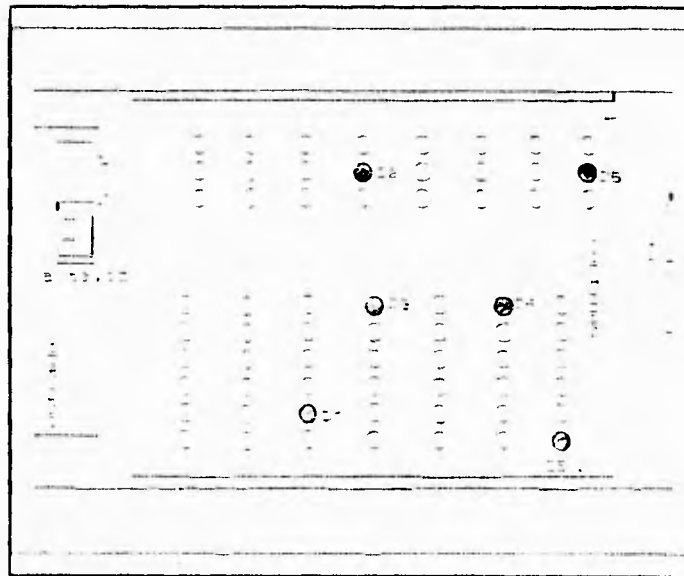


Fig. 6.6. Prueba de articulación llevada a cabo en el auditorio del Centro de Instrumentos.

IV) *Aula 104 de la Facultad de Ingeniería*

Distancia medida:  $R_1=1.0$  m  
 Índice STI obtenido: **0.73**  
 Escala subjetiva: **BUENO**

Distancia medida:  $R_3=5.55$  m  
 Índice STI obtenido: **0.55**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

Distancia medida:  $R_2=3.30$  m  
 Índice STI obtenido: **0.65**  
 Escala subjetiva: **BUENO**

Distancia medida:  $R_4=6.85$  m  
 Índice STI obtenido: **0.62**  
 Escala subjetiva: **BUENO**

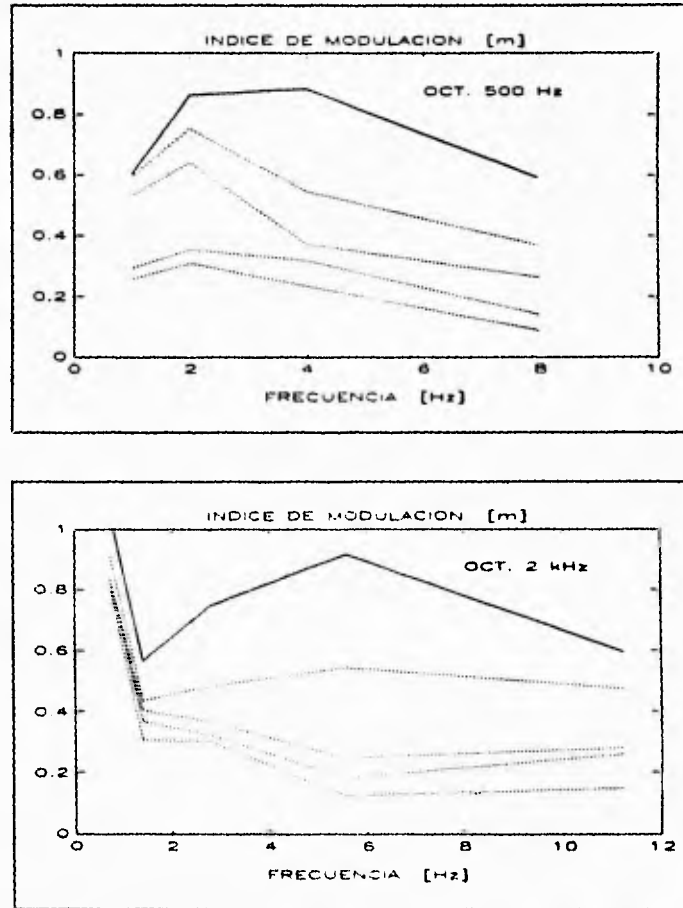


Fig. 6.7. Gráficas de los índices de modulación para el aula 104: (línea continua: señal sin transmitir).

IV) *Aula 104 de la Facultad de Ingeniería*

Distancia medida:  $R_1=1.0$  m  
 Índice STI obtenido: **0.73**  
 Escala subjetiva: **BUENO**

Distancia medida:  $R_2=5.55$  m  
 Índice STI obtenido: **0.55**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

Distancia medida:  $R_3=3.30$  m  
 Índice STI obtenido: **0.65**  
 Escala subjetiva: **BUENO**

Distancia medida:  $R_4=6.85$  m  
 Índice STI obtenido: **0.62**  
 Escala subjetiva: **BUENO**

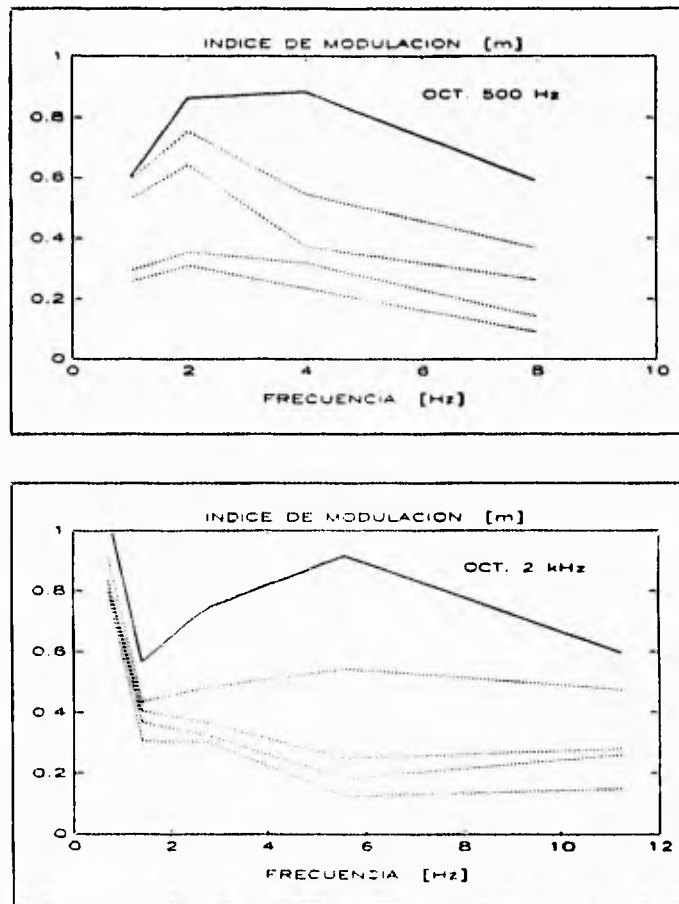


Fig. 6.7. Gráficas de los índices de modulación para el aula 104: (línea continua: señal sin transmitir).



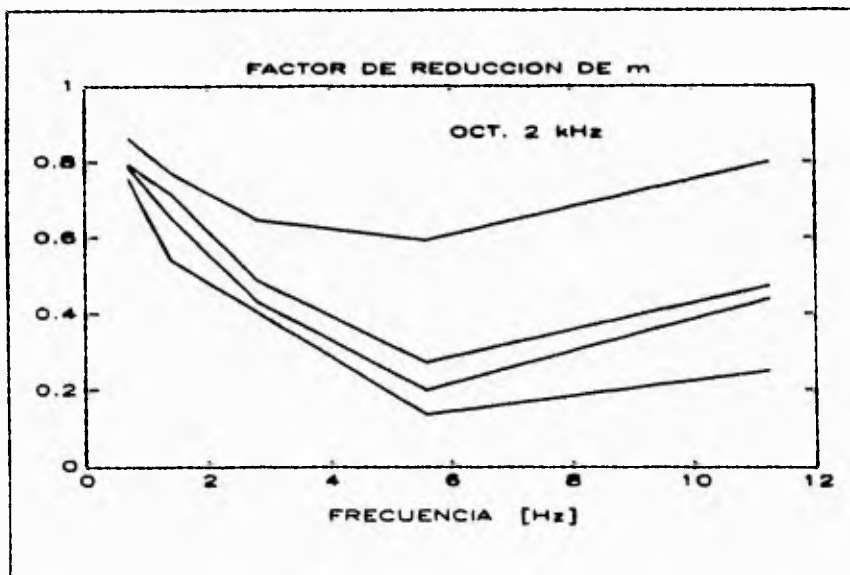
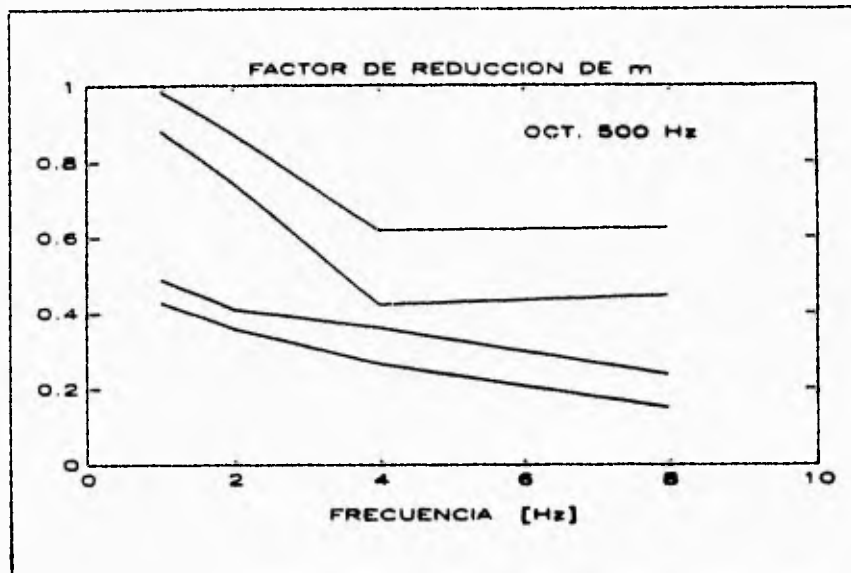


Fig. 6.8. Gráficas de los factores de reducción de los índices de modulación para el aula 104

V) *Aula 111 de la Facultad de Ingeniería*

Distancia medida:  $R_1=1.0$  m  
 Índice STI obtenido: **0.7**  
 Escala subjetiva: **BUENO**

Distancia medida:  $R_1=5.30$  m  
 Índice STI obtenido: **0.52**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

Distancia medida:  $R_2=3.74$  m  
 Índice STI obtenido: **0.56**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

Distancia medida:  $R_1=6.55$  m  
 Índice STI obtenido: **0.58**  
 Escala subjetiva: **ACEPTABLE**

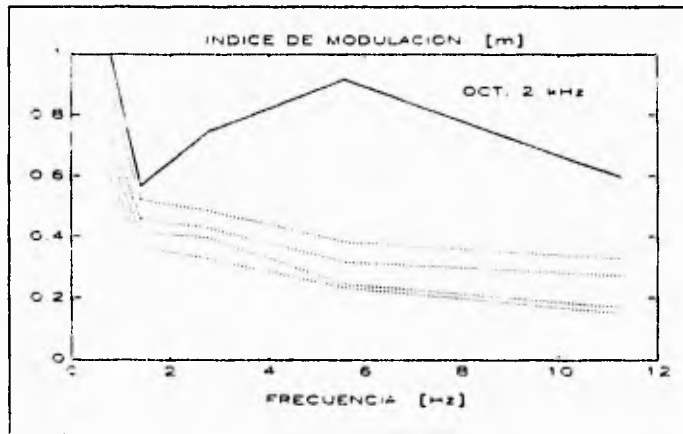
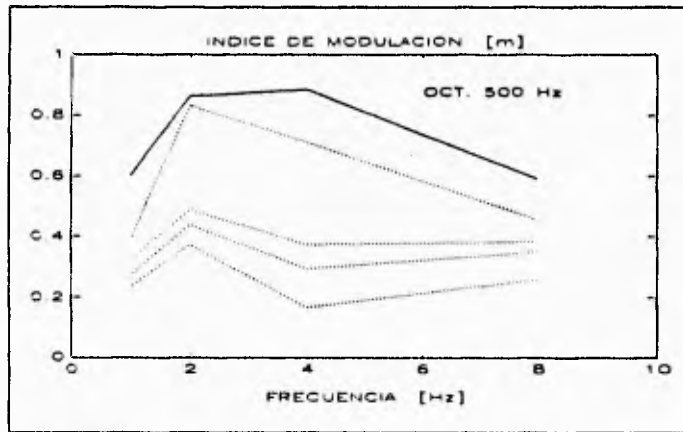


Fig. 6.9. Gráficas de los índices de modulación para el aula 111: (línea continua: señal sin transmitir).

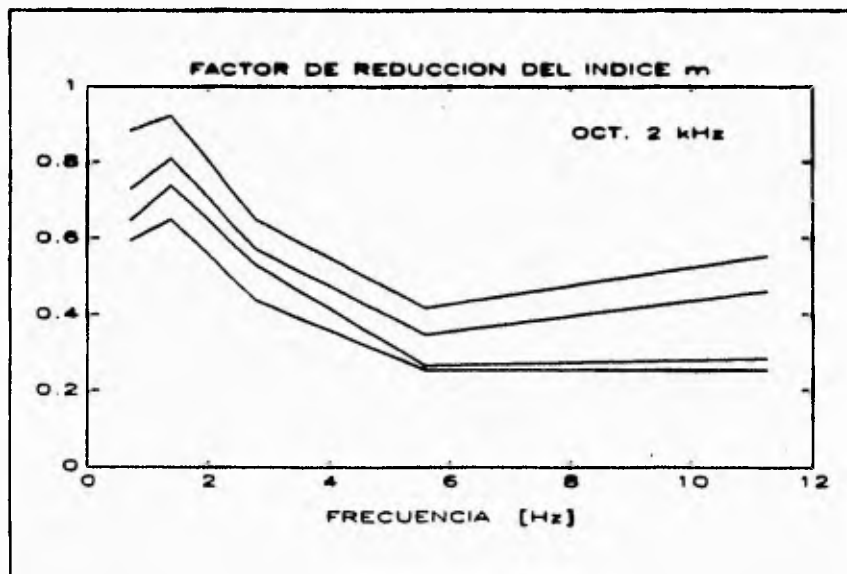
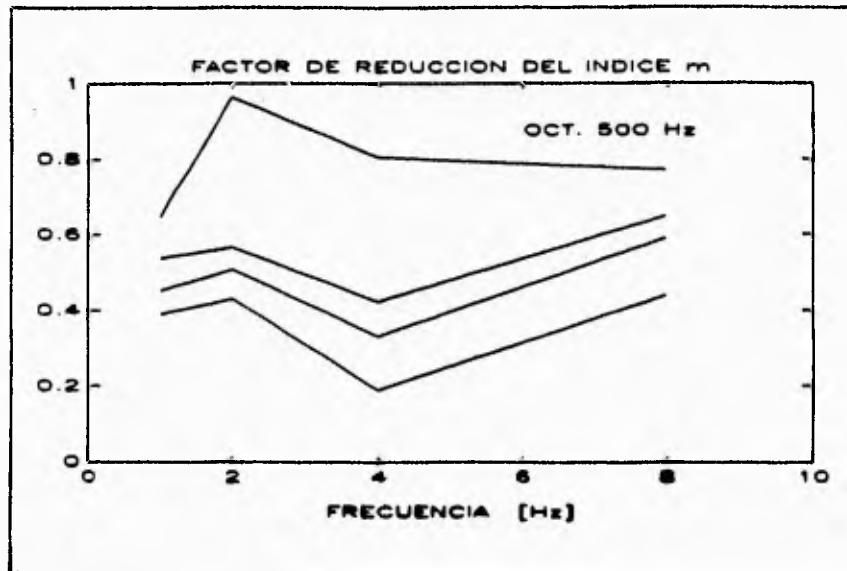


Fig. 6.10. Gráficas de los factores de reducción del índice de modulación para el aula 111.

	Nº de puntos de medición	Volumen (m <sup>3</sup> )	$\bar{T}_m$ [s]	índice STI
Salón de seminarios	2	59.03	1.2	0.68
Cámara anecoica	5	190.52	X	0.54
Auditorio CIUNAM	4	229.62	1.4	0.60
Aula 104	4	191.86	X	0.64
Aula 111	4	257.81	2.0	0.59

#### Discusión de resultados

En las gráficas de los factores de reducción obtenidos se nota claramente el efecto de la reverberación del recinto sobre el índice de modulación, ya que aplana las fluctuaciones rápidas de la señal de voces en el punto de recepción; en los casos del salón de seminarios y del auditorio el índice STI dependió de la reverberación únicamente; en la cámara anecoica como no tiene sentido hablar de reverberación puesto que no existen reflexiones y tampoco ruido de fondo, el índice estuvo influenciado por la distancia a partir de la fuente y se comprobó la ley del inverso al cuadrado además de realfirmar la conveniencia de tener un poco de reverberación para lograr una buena inteligibilidad; en las aulas de la facultad de Ingeniería se evidenció como influyen los efectos combinados de la reverberación y el ruido de fondo<sup>1</sup> (aquí las mediciones se efectuaron durante un receso de labores por la hora de los alimentos y debido a esto el ruido percibido era generado, principalmente, por los vehículos que transitaban en los alrededores y no por el que generan los alumnos (como diálogos, gritos, risas, interrupciones en las aulas, etc.).

<sup>1</sup>Aunque en las mediciones efectivamente existió ruido ambiente, el análisis en realidad consideró a la reverberación como la única fuente de distorsión por razones que se expondrán líneas más adelante y en las que se involucra el uso de la señal de voces como señal de prueba.

Respecto a las escalas subjetivas correspondientes para cada recinto, se observa que concuerdan con lo que uno pudiera esperar debido a las condiciones y características de construcción que tienen los recintos (en la figura 6.11 se ejemplifica gráficamente la correlación existente entre algunos resultados de pruebas de inteligibilidad y los índices STI).

De las mediciones efectuadas para todos los recintos, únicamente las de la cámara anecoica se repitieron dos veces; los resultados obtenidos fueron:

<b>distancia</b>	<b>Indice RASTI (1era. medición)</b>	<b>Escala subjetiva</b>	<b>Indice RASTI (2da. medición)</b>	<b>Escala subjetiva</b>
1.0 m	0.87	Excelente	0.86	Excelente
1.5 m	0.56	Aceptable	0.64	Bueno
2.0 m	-----		0.49	Aceptable
2.5 m	0.41	Pobre	0.42	Pobre
4.0 m	0.35	Pobre	0.31	Pobre

Nótese que las diferencias de los índices, en la 1era. y 2da. medición, no son tan significantes puesto que no alteran la calificación de la escala subjetiva (excepto en la distancia a metro y medio), lo cual nos sugiere que en la instrumentación del método RASTI se requiera de una exactitud tal que la desviación estándar para mediciones repetidas sea considerablemente menor a 0.15 (observar que en el rango medio de la abscisa de la figura 6.11 cada intervalo de calificación subjetiva corresponde a un intervalo del índice STI de 0.15 a lo largo de la escala del mismo).

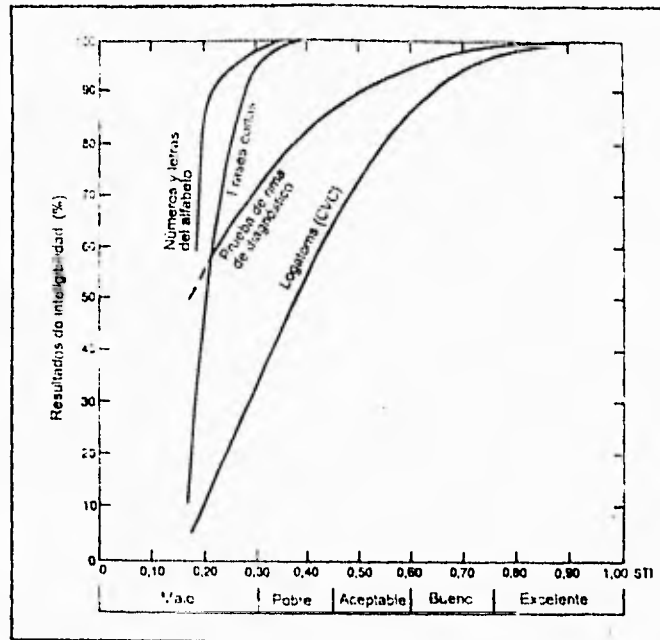


Fig. 6.11. Relación entre el índice STI y algunos resultados de inteligibilidad para varios tipos de pruebas.

#### Consideraciones hechas en la instrumentación del método

Es necesario señalar también las consideraciones a que fueron sujetas las mediciones realizadas y que tal vez influyeron en la generación de errores:

- 1) Se supuso que el espectro de la señal de voces no varía cuando se reprodujo dicha señal desde la cinta de metal (entrada) al altavoz (salida); por lo que se consideró, para el análisis, como señal original (ó sin transmitir) a la que se encuentra en la cinta.
- 2) También se supuso que el patrón de directividad del altavoz empleado refleja el patrón de directividad de un orador natural.

- 3) Otra suposición importante es que la reproducción de la señal muestreada (desde la DAT) no altera el espectro de las voces que, como se sabe, cuando se reproduce una señal muestreada para obtener una salida analógica la señal digital tiene que ser reconstruida a través de un retenedor, y a veces junto con un filtro paso bajas, por lo que la calidad de la reconstrucción depende del orden del retenedor empleado.
- 4) Con respecto al tiempo de análisis considerado, se tuvo que limitar de acuerdo a la capacidad de memoria, espacio y velocidad de la computadora usada; se redujo a tan solo 10 segundos (de una muestra de dos minutos de duración) contados a partir de un tiempo arbitrario y en sincronización entre fuente y escucha para todos los casos mientras que en la literatura se emplea -cada vez que se utiliza la señal de voces como señal de prueba- una muestra de 1 minuto, lo cual influye definitivamente en la exactitud del índice.
- 5) En cuanto a la señal de voces generada, hay que considerar que se basó en un discurso continuo grabado en condiciones limitadas (diferentes oradores, un solo texto y un solo modo de hablar -fluido, con el menor número posible de pausas y con un nivel de voz aproximadamente constante en cada orador-), mientras que en la literatura ([10] pág. 1071) se emplearon diferentes textos y diferentes modos de hablar -en niveles altos así como en niveles bajos-.

#### **Análisis de errores**

En este trabajo, tal y como se ha venido mencionando, se empleó una microcomputadora personal para efectuar el análisis y los cálculos necesarios para la obtención de un índice numérico cuyo valor oscila entre 0 y 1, valor que no es inmune a los errores que suelen acompañar a las mediciones y que inevitablemente influyen en la obtención del valor exacto.

Esto implica que necesariamente se tengan que identificar dichos errores para corregirlos y esto se logra aplicando, por ejemplo, la correcta calibración del instrumento, ó mediante el uso correcto de la escala al medir niveles de presión, logrando con ello la mayor precisión posible del índice buscado. Sin embargo, aún y cuando todos los medios conocidos de corrección hayan sido aplicados existen errores que no pueden ser previstos y por lo tanto evitados (errores que en la literatura se conocen como errores aleatorios).

Es muy difícil cuantificar todos los errores involucrados (desde la grabación de las voces, pasando por la conexión de los aparatos e instrumentos de medición, hasta el muestreo por computadora, ya que ésta incluye errores por redondeo) porque requeriría de un estudio y un análisis detallado y profundo que se apartaría del objetivo principal trazado en esta tesis; sin embargo se procederá a calcular el error que se obtuvo en la determinación de las frecuencias de modulación para las dos bandas de octava involucradas.

El error absoluto para las frecuencias de interés del eje de frecuencias de modulación, se calcula como sigue: (se eligió una resolución de 0.1 Hz)

A partir de la frecuencia de muestreo conocida ( $F_s=23,256$  Hz) se elige el tamaño del vector remuestreado ( $n=4096$ , cantidad elegida arbitrariamente, pero puede ser 1024, 2048 u 8192; preferentemente que sea múltiplo de 2) y finalmente se escoge la razón de remuestreo, que en este caso es igual a 57 (para el algoritmo de la función *decimate* en MATLAB se elige un valor entero que mientras más grande sea, más burda será la señal remuestreada). Una aproximación para la resolución en frecuencia deseada es:

$$\Delta f = \frac{\left( \frac{23256}{57} \right)}{4096} = 0.0996 \text{ Hz}$$

La frecuencia de corte del filtro paso-bajas (para la misma función en MATLAB) se calcula como:



$$f_c = \frac{\left(\frac{23256}{2}\right) \times 0.8}{57} = 163.2 \text{ Hz}$$

y la nueva frecuencia de muestreo es:

$$F_s' = \frac{F_s}{57} = 408 \text{ Hz}$$

Ahora bien, con la resolución en frecuencia obtenida se procede a determinar las 9 frecuencias de interés junto con su error absoluto (el número entre paréntesis indica la posición en el vector de frecuencia generado en que se encuentra dicho valor):

**Banda de 500 Hz**

**Banda de 2.000 Hz**

	Frec. de Mod.	Aprox.	e (%)		Frec. de Mod.	Aprox.	e(%)
<b>(10)</b>	1 Hz	0.9961 Hz	0.3906	<b>(7)</b>	0.7 Hz	0.6973 Hz	0.2734
<b>(20)</b>	2 Hz	1.9922 Hz	0.7813	<b>(14)</b>	1.4 Hz	1.3945 Hz	0.5469
<b>(40)</b>	4 Hz	3.9844 Hz	1.5625	<b>(28)</b>	2.8 Hz	2.7891 Hz	1.0938
<b>(80)</b>	8 Hz	7.9688 Hz	3.1250	<b>(56)</b>	5.6 Hz	5.5781 Hz	2.1875
				<b>(113)</b>	11.2 Hz	11.2559 Hz	5.5859

Por otra parte, durante las grabaciones de las voces, los voluntarios (uno a uno) se ubicaron a un metro de distancia, aproximadamente, desde el micrófono pero no mantuvieron constante su nivel de voz; esto orilló que fuera necesario monitorearlo y en consecuencia en la grabación de cada voz no fue el mismo; posteriormente durante la reproducción de cada una de las voces para mezclarlas (como 30 voces simultáneas) se tuvo que ajustar de nueva cuenta el nivel de grabación, pues conforme se mezclan dos voces y se añade una más (y así sucesivamente) se va saturando poco a poco. Por lo tanto, al reproducir la señal de prueba en un recinto y grabarla en un punto de recepción, los índices de modulación de la señal original están referidos al valor promedio (en intensidad)

de la misma señal original mientras que los de la señal distorsionada se tuvieron que referir al valor promedio de la señal de recepción grabada a un metro de distancia de la fuente (altavoz).

Este último procedimiento seguramente generó un error en el cálculo del índice STI puesto que los índices de modulación, tanto para la señal original como la distorsionada, deben estar referidos al valor promedio, en intensidad, de la señal original. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos, ambos niveles (los referidos a la señal original y a 1 m de distancia del altavoz) son comparables por lo que finalmente se pudo obtener un índice STI confiable.

### Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo desarrolló la instrumentación de un método (cuya exactitud ya había sido corroborada en la literatura [14], [15], y se formalizó cuando se estableció hace apenas unos años como una norma internacional) a través de una microcomputadora personal y los resultados obtenidos fueron satisfactorios con respecto a lo que se esperaba, tal y como ya se discutió en este mismo capítulo. Se comprueba, además, la adaptabilidad que hoy en día tiene una PC (compatible con IBM) -ahora como instrumento de medición- con respecto a los equipos existentes, pues aún suponiendo que en el aspecto económico fueran similares, el campo de aplicación entre ambos no tendría comparación.

Con respecto a la señal de prueba empleada, ya se sabía que no importaba el tipo de señal que fuera, pero utilicé la de voces porque en la determinación del espectro de la voz humana en diversos artículos ([10], [11]) siempre utilizan el idioma inglés como referencia y era algo significativo realizar la misma prueba pero ahora en nuestro idioma, pues el método es el mismo y no debía presentar variaciones, que es lo que finalmente se observó.

---

<sup>1</sup>La compañía danesa Brüel and Kjaer lanzó al mercado, a mediados de la década pasada, un instrumento de medición del Índice STI: B&K tipo 3361 que consta de un transmisor y de un receptor como los que se muestran en la figura 6.12

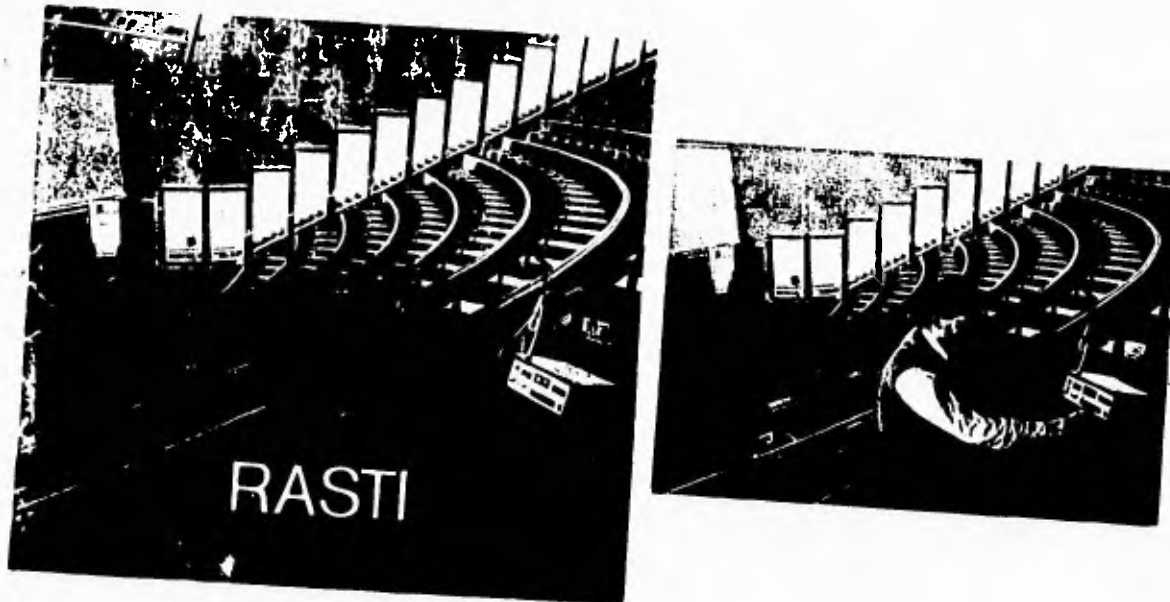
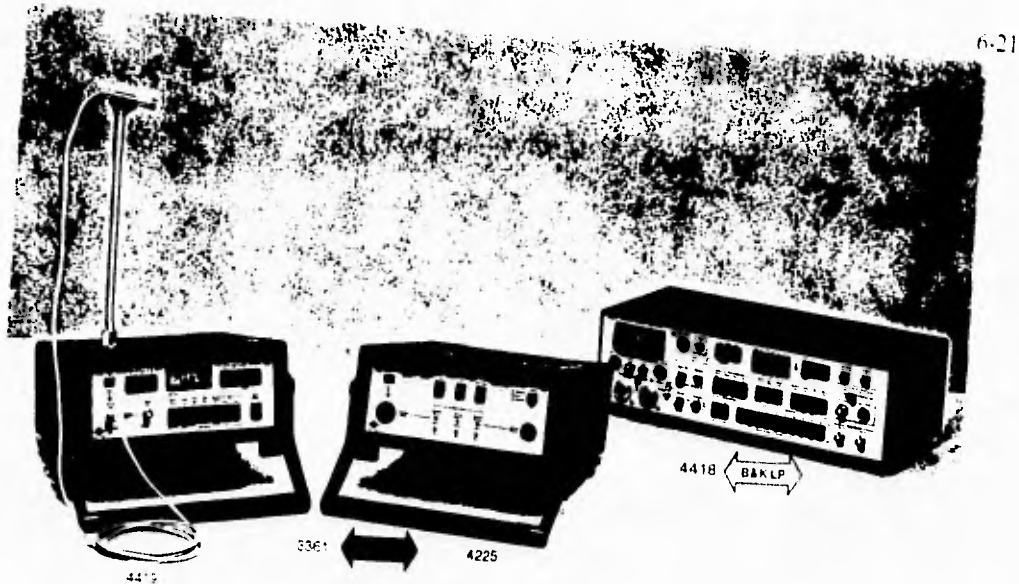


Fig. 6-12 Medidor de la transmisión de la voz, B&K 3361. Se compone de un transmisor B&K 4225 (incluye altavoz) y un receptor B&K 4419 (incluye micrófono y preamplificador)

El posible inconveniente de emplear la señal de voces como señal de prueba es que, en el caso de la aparición de un ruido de fondo no estacionario, por ejemplo, el espectro de la envolvente del sonido grabado reflejaría también las fluctuaciones del ruido de fondo, las cuales no pueden ser separadas fácilmente de las fluctuaciones deseadas, es decir, de aquellas originadas por la voz del orador; el grado en que interfieran las fluctuaciones del ruido tendría que basarse en una investigación experimental por separado y además profunda ([10] Pág. 1075).

Con base a lo anteriormente expuesto, recomiendo utilizar como señal de prueba a la señal artificial, porque uno no dependería de la disposición de los voluntarios para grabar sus voces; además es posible generar ruido rosa a través de la misma microcomputadora, lo que ya es una ventaja cuando se requiera automatizar el método, aunque se requiera de una PC con una capacidad bastante considerable de espacio tanto en memoria como en disco duro.

Finalmente, para cerrar este capítulo, conviene señalar que el trabajo presentado no pretende ser definitivo, pues es una de las primeras incursiones en la aplicación de las PCs como instrumentos de medición dentro del laboratorio de acústica y, por lo tanto, está sujeto a mejoras; y si bien el método es de una exactitud reconocida, su instrumentación requiere de bastante suspicacia, habilidad y perseverancia para lograr resultados convincentes.

# Apéndice

## MODELOS DE APROXIMACION PARA LA OBTENCION DEL INDICE STI

### MODELOS DE APROXIMACION PARA LA OBTENCION DEL INDICE STI

Introducción .....	A-3
1. Acústica estadística general de recintos .....	A-4
2. El trazo de rayos .....	A-7
Resumen .....	A-7
Modelo matemático .....	A-8
La Fuente .....	A-10
Los Escuehas .....	A-10
La forma del recinto .....	A-11
El trayecto del Sonido .....	A-11
Sonido Directo .....	A-13

A-2

Rayos reflejados hasta un cierto número de veces (Aproximación Geométrica)	A-13
Rayos reflejados más de un cierto número de veces (Aproximación Estadística)	A-15
Sonido Difuso	A-16
Selección de parámetros	A-19
Verificación experimental del modelo	A-20
Discusión de resultados	A-23
3. Relación de la MTF con la respuesta al impulso	A-24
Programa MODELO.C	A-25

## MODELOS DE APROXIMACION PARA LA OBTENCION DEL INDICE STI

### Introducción

En el capítulo 4 se vio que la función de transferencia de modulación está relacionada matemáticamente con las medidas más tradicionales en la acústica de recintos: el ruido de fondo ( $S/N$  en dB) y la reverberación ( $T_{60}$  en s). Ambos tipos de distorsión tienen su efecto específico en la MTF; la degradación introducida por la reverberación y el ruido de fondo puede estimarse individualmente desde la misma función de transferencia de modulación. En principio también es posible obtener el tiempo de retardo y la intensidad relativa de un eco; sin embargo, para tal estimación, la MTF tiene que describirse con una alta resolución en el dominio de las frecuencias de modulación y no puede obtenerse a partir de una MTF descrita con sólo cuatro ó cinco frecuencias de modulación.

En general, la función de transferencia de modulación se determina completamente cuando cualquier condición se especifique en términos de las curvas del tiempo de reverberación y de las razones señal a ruido -en una banda de octava en específico-, las cuales a su vez se determinan por las características acústicas y geométricas del recinto. Esto motiva a pensar que el STI pudiera calcularse como una función de esas características, pues el índice STI se deriva de la MTF. Este planteamiento puede proveer una herramienta útil de diseño cuando se consideren varias alternativas en el diseño de un auditorio, por ejemplo.

A continuación se mostrarán dos modelos conocidos de aproximación (que por cierto, ya han sido probados ampliamente en la literatura, [13] págs. 6-7, [17]): uno basado en la estadística acústica de recintos y el otro en la técnica del trazo de rayos; también se mostrará la relación de la MTF con la respuesta al impulso tal y como la dedujo Schroeder ([18]).

### 1. Acústica estadística general de recintos

Detalles completos de esta aproximación están dados por Houtgast et al<sup>1</sup>. El campo sonoro en la posición de un escucha se considera que consiste de (1) el sonido directo del orador, (2) el sonido reverberante del orador, y (3) el ruido de interferencia. Siguiendo los lineamientos de la acústica estadística de recintos, sus contribuciones relativas pueden expresarse en términos de la distancia orador-escucha  $r$ , el tiempo de reverberación  $T_{60}$ , el volumen del recinto  $V$ , y la razón señal a ruido  $S/N$ . Asumiendo un campo sonoro difuso y reverberante que decae exponencialmente, se ha desarrollado un esquema de cálculo para determinar la MTF -y consecuentemente el STI- para cualquier combinación de parámetros  $r$ ,  $T_{60}$ ,  $V$  y  $S/N$ . Esto permite un tratamiento cuantitativo en algunos cuestionamientos generales sobre la inteligibilidad del habla en la acústica arquitectónica, como el tiempo de reverberación óptimo ó la distancia orador-escucha a la cual la regla del sonido directo llega a ser significativa.

En el capítulo 4 (ecuación [10]) se vio que la reducción de modulación  $m(F)$  se expresa en términos de  $T_{60}$  y de la razón  $S/N$  como:

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[2\pi F \frac{T}{13.8}\right]^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-(S/N)}{10}}} \quad (1)$$

con  $F$ : frecuencia de modulación en Hz  
 $T$ : tiempo de reverberación en segundos  
 $S/N$ : razón señal a ruido en dB.

---

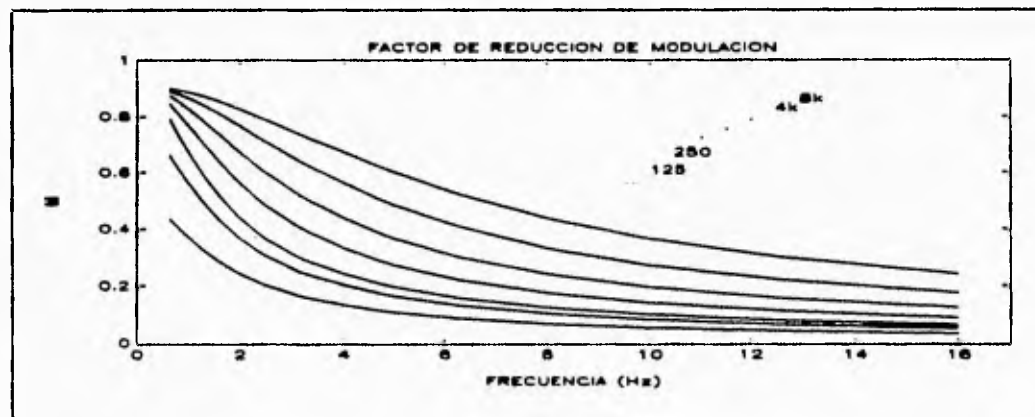
<sup>1</sup>T. Houtgast, H. J. M. Steeneken, and R. Plomp, "Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Functions. I. General Room Acoustics", *Acustica* 46, 60-72 (1980).



Asumiendo un proceso de reverberación idealmente exponencial, junto con valores  $T_{60}$  y razones  $S/N$  como los que se indican en la tabla mostrada en la siguiente página, se obtienen las curvas mostradas en la figura A-1.

Debido a que en cada banda se obtienen cuatro ó cinco valores de  $m$  para diferentes frecuencias de modulación  $F$ , entonces pueden deducirse los valores correspondientes para  $T_{60}$  y  $S/N$  que mejor se ajusten a estos datos; esto se logra mediante un procedimiento iterativo que no se mostrará en estas líneas pero que se describe detalladamente en [13] (Págs. 18-23) mediante un programa (en PASCAL) para estimar la razón señal a ruido ( $S/N$ ) y el tiempo de decaimiento inmediato ( $EDT$ ).

Banda de Octava (Hz)	$T_{60}$ (s)	Razón S/N (dB)
125	2.0	0
250	2.0	+5
500	2.0	+10
1k	1.4	+10
2k	1.0	+10
4k	0.7	+10
8k	0.5	+10



*Fig. A-1 Ilustración de un ejemplo en el cual cada curva se obtiene para diferentes valores teóricos de  $T_{60}$  y S/N en cada una de las bandas tal y como se indica. Se asume un proceso de reverberación idealmente exponencial. Con estos datos, el factor de reducción de modulación se obtiene utilizando la ecuación (1).*

## 2. El trazo de rayos

### Resumen

A partir del concepto de la MTF es posible describir, mediante una aproximación, el cálculo del índice de la transmisión del habla (STI) en recintos, considerando las características acústicas y geométricas del recinto. Se basa en el principio del trazo de rayos: el orador se simula por una fuente puntual al emitir un gran número de rayos (típicamente 7000), y a la audiencia por una área de esferas (típicamente de radio igual a 1 m), resultando en un valor STI para cada posición de un escucha.

A diferencia del enfoque tradicional del trazo de rayos, el presente modelo se ha diseñado para considerar también la influencia (en parte) de los reflejos difusos; esto ha resultado en un modelo híbrido: una combinación de la acústica del trazo de rayos y la acústica estadística de recintos. Se ha mostrado ([17]) que las predicciones del modelo acuerdan bastante bien con el valor STI como si realmente fuera medido para una variedad de condiciones.

En la predicción de la inteligibilidad del habla en recintos a partir de la Función de Transferencia de Modulación (MTF), se han desarrollado modelos de computadora de imagen-invertida (espejo) para recintos rectangulares<sup>2</sup> y no rectangulares<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup>Plomp, R., Steeneken, H.J.M., y Houtgast, T. "Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. II: Mirror Image Computer Model Applied to Rectangular Rooms" *Acustica* 46 [1980], 74.

<sup>3</sup>Plomp, R., Steeneken, H.J.M., y Houtgast, T. "Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. III: Mirror Image Computer Model Applied to Pyramidal Shaped Rooms" *Acustica* 48 [1981], 320.

Estos modelos son bastante apropiados siempre y cuando las superficies fronterizas puedan considerarse como planos geoméricamente reflejantes. Dado que en la práctica en muchos casos esta condición no se cumple, es necesario incluir el efecto de la difusión. Es por esta razón, principalmente, que pareció fructífero explorar un modelo de trazo de rayos en el que la condición de las superficies fronterizas difusoras puedan incorporarse mucho más fácilmente que en el modelo de imagen-invertida.

El trazo de rayos significa que una gran cantidad de rayos sonoros, radiados por una fuente, son seguidos unos tras otros en su trayectoria dentro de un recinto. Las ventajas adicionales de este enfoque alternativo son que 1), puedan manejarse formas muy complicadas de recintos, como cuartos con balcones, y 2), la instrumentación del modelo es fácil y eficiente.

A continuación se describe el modelo matemático con el cual se calcula la MTF utilizando la técnica del trazo de rayos; posteriormente se verificará la aplicación de este modelo comparando sus predicciones con los resultados de las mediciones obtenidas.

### **Modelo matemático**

El modelo aquí presentado ha sido desarrollado para predecir la inteligibilidad del habla en recintos; la inteligibilidad del habla se evaluará mediante el Índice de la Transmisión del Habla (STI) calculada a partir de la MTF de acuerdo al método descrito en el capítulo 4.

La MTF es la función  $m(F)$ , en la que  $m$  es el índice de modulación en la frecuencia de modulación  $F$ ; tal que si la intensidad de la señal de la fuente es:

$$\bar{I}_i [1 + \cos(2\pi Ft)]$$

donde:  $\bar{I}_i$  es la intensidad promedio de la fuente  
no direccional a una distancia de un metro (2)

entonces la intensidad en la posición del escucha puede obtenerse por:

$$\bar{I}_o [1 + m(F)\cos(2\pi F(t - \Delta t))]$$

donde:  $\bar{I}_o$  es la intensidad promedio en esa posición y  
 $\Delta t$  es el corrimiento de fase debido a la transmisión (3)

Para la derivación de la MTF en el modelo de computadora, la fuente sonora se simula por un gran número de rayos sonoros originados en un punto: el orador. Estos rayos están trazados en su trayectoria a un escucha en cualquier posición a través de un número variable de reflejos por las superficies fronterizas. Siempre que el escucha sea golpeado por un rayo, el tiempo desde que el rayo fue transmitido y su respectiva atenuación pueden utilizarse para formar un ecograma. Después de trazar todos los rayos, el ecograma puede convertirse en la MTF y ésta a su vez en el valor STI como se ha explicado anteriormente.

Ya que lo que interesa únicamente es el STI y no tanto el ecograma, la MTF de este modelo está calculada directamente por la distancia recorrida y la cantidad de atenuación de cada rayo que golpea al escucha. Mientras que la aproximación sea esencialmente un modelo de trazo de rayos, el incluir los efectos de difusión y reflexión retardados por medio de procedimientos estadísticos es una extensión válida no cubierta en el estudio del trazo de rayos convencional.

Ahora se describe el modelo en mayor detalle.

**La fuente**

La fuente está simulada por un gran número de rayos originados desde un punto único; los rayos tienen que estar distribuidos de tal modo que cada ángulo sólido alrededor de la fuente contenga aproximadamente el mismo número de rayos. Esto se ha obtenido de la siguiente manera: se considera al orador como el centro de una esfera; esta esfera puede estar suministrada con un número de círculos paralelos (conocidos como líneas de igual latitud), incluido el del ecuador, con igual distancia  $q$  entre círculos adyacentes medidos a través de la esfera.

En cada uno de estos círculos se determina un número de puntos tal que la distancia de puntos adyacentes en cada círculo, medidos a través de la esfera, sea una aproximación de  $q$  tanto como sea posible. Dirigiendo los rayos hacia estos puntos resulta en la configuración de rayos deseada. Consecuentemente, las direcciones de los rayos individuales se varían ligeramente para obtener una distribución pseudo-aleatoria; esta técnica se utiliza para evitar un patrón demasiado regular. La directividad de la fuente puede simularse cambiando la magnitud relativa de cada rayo. Es importante mencionar que se ha supuesto un patrón de directividad esférica, lo que implica el tener una magnitud inicial unitaria para cada rayo.

**Los escuchas**

Los escuchas están simulados a través de esferas. Se considera a cualquier rayo que golpea a una esfera como una contribución al campo sonoro en esa posición del escuchas. De ahora en adelante se utilizará el término "golpeo del escuchas" como una versión reducida de "golpeo de la esfera que simula al escuchas". El modelo supone que tanto la dirección como la magnitud de un rayo no cambia cuando golpea a un escuchas (los efectos de absorción y difusión por parte de los escuchas se toman en cuenta por los coeficientes del piso). Los escuchas están ordenados en una cuadrícula

dada a una cierta altura. El radio de la esfera del escucha debería ser comparable a las distancias de la cuadrícula de los escuchas. Esta resolución de la cuadrícula depende del gradiente del STI en el área de audiencia. Según las condiciones discutidas posteriormente, un radio de 1 a 1.5 metros para las esferas de los escuchas resultó muy satisfactorio.

### La forma del recinto

Debido a que se asumen planos fronterizos para reflejar los rayos sonoros, la forma del recinto debería estar determinada por ecuaciones matemáticas. Como cualquier superficie curva puede aproximarse por un número dado de planos, entonces estos son los únicos elementos que describen la forma del recinto.

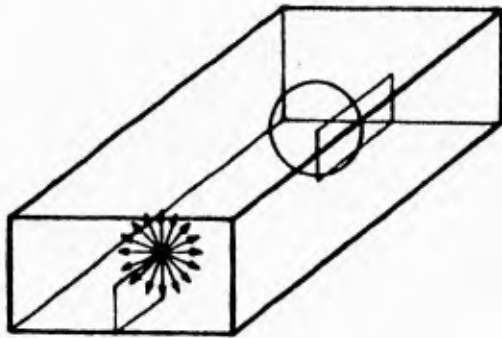
### Trayecto del sonido

Los efectos en la inteligibilidad del habla de la forma y otras propiedades acústicas relevantes del recinto están modelados al rastrear los rayos. La MTF en cada posición del escucha es la suma de las siguientes cuatro contribuciones: 1) sonido directo, 2) rayos reflejados hasta un cierto número de veces (enfoque geométrico), 3) rayos reflejados más de un cierto número de veces (enfoque estadístico) y 4) sonido difuso.

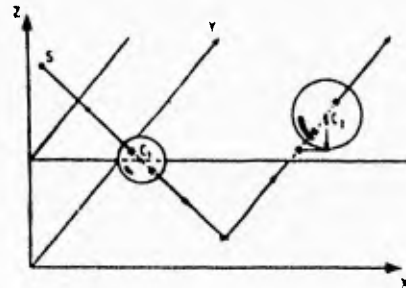
La MTF en la posición de un escucha es la suma vectorial de todos los rayos recibidos divididos por su suma absoluta:

$$m(F) = \frac{\sqrt{(\sum_i a_i \cos(2\pi Ft_i))^2 + (\sum_i a_i \sin(2\pi Ft_i))^2}}{\sum_i a_i} \quad (4a)$$

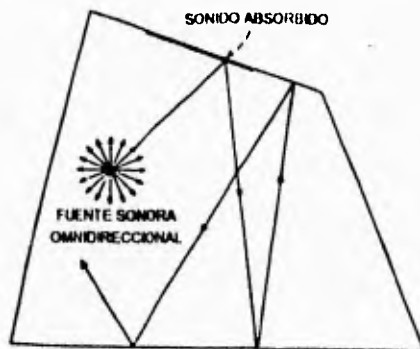
donde:  $a_i$  es la magnitud del rayo en el momento en que golpea al escucha.  
 $t_i = d_i/c$ ,  $d_i$  es la distancia recorrida antes de que el escucha sea golpeado, y  $c$  es la velocidad del sonido.



a)



b)



c)

Fig. A-2 a) La fuente de sonido y la posición de la región de observación dentro de un recinto rectangular. b) Distribución de la energía sonora transportada por un rayo a través de celdas esféricas aisladas de recepción. c) Cada vez que un rayo golpea un material absorbente, su energía se reduce.



ó bien

$$m(F) = \frac{\sqrt{C^2(F) + S^2(F)}}{A} \quad (4b)$$

La suma incluye todos los rayos que golpean al escucha; los valores de  $A$ ,  $C$ , y  $S$  se componen de  $A_i$ ,  $C_i$  y  $S_i$  para cada una de las cuatro contribuciones siguientes:

### 1) Sonido Directo

El sonido directo se calcula utilizando la ley del inverso al cuadrado. Sea  $d$  la distancia entre fuente y escucha.  $N$  el número total de rayos emitidos por la fuente y  $R$  el radio de la esfera del escucha, entonces la cantidad de rayos que golpean al escucha está dado por:

$$z = \frac{N}{4\pi d^2} \pi R^2 \quad (5)$$

Así:

$$\begin{aligned} A_1 &= z \\ C_1(F) &= z \cos\left(2\pi F \frac{d}{c}\right) \\ S_1(F) &= z \operatorname{sen}\left(2\pi F \frac{d}{c}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

### 2) Rayos reflejados hasta un cierto número de veces (enfoque geométrico)

En cada punto de reflexión la magnitud del rayo se atenúa debido a la absorción y difusión, mientras su dirección cambia de acuerdo con la ley del reflejo especular. Se asume que tanto la absorción como la difusión son independientes de la frecuencia y del ángulo de incidencia. Cuando un rayo

viaja entre dos reflexiones y golpea a un escucha, se obtiene su magnitud  $a_i$ , y su distancia recorrida  $d_i$ . Siempre que la magnitud de un rayo se reduzca a cero (100 % de absorción o difusión) el trazo se detiene. Los factores  $A_2$ ,  $C_2$  y  $S_2$  están dados por:

$$\begin{aligned} A_2 &= \sum_i a_i \\ C_2(F) &= \sum_i a_i \cos\left(2\pi F \frac{d_i}{c}\right) \\ S_2(F) &= \sum_i a_i \operatorname{sen}\left(2\pi F \frac{d_i}{c}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

Se mostrará que es válido detener el trazo de rayos después de un cierto número de reflexiones. Si por un momento se considerara una condición de campo libre, entonces la cantidad de rayos que golpean a un escucha con radio  $R$  a una distancia  $d$  de la fuente es igual a  $z$  en la ecuación (5). Incrementando  $d$ , este valor disminuye rápidamente y puede caer por abajo de la unidad. En ese caso la ecuación debería considerarse más como la probabilidad de que un escucha sea golpeado por un rayo. Entonces el escucha que es golpeado o no depende de la opción específica de la configuración de rayos pseudo-aleatoria y el trazo de rayos real pierde su significado. Un suceso similar se alcanzaría en un recinto. Por lo tanto para distancias grandes (esto es, después de un cierto número de reflexiones en un recinto) el trazo de rayos real puede detenerse y reemplazarse por una aproximación estadística más eficiente.

El número crítico de reflexiones, a partir del cual se abandona el enfoque geométrico, puede estimarse de la ecuación (5) con  $d = ml$  (donde  $m$  es la cantidad de reflexiones y  $l$  es la longitud de la trayectoria media libre en el recinto) y además con la siguiente condición:

$$\frac{NR^2}{4m^2\bar{l}^2} > 1 \quad (8a)$$

Para simplificar esta ecuación,  $\bar{l}$  puede relacionarse con el volumen del recinto  $V$ ; para un recinto típico (con dimensiones 1:2:3)

$$\bar{l}^2 = 0.36 V^{2/3} \quad (8b)$$

Finalmente esto último reduce la ecuación (8a) a la regla general:

$$m < \frac{R}{1.2 V^{1/3}} \sqrt{N} \quad (8c)$$

Como ejemplo, esta condición se cumple para  $V=6000 \text{ m}^3$ ,  $N=7000$ ,  $R=1.5 \text{ m}$  y  $m=4$ .

### 3) Rayos reflejados más de un cierto número de veces (enfoque estadístico)

Después de  $m$  reflexiones el trazo de cada rayo aún continúa, pero su contribución no está considerada para más tiempo en un escucha específico. En lugar de eso se asume que entre cada par de reflexiones el rayo tiene igual probabilidad de golpear cualquier a escucha. Esta probabilidad está dada por:

$$p_i = \frac{\delta_i \pi R^2}{V} \quad (9)$$

Esto es igual al volumen dentro del cual un rayo que viaja sobre una distancia  $\delta_i$  entre dos reflexiones sea eficaz en golpear a un escucha, dividido por el volumen total del recinto. Esto resulta en las ecuaciones para  $A_i$ ,  $S_i$  y  $C_i$  (que se aplican a todos los escuchas):

$$\begin{aligned}
 A_3 &= \sum_i a_i p_i \\
 C_3(F) &= \sum_i a_i p_i \cos\left(2\pi F \frac{d_i}{c}\right) \\
 S_3(F) &= \sum_i a_i p_i \operatorname{sen}\left(2\pi F \frac{d_i}{c}\right)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Los valores de  $a_i$  y  $d_i$  están referidos a la mitad del trayecto del rayo entre dos reflexiones.

#### 4) Sonido Difuso

En 2) y 3) se asumió que en cada reflexión de un rayo una cierta cantidad de su magnitud se difunde (ver figura A-3). La fracción de la energía reflejada que se convierte en energía difusa estará definida como el coeficiente de difusión de la superficie fronteriza bajo consideración. La energía difusa se trata como un rayo difuso sin dirección, expuesto a la trayectoria media libre  $l$  y al coeficiente de absorción promedio,  $\bar{\alpha}$ . Mientras viaja  $l$  metros entre dos reflexiones se asume que el rayo difuso tiene una probabilidad de  $l\bar{\alpha}R^2/V$  de golpear a cualquier escucha, similar a los rayos reales del caso 3). La suma de todas las distancias sucesivas  $l$  conduce al factor adicional:

$$\sum_i (1 - \bar{\alpha})^l = \frac{1}{\bar{\alpha}}$$

y siendo  $a$ , la magnitud inicial del rayo difuso, el efecto en la MTF puede expresarse por los factores  $A_d$ ,  $S_d$  y  $C_d$ :

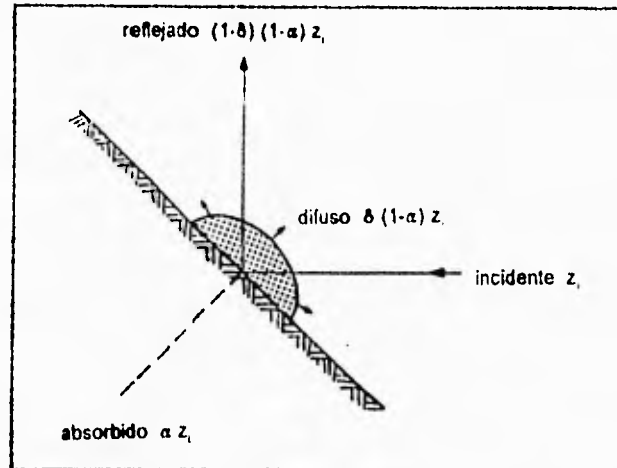


Fig. A-3 Efecto de un rayo sobre una pared que ilustra los efectos de la absorción ( $\alpha$ ) y de la difusión ( $\delta$ ).

$$A_s = \frac{1}{\alpha} \frac{\bar{I} \pi R^2}{V} \sum_i a_i$$

$$C_s(F) = \frac{1}{\alpha} \frac{\bar{I} \pi R^2}{V} \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi\theta F)^2}} \sum_i a_i \cos(\varphi_i + \beta + \psi) \quad (11)$$

$$S_s(F) = \frac{1}{\alpha} \frac{\bar{I} \pi R^2}{V} \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi\theta F)^2}} \sum_i a_i \sin(\varphi_i + \beta + \psi)$$

En  $C_s$  y  $S_s$  el término extra  $(1+[2\pi\theta F]^2)^{-1/2}$  explica la reducción de modulación debido al decaimiento exponencial de la magnitud del rayo en el tiempo con una constante de tiempo efectiva  $\theta = -l/(c \ln[1-\alpha])$ . Los ángulos de fase  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\beta$  están determinados por los diferentes retardos del sonido difuso:

$$\varphi = 2\pi F t_i \quad (12a)$$

se debe al retardo provocado por el momento inicial  $t_i$  del rayo difuso (se asume que el sonido real comienza en  $t=0$ );

$$\psi = \frac{2\pi F \frac{\bar{l}}{2}}{c} \quad (12b)$$

se debe a la distancia promedio pared-escucha. Y finalmente:

$$\beta = \arctan(2\pi\theta F) \quad (12c)$$

indica el ángulo de fase debido al decaimiento exponencial con la constante de tiempo  $\theta$ .

Puede ser ilustrativo considerar el caso límite en el que todos los rayos llegan a convertirse en rayos completamente difusos en la primera reflexión. La magnitud del sonido directo está dado por  $A_d$  (ec. 6) y el del sonido reverberante por  $A_r$  (ec. 11), con

$$\sum_i a_i = (1 - \bar{\alpha})N$$

La razón  $A_r / A_d$  especifica el sonido reverberante .vs. el sonido directo a 1 m (con  $d = 1$  en la ec. 5); sustituyendo  $I = 4V/S$  (donde  $S$  es la superficie total de los planos fronterizos) se obtiene:

$$\frac{A_r}{A_d} = \frac{1 - \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} \frac{16\pi}{S} \quad (13)$$

que es una relación ya tradicional en la literatura ([1] Pág. 312). Es más, aún a distancias grandes, los términos  $\bar{A}_d$ ,  $C$ , y  $S$ , pueden despreciarse respecto a  $A_d$ ,  $C$ , y  $S$ . La  $m(F)$  de la ecuación (4b) se reduce a:

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi\theta F)^2}} \quad (14)$$

con

$$\theta = -\frac{\bar{l}}{c \ln(1-\bar{\alpha})}; \quad \theta = \frac{T}{13.8} \quad (15)$$

*donde T es el tiempo de reverberación.*

Esta ecuación es idéntica a una obtenida en [1] a partir de los parámetros generales en la acústica de recintos.

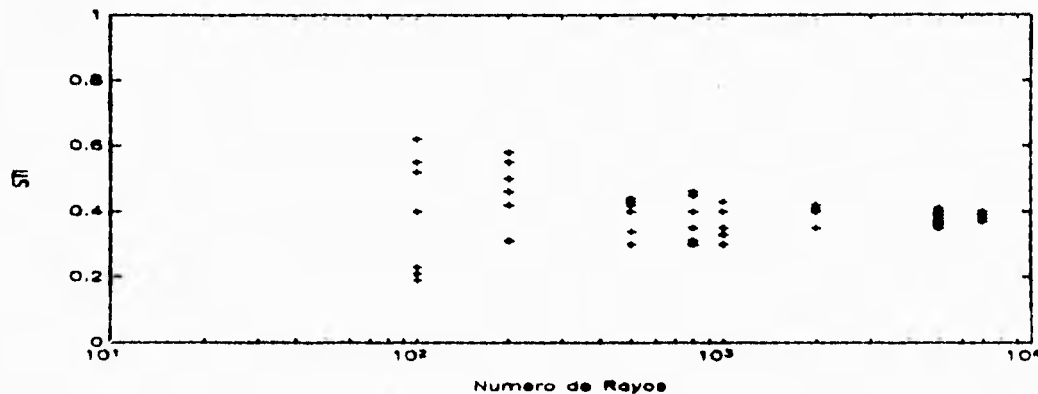
Resumiendo, existen cuatro partes en el cálculo de la MTF por efectos de un recinto:

- 1) **sonido directo:** trazo de rayos compatible, con escucha en específico;
- 2) **1era. a n-ésima reflexión:** trazo de rayos, con escucha en específico;
- 3) **n-ésima y reflexiones posteriores:** trazo de rayos, sin escucha en específico;
- 4) **difuso:** trazo de rayos compatible, sin escucha en específico.

### **Selección de parámetros**

El modelo matemático fue instrumentado mediante un programa de computadora (realizado en Turbo C y que se muestra al final de estas páginas), el cual involucra a tres parámetros matemáticos: 1) la cantidad de rayos emitidos por la fuente,  $N$ ; 2) el radio de la esfera que representa a un escucha,  $R$ , y 3) la cantidad de reflexiones,  $m$ , después de la cual se abandona la aproximación geométrica en favor del enfoque estadístico. Para un recinto con un volumen  $V$  dado, estos parámetros se relacionan de acuerdo a la ec. (8c). Diversos argumentos [(17) p. 249] condujeron a la conclusión, para obtener una buena resolución de valores STI, de adoptar los siguientes valores: radio del escucha: de 1 a 1.5

metros; cantidad de reflexiones requeridas  $n_r$ , al menos cuatro reflexiones deben tomarse en consideración para la aproximación geométrica; número de rayos utilizados: con  $N=7000$  se obtuvieron resultados bastante reproducibles. El valor STI depende de la cantidad de rayos utilizados (figura A-4) aunque se debe enfatizar que los 7000 rayos no son necesariamente suficientes para cada tipo de recinto; por lo general puede decirse que un recinto grande necesitará más rayos que uno más pequeño y que la resolución aumenta conforme haya más difusión.



*Fig. A-4 El STI como una función del número de rayos empleados; radio del escucha: 1.5 m; volumen del recinto: (10 x 20 x 30) m<sup>3</sup>; coeficiente de absorción del piso: 1.0; todos los otros coeficientes de absorción: 0.05; trazo de rayos hasta  $m=4$ . Cada condición se calculó 7 veces, con diferentes configuraciones iniciales de rayos.*

#### Verificación experimental del modelo

Tal y como se muestra en la tabla del capítulo anterior (en la sección **discusión de resultados**), se midió el tiempo de reverberación del recinto en las bandas de 500, 1000 y 2000 Hz, respectivamente; se promedió en estas bandas y se sustituyó en la fórmula de Sabine para conocer la absorción promedio del recinto; este dato, junto con las



dimensiones del recinto, las coordenadas de la fuente y el radio del escucha (se eligió 1 m) además del número de rayos previamente acordado, se introduce al programa del trazo de rayos para obtener los resultados mostrados a continuación:

	Volumen [m <sup>3</sup> ]	$\bar{\alpha}$	Indices STI	
			medido	calculado
Salón de seminarios	59.03	0.080	0.59 (a 4.35 m)	0.56 (a 3.86 m)
Auditorio CIUNAM	229.62	0.096	0.58 (a 3.92 m)	0.55 (a 3.95 m)
			0.54 (a 5.11 m)	0.51 (a 5.26 m)
			0.47 (a 9.76 m)	0.50 (a 9.85 m)
Aula 111	257.81	0.075	0.56 (a 3.74 m)	0.45 (a 3.38 m)
			0.52 (a 5.30 m)	0.45 (a 5.19 m)
			0.58 (a 6.55 m)	0.44 (a 6.83 m)

**Salón de seminarios:** Se simularon a 4 escuchas (en un arreglo de 2 hileras por 2 columnas) y se consideraron las primeras 16 reflexiones.

**Auditorio CIUNAM:** Se simularon a 18 escuchas (en un arreglo de 3 hileras por 6 columnas) y se consideraron las primeras 10 reflexiones.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

**Aula 111:**

Se simularon a 16 escuchas (en un arreglo de 4 hileras por 4 columnas) y se consideraron las primeras 9 reflexiones.

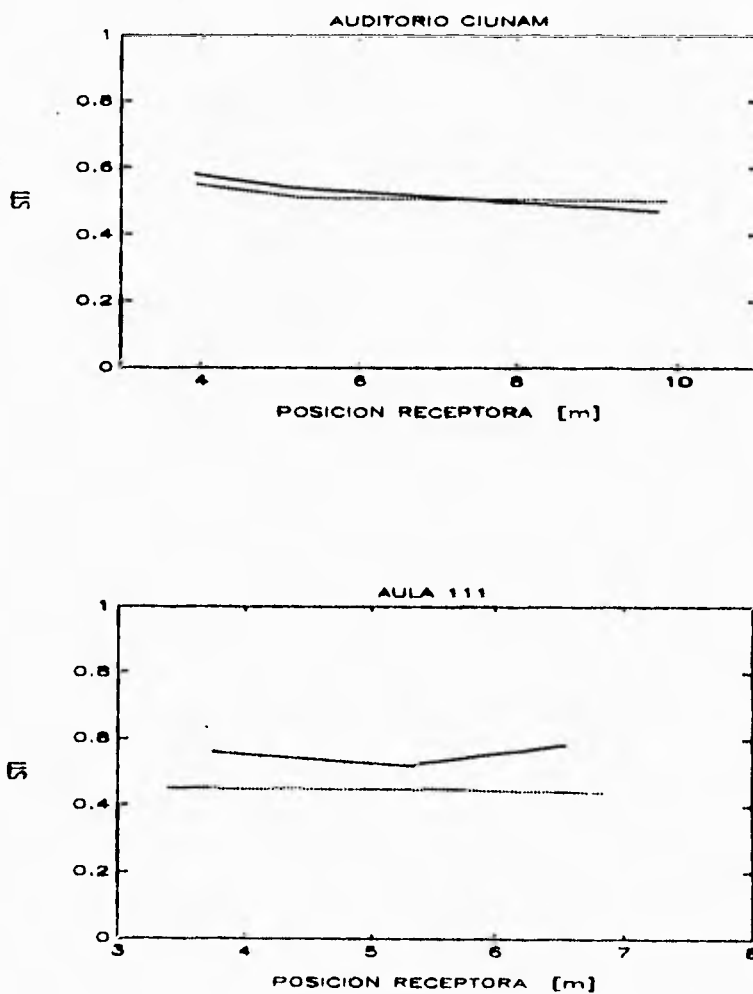


Fig. A-5 Comparación de los datos obtenidos en los recintos por las mediciones (línea continua) y por el modelo de computadora (línea punteada).

IMPRESIONADO EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

## Discusión de resultados

De la tabla se observa que los índices obtenidos con el programa (a distancias similares) difieren un poco entre sí (solo tres centésimas), pero caen dentro del mismo intervalo de calificación subjetiva; sin embargo, en el caso del aula 111 la diferencia es de hasta once centésimas en los índices, lo cual implica una evaluación que corresponde a otro intervalo de calificación subjetiva; esta diferencia se debe a que los índices medidos no solamente estuvieron afectados por la reverberación sino también por el ruido ambiente y de éste último no se consideró el efecto nocivo a propósito; es decir, no se midió la razón  $S/N$  por el tipo de señal de prueba empleada ya que el espectro de la función envolvente del sonido grabado refleja las fluctuaciones del ruido, tal y como se mencionó al final del capítulo anterior. Además se debe de tomar en cuenta que el tiempo de reverberación promedio se obtuvo para tres bandas y no para las siete en total.

Resumiendo, el modelo matemático basado en el trazo de rayos da una aproximación del campo sonoro real en un recinto; es de naturaleza híbrida (combinando los métodos del trazo de rayos y el estadístico) al incluir el efecto de la difusión, aunque es obvio que existan algunas limitaciones en su aplicación. Primero, existen algunas restricciones las cuales podrían eliminarse del modelo pero no se hicieron: 1) que el coeficiente de absorción de una superficie plana es independiente de la frecuencia y del ángulo de incidencia; 2) que la forma del recinto pueda describirse solamente por un número limitado de planos lo cual excluye el modelado para superficies curvas. Segundo, para cada recinto en consideración los parámetros empleados en el modelo tales como el número de rayos a usar, el número de reflexiones a considerar y el radio de la esfera del escucha deben elegirse con precaución. Para algunos recintos la regla general (8c) podría no siempre ser la apropiada para la selección de parámetros.

Finalmente, la aproximación del modelo para este trabajo, no incluye los efectos acústicos de los escuchas tales como el ruido producido por la audiencia ó el efecto del sonido que roza al área de la audiencia.

### 3. Relación de la MTF con la respuesta al impulso

Aunque los índices de modulación pueden medirse directamente comparando la modulación de un sistema de entrada con respecto a un sistema de salida, Schroeder ([18]) derivó la relación entre la respuesta cuadrática al impulso fuente-receptor y la función del índice de modulación.

Esta relación hace posible el cálculo de los índices de modulación una vez que la respuesta cuadrática al impulso haya sido medida ó estimada. La fórmula de Schroeder hace práctica la instrumentación del método de modulación en microcomputadoras basadas en la adquisición de datos y en análisis de sistemas. Dicha fórmula es:

$$m(F) = \left| \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j2\pi Ft} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right| \quad (16)$$

donde

$m(F)$  = índice de modulación como una función de la frecuencia de modulación  $F$ .

$h^2(t)$  = respuesta cuadrática al impulso.

La función del índice de modulación es por lo tanto proporcional a la magnitud de la transformada de Fourier de la respuesta cuadrática al impulso. Notar que la implementación directa de esta ecuación no toma en cuenta el efecto del ruido de fondo sobre el STI. El algoritmo STI especifica un espectro a la entrada que no es de respuesta plana sino que más bien se aproxima al espectro de potencia promedio de la voz humana. Así, la razón señal a ruido de fondo (un factor que afecta directamente al STI) podría ser diferente que la razón encontrada por la medición de la respuesta al impulso del sistema. Sin embargo, si la razón señal a ruido en una octava es conocida, su efecto puede adicionarse después de que los índices de modulación hayan sido calculados usando la ecuación 1) del capítulo 4.





```

continue;
}

system("cls");
k=R;

for (m=1;m<=ren;m++){
j=((2*m)-1)*dj/2;
for (n=1;n<=col;n++){
i(((2*n)-1)*di)/2;
d=sqrt(pow(i-pfi,2)+pow(j-pfj,2)+pow(k-pfk,2));
if ( d<R ){

printf("\n \t\tNOTA: [i-> COLUMNA, j-> RENGLON, k-> ALTURA]\n\n\n");
printf("\n\n\tCoordenadas escucha: (i,j,k)={%5.2f,%5.2f,%5.2f}",i,j,k);
printf("\n\tCoordenadas fuente: (fi,fj,fk)={%f,%f,%f}",pfi,pfj,pfk);
printf("\n\n\tDistancia [fuente-escucha]: d = %5.2f metro(s)",d);
printf("\n\t\t\t\t\tNOTA : Las coordenadas que eligió para la fuente");
printf("\n\t\t\t\t\tcoinciden con las coordenadas asignadas a un");
printf("\n\t\t\t\t\tescucha ó están adentro de la esfera que");
printf("representa a un escucha.");
printf("\n\n\n\n\n\n\t\t\t\t\tPulse cualquier tecla para continuar...");
getch();
system("cls");
cond=0;
break;

}
}
if (cond==0) break;
}
cond=0;

while (cond!=0);

printf("\n\n\n\t\t\t\t\t(Se simularán a %d escuchas distribuidos como un",ren*col);
printf("\n\n\t\t\t\t\tarreglo matricial de %d hileras x %d columnas).\n\n",ren,col);

contrib(V,N,R,ren,col,di,dj,pfi,pfj,pfk);
system("cls");
return(0);
}

contrib(V,N,R,ren,col,di,dj,pfi,pfj,pfk)
int N,ren,col;
float V,R,di,dj,pfi,pfj,pfk;

```





```

resp=getche();
if (resp=='S' || resp=='s') {
    printf("\n\n\n\tNombre del archivo (Valores MTF): ");
    scanf("%s", nombre);
    printf("\n\n\n\tNombre del archivo (Indices STI): ");
    scanf("%s", nombre2);
    if ( (fp=fopen(nombre, "w")) == NULL ) {
        system("cls");
        printf("\n\n\n\n\n\t\t\t;; No se puede abrir el archivo !!");
        getch();
        exit (1);
    }
    if ( (ap=fopen(nombre2, "w")) == NULL ) {
        system("cls");
        printf("\n\n\n\n\n\t\t\t;; No se puede abrir el archivo !!");
        getch();
        exit (1);
    }
    printf("\n[Se le recuerda que el archivo %s contendrá los índices de");
    printf("toda",strupr(nombre2));
    printf("\nla hilera a la cual pertenece el escucha que usted seleccionó, es");
    printf("decir:");
    printf("\n      STI(ren,1), STI(ren,2), STI(ren,3), .....STI(ren,col) ]");
    printf("\n\n\n\nPulse cualquier tecla para continuar ...");
    getch();
    fprintf(ap, "\n\n Distancia Valores\n      [m]      STI\n\n");
    escr=1;
}
fl=0.63/(pow(2,0.166)); /* Frecuencias de modulación, por tercias de octava */
z=R;
theta=-(1/(CV*(log(1-alpha_p))));
for (j=1;j<=ren;j++){
    for (i=1;i<=col;i++){
        A[j][i]=0.0;
        A1[j][i]=0.0;
        A2[j][i]=0.0;
        A3[j][i]=0.0;
        A4[j][i]=0.0;
        C[j][i]=0.0;
        C1[j][i]=0.0;
        C2[j][i]=0.0;
        C3[j][i]=0.0;
        C4[j][i]=0.0;
        S[j][i]=0.0;
        S1[j][i]=0.0;
        S2[j][i]=0.0;
        S3[j][i]=0.0;
    }
}

```

A-30

```

    S4[j][i]=0.0;
    MTF[j][i]=0.0;
    SNapp[j][i]=0.0;
    SNP[j][i]=0.0;
    STI[j][i]=0.0;
  )
)
do {

  f2=pow(2,0.333)*f1;
  F=sqrt(f1*f2);
  f1=f2;
  phi=(2*PI*F*ti);
  psi=(2*PI*F*(1/2)/CV);
  beta=atan(2*PI*theta*F);

  for (j=1;j<=ren;j++){
    y=((2*j)-1)*dj/2;
    for (i=1;i<=col;i++){
      x=((2*i)-1)*di/2;

/*          Se analiza el 1er. caso: SONIDO DIRECTO          */

      dist=sqrt(pow((x-pfi),2)+pow((y-pfj),2)+pow((z-pfk),2));
      A1[j][i]=(N/4)*pow((R/dist),2);
      C1[j][i]=A1[j][i]*cos(2*PI*F*(dist/CV));
      S1[j][i]=A1[j][i]*sin(2*PI*F*(dist/CV));

/*  Se analiza el 2do. caso: RAYOS REFLEJADOS HASTA UN CIERTO NUMERO  */
/*          (m) DE VECES (APROXIMACION GEOMETRICA).          */

      for (cont=1;cont<=m;cont++){
        A2[j][i]=(N/4)*pow((R/(dist+(cont*1))),2);
        Z2=Z2+A2[j][i];
        C2[j][i]=A2[j][i]*cos(2*PI*F*((dist+(cont*1))/CV));
        ZC2=ZC2+C2[j][i];
        S2[j][i]=A2[j][i]*sin(2*PI*F*((dist+(cont*1))/CV));
        ZS2=ZS2+S2[j][i];
      }
      A2[j][i]=Z2;
      C2[j][i]=ZC2;
      S2[j][i]=ZS2;
      Z2=0.0;
      ZC2=0.0;
      ZS2=0.0;

/*  Se analiza el 3er. caso: RAYOS REFLEJADOS DESPUES DE UN CIERTO NUMERO  */

```

(m) DE VECES (APROXIMACION ESTADISTICA).

\*/

```

probi=((dist+1)*PI*pow(R,2))/V;
for (cont=1;cont<=m;cont++){
A3[j][i]=(N/4)*pow((R/(dist+(cont*1))),2)*probi;
Z3=Z3+A3[j][i];
C3[j][i]=A3[j][i]*cos(2*PI*F*((dist+(cont*1))/CV));
ZC3=ZC3+C3[j][i];
S3[j][i]=A3[j][i]*sin(2*PI*F*((dist+(cont*1))/CV));
ZS3=ZS3+S3[j][i];
}
A3[j][i]=Z3;
C3[j][i]=ZC3;
S3[j][i]=ZS3;
Z3=0.0;
ZC3=0.0;
ZS3=0.0;

/*          Se analiza el 4to. y último caso: SONIDO DIFUSO          */

A4[j][i]=(1/alpha_p)*((1*PI*pow(R,2))/V)*((1-alpha_p)*N);
C4[j][i]=A4[j][i]*pow((1+pow((2*PI*theta*F),2)), -0.5)*cos(phi+psi+beta);
S4[j][i]=A4[j][i]*pow((1+pow((2*PI*theta*F),2)), -0.5)*sin(phi+psi+beta);

/*          Se obtiene la Función de Transferencia de Modulación para un          */
/*          escucha en particular          */

A[j][i]=(A1[j][i]+A2[j][i]+A3[j][i]+A4[j][i]);
C[j][i]=(C1[j][i]+C2[j][i]+C3[j][i]+C4[j][i]);
S[j][i]=(S1[j][i]+S2[j][i]+S3[j][i]+S4[j][i]);

MTF[j][i]=(sqrt((pow(C[j][i],2)+pow(S[j][i],2)))/A[j][i]);
SNapp[j][i]=10*log10(MTF[j][i]/(1-MTF[j][i]));
if (SNapp[j][i]>15) SNapp[j][i]=15;
if (SNapp[j][i]<(-15)) SNapp[j][i]=(-15);
SNP[j][i]=SNP[j][i]+SNapp[j][i];
if (j==ptol && (F>12 && F<13)){
STI[j][i]=((SNP[j][i]/14)+15)/30;
if (escr==1) fprintf(ap,"      %5.2f      %8-5.2f\n",dist,STI[j][i]);
}
if (j==ptol && i==pto2){
if (F>0.6 && F<0.7){
system("cls");
printf("\n\tPosición de la fuente: (x,y,z)=(%4.2f,%4.2f,%4.2f)");
printf("[m]",pfi,pfj,pfk);
printf("\n\tPosición del escucha: (x,y,z)=(%4.2f,%4.2f,%4.2f)");
printf("[metros]",x,y,z);
}
}

```



```

printf("\n\n\n\n\n\t\t;Quiere guardar los datos en un archivo? (S/N) ==> ");
resp=getche();
if (resp=='S' || resp=='s'){
    printf("\n\n\t\tDeme el nombre del archivo 1 (Valores MTF): ");
    scanf("%s",nombre);
    printf("\n\n\t\tDeme el nombre del archivo 2 (Indices STI): ");
    scanf("%s",nombre2);
    if ( (fp=fopen(nombre,"w")) == NULL ){
        system("cls");
        printf("\n\n\n\n\n\t\t; No se puede abrir el archivo !!");
        getch();
        exit (1);
    }
    if ( (ap=fopen(nombre2,"w")) == NULL ){
        system("cls");
        printf("\n\n\n\n\n\t\t; No se puede abrir el archivo !!");
        getch();
        exit (1);
    }
    printf("\n[Se le recuerda que el archivo %s contendrá los índices de");
    printf("toda",strupr(nombre2));
    printf("\nla hilera a la cual pertenece el escucha que usted ");
    printf("seleccionó, es decir:");
    printf("\n      STI(ren,1), STI(ren,2), STI(ren,3), .....STI(ren,col) ]");
    printf("\n\n\n\nPulse cualquier tecla para continuar ...");
    getch();
    escr=1;
    fprintf(ap, "\n\n Distancia Valores\n      [m]          STI\n\n");
}
else escr=0;
system("cls");
for (j=1;j<=ren;j++){
    for (i=1;i<=col;i++){
        A[j][i]=0.0;
        A1[j][i]=0.0;
        A2[j][i]=0.0;
        A3[j][i]=0.0;
        A4[j][i]=0.0;
        C[j][i]=0.0;
        C1[j][i]=0.0;
        C2[j][i]=0.0;
        C3[j][i]=0.0;
        C4[j][i]=0.0;
        S[j][i]=0.0;
        S1[j][i]=0.0;
        S2[j][i]=0.0;
        S3[j][i]=0.0;
    }
}

```

A-34

```
S4[j][i]=0.0;
MTF[j][i]=0.0;
SNapp[j][i]=0.0;
SNP[j][i]=0.0;
STI[j][i]=0.0;
}
}

F=0;
f1=0.63/(pow(2,0.166));
opc='N';
continue;
}
} while (F<12);
fclose(fp);
fclose(ap);
}
```

## **Bibliografia**

## **BIBLIOGRAFIA.**

### **Libros**

- [1] BERANEK, LEO L.**  
Acoustics  
Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1954.
- [2] BERANEK, LEO L.**  
Acoustical Measurements  
(Acoustical Society of America), 1988.
- [3] BERANEK, LEO L.**  
Noise and Vibration Control  
Mc Graw-Hill Book Company Inc., 1971.
- [4] CASTAÑEDA, ROSALBA G.**  
Análisis Estadístico del Español, Inteligibilidad y una aplicación a la acústica de recintos  
Tesis presentada en la Facultad de Ciencias, U.N.A.M., 1987.
- [5] HASSALL, J. R./ZAVERI, K.**  
Acoustic Noise Measurements  
Brüel & Kjaer, 1979.
- [6] KINSLER, L. E./FREY A. R./COPPENS, A. B./SANDERS, J. V.**  
Fundamentals of Acoustics  
John Wiley & Sons Inc., 1962.
- [7] KRYTER, KARL D.**  
The effects of noise on man  
Academic Press Inc., 1985.



### **Artículos de revistas de Acústica**

- [8] BRADLEY, J.S. "Predictors of speech intelligibility in rooms", *J. Acoust. Soc. Am.* **80**, pp. 837-845 (1986).
- [9] HOUTGAST, T. & STEENEKEN, H.J.M. "A Multi-Language Evaluation of the RASTI-Method for Estimating Speech Intelligibility in Auditoria", *Acustica* **54**, pp. 185-199 (1984).
- [10] HOUTGAST, T. & STEENEKEN, H.J.M. "A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria", *J. Acoust. Soc. Am.* **77**, pp. 1069-1077 (1985).
- [11] HOUTGAST, T. & STEENEKEN, H.J.M. "A physical method for measuring speech-transmission quality", *J. Acoust. Soc. Am.* **67**, pp. 318-326 (1980).
- [12] HOUTGAST, T. & STEENEKEN, H.J.M. "Some Applications of the Speech Transmission Index (STI)", *Acustica* **51**, pp. 229-234 (1982).
- [13] HOUTGAST, T. & STEENEKEN, H.J.M. "RASTI", *Brüel & Kjør Tech. Rev.*, No. 3 (1985).
- [14] JACOB, KENNETH D. "Correlation of Speech Intelligibility Tests in Reverberant Rooms with Three Predictive Algorithms", *J. Audio Eng. Soc.* vol. **37**, pp. 1020-1029 (1989).
- [15] JACOB, KENNETH D. / BIRKLE, THOMAS K. / ICKLER, CHRISTOPHER B. "Accurate Prediction of Speech Intelligibility without the Use of In-Room Measurements", *J. Audio Eng. Soc.* vol. **39**, pp. 232-242 (1991).
- [16] PEUTZ, V. M. A.  
"Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room", *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. **19**, pp. 915-919 (1971).
- [17] RIETSCHOTE, H. F. VAN / HOUTGAST, T. / STEENEKEN, H. J. M.  
"Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function IV: A Ray-Tracing Computer Model", *Acustica* **49**, pp. 245-252 (1981).
- [18] SCHROEDER, M.R. "Modulation Transfer Functions: Definition and Measurement", *Acustica* **49**, pp. 179-182 (1981).

## **Normas**

### **Siglas:**

ANSI: American National Standard Institute

ASA : Acoustical Society of America

ISO : International Organization for Standardization

IEC : International Electrotechnical Commission

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

- [19]** "Methods for the Calculation of the Articulation Index", ANSI Standard S3.5-1969 (New York, 1969).
- [20]** "Method for Measuring the Intelligibility of Speech Over Communication Systems", ANSI Standard S3.2-1989 [ASA Standard 85-1989] (New York, 1989).
- [21]** "Acoustics - The construction and calibration of speech intelligibility tests", ISO Tech. Rep. TR 4870 (Switzerland, 1991).
- [22]** "Acoustics - Assessment of noise with respect to its effect on the intelligibility of speech". ISO Tech. Rep. TR 3352 (Switzerland, 1974).

## **Manuales**

- [23]** "Hypersignal User's manual"
- [24]** "PC-Matlab: User's Guide/Signal Processing Toolbox"