

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

DIVISION DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

EVALUACION DE AYUDAS AUDITIVAS
MEDIANTE RUIDO BLANCO

TESIS

que para obtener el título de
MAESTRA EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

PRESENTA

MA. DEL PILAR GRANADOS TREJO

9087
092107
1994

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. MIGUEL CADENA MÉNDEZ

SINODALES:

DR. JOAQUIN AZPIROZ LEEHAN

M. en C. MIGUEL CADENA MÉNDEZ

M. en I. JOEL JIMÉNEZ CRUZ

MÉXICO, D.F., SEPTIEMBRE DE 1994.

A

*M. en C. Miguel Cadena Méndez por sus ideas y
apoyo en todo momento*

*M. en I. A. Tomás Alfama C. por sus consejos
y recomendaciones para el procesamiento digital de la
información*

*Todos aquellos que han contribuido a la realización
del presente trabajo*

... mi sincero agradecimiento.

CAPITULO I. INTRODUCCION	1
CAPITULO II. RESPUESTA ACÚSTICA DE UNA AYUDA AUDITIVA.	
II.1 Especificaciones de una ayuda auditiva	5
II.2 Evaluación de una ayuda auditiva utilizando la norma internacional IEC-118-7, 1983.	8
II.3 Discusión sobre las limitaciones de las pruebas normalizadas.	17
CAPITULO III. LA AYUDA AUDITIVA COMO SISTEMA.	
III.1 Obtención de la respuesta de un sistema.	22
CAPITULO IV. DESCRIPCION DEL SISTEMA.	
IV.1 Equipo utilizado	30
IV.2 Generador de campo sonoro y recinto de prueba.	31
IV.3 Generador de ruido blanco.	33
IV.4 Convertidor analógico digital.	33
IV.5 Microcomputadora.	34
IV.6 Sacalc.	35
IV.7 Programación.	35
CAPITULO V. METODOLOGIA.	
V.1 Calibración del sistema Madsen.	36
V.2 Determinación del rango lineal en la ayuda auditiva.	38
V.3 Valoración de la ayuda auditiva con tonos puros.	39
V.4 Valoración con ruido blanco.	40

CAPITULO VI. RESULTADOS	43
CAPITULO VII. CONCLUSIONES.	48
BIBLIOGRAFIA.	51

APENDICE A:**FUNDAMENTOS TEORICOS DE PROCESOS ALEATORIOS.**

A.1 Proceso aleatorio.	A1
A.2 La variable aleatoria.	A2
A.3 Promedios y procesos ergódicos.	A3
A.4 Características espectrales de procesos aleatorios.	A7
A.5 Ruido blanco, propiedades.	A11
A.6 Respuesta de sistemas lineales a señales aleatorias.	A12
A.7 Estimadores espectrales, el método de Burg.	A16

APENDICE B:**INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.**

B.1 IEC 118-7, 1983	B1
---------------------	----

CAPITULO I

INTRODUCCION

En la búsqueda de la mejor estrategia de habilitación o rehabilitación de un paciente hipoacúsico, la elección de la mejor prótesis o ayuda auditiva es un problema complejo de resolver. Implica un conocimiento detallado, hasta donde esto sea posible, del desempeño de una ayuda auditiva (a.a), para con esta información intentar ofrecer una alternativa de amplificación complementaria para el paciente hipoacúsico. Una vez resuelto lo anterior ha de considerarse la naturaleza del padecimiento, las necesidades específicas de amplificación así como las características anatómicas del sujeto, esto es, se busca adaptar la a.a. al paciente; conformando con esto un "problema de evaluación-adaptación de una a.a".

La parte de evaluación se centra especialmente en la determinación de las características estáticas y dinámicas de la amplificación y de la calidad de la señal acústica liberada por una prótesis hacia el sistema auditivo. Se incluyen también consideraciones respecto a los dispositivos encargados de proteger la audición residual del sujeto; denominándose genéricamente a este conjunto como "características electroacústicas", (16). La importancia de la obtención fiel de estas características, en el intervalo de frecuencias correspondiente al habla, radica en que a partir de ellas un médico audiólogo decide la conveniencia o no de una a.a. para un paciente.

En cuanto a la adaptación de una a.a., el procedimiento común que sigue un médico especialista incluye: un examen otológico basado en una batería de pruebas audiométricas practicadas al paciente que permiten identificar el tipo de necesidades de amplificación que debe satisfacer una a.a. para que con esta información y las características de desempeño de la a.a. determine la mejor alternativa tecnológica para el paciente.

Así, debe entenderse que el problema evaluación-adaptación se resuelve a partir de las especificaciones técnicas de una a.a. y de la interpretación de los resultados de las pruebas audiométricas. En otras palabras significa encontrar soluciones tecnológicas a un problema médico escasamente definido en términos ingenieriles.

El proceso de selección y adaptación de la prótesis auditiva debe estar apoyado por recursos tecnológicos que permitan medir directamente el nivel de presión sonora en la vecindad de la membrana timpánica, para así asegurar, por un lado un nivel de amplificación óptimo para la pérdida auditiva en cuestión y por el otro no rebasar niveles de amplificación riesgosos para el paciente. Desafortunadamente no siempre se dispone de estos recursos lo que hace que el proceso de adaptación se resuelva atendiendo a pruebas conductuales, y por tanto haciéndolo fuertemente dependiente de quien realiza dicha tarea.

Por otra parte, con el propósito de definir y normalizar la valoración de las características electroacústicas de una a.a., hoy día diferentes países e instituciones han publicado normas (16), que refieren además de la metodología de medición de estas características, la descripción detallada de los instrumentos, condiciones de señal de excitación y recinto de prueba, con el propósito de que

exista un común entendimiento entre fabricantes y usuarios para un control mínimo de calidad, además de facilitar con esto la tarea de adaptación.

No obstante si bien ya existen normas para la valoración del desempeño de a.a., todavía persisten preguntas abiertas como:

¿Existe alguna otra forma de evaluar una a.a. que asegure un mejor conocimiento del desempeño de la misma?

¿Existen características dinámicas del oído más relevantes que las hasta hoy estudiadas que mejoren el proceso de adaptación de una a.a.?

Considerando que toda propuesta tecnológica que busca responder a un problema de salud esta determinada por el grado de conocimiento del problema que se quiere resolver así como por el grado de desarrollo tecnológico alcanzado, es claro que las preguntas planteadas en el párrafo anterior guardan una estrecha relación. En la medida que se avanza en el conocimiento del problema y que el desarrollo de tecnología toma lugar, la salida que esta última tenga a mano se modifica debida a la relación de interdependencia entre problema y solución; situación que también se da en el otro sentido. Un ejemplo ilustrativo lo tenemos en los estudios realizados por el médico húngaro George Von Bekesy - premio Nobel de medicina 1961- que al plantearse el problema de como mejorar las comunicaciones telefónicas en su país le condujo a descubrir los mecanismos de selectividad y discriminación del órgano de Corti. Sin duda, desde un punto de vista práctico, un conocimiento profundo de la biofísica del oído debe estar aparejado a un desarrollo tecnológico que permita la aplicación de dicho conocimiento a la rehabilitación de un paciente, la carencia de ello limita el beneficio que de este conocimiento se pueda obtener.

El trabajo de esta tesis está relacionado con el planteamiento de la primera pregunta. El objetivo es desarrollar un método alternativo de evaluación de una a.a. que además de cuantificar los parámetros electroacústicos normalizados permita obtener información adicional que contribuya a facilitar el proceso de adaptación de la misma.

El método aquí propuesto se basa en una señal de excitación del tipo "ruido blanco" que permite mediante técnicas de estimación espectral determinar con mayor fidelidad la respuesta en frecuencia de una a.a. que se halla operando en un modo de amplificación lineal.

CAPITULO II

RESPUESTA ACÚSTICA DE UNA AYUDA AUDITIVA:

II.1 ESPECIFICACIONES DE UNA AYUDA AUDITIVA:

Medir las características electroacústicas de una a.a no es una tarea sencilla, se requiere además de instrumentos calibrados y normalizados un ambiente acústicamente controlado con la finalidad de disminuir el número de artefactos que se pudieran introducir en los resultados de la prueba.

Las actuales normas internacionales facilitan comparar prótesis auditivas diseñadas por los distintos laboratorios y fabricantes que existen en el mundo. Las pruebas y metodología que describen estas normas incluyen en términos generales las características de: A) Un ambiente de prueba que emule condiciones de campo sonoro libre que asegure un ambiente relativamente libre de ecos y perturbaciones sonoras externas. B) Una excitación acústica mediante tonos puros de nivel de presión sonora variable y frecuencia en el ancho de banda de la voz, que se envía a la prótesis bajo prueba a través de un acoplador HA-2 de 2cc de paredes rígidas, figura No.1, considerando que este volumen de aire es equivalente al que quedaría contenido entre el transductor acústico de la prótesis auditiva y la membrana timpánica del sujeto. C) Un micrófono de medición (denominado de prueba) que se encarga de capturar la energía acústica de salida una vez que ha sido amplificada la señal de excitación por la prótesis, para su posterior análisis.

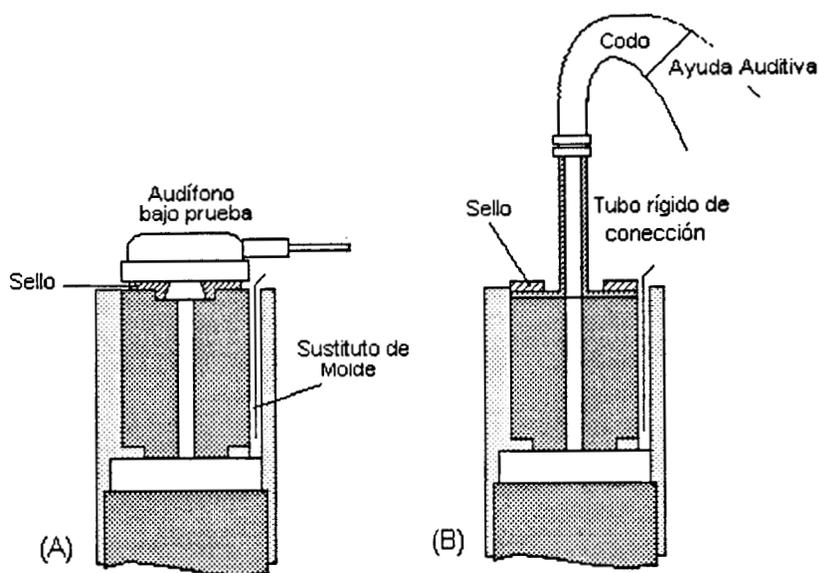


Figura No.1. Corte longitudinal del acoplador "normalizado" tipo HA-2 y manera de acoplarse mecánicamente: A) receptor tipo botón y B) cuernito "hook" de una a.a. tipo curveta.

Actualmente existen diversas normas y recomendaciones internacionales que indican los procedimientos y técnicas a seguir en la evaluación de prótesis auditivas, entre las más importantes podemos citar: Acoustical Society of America (Norma ASA STD) (1); American National Standard for Specification of Hearing Aid Characteristics (Norma ANSI S3.22); Deutsche Normen (Norma DIN 45 605, DIN 45 600); Food & Drug Administration, (Norma Part 801 FDA) EUA; International Electrotechnical Commission (Norma IEC-118) (16); Japanese Industrial Standard (Norma JIS C 5512-1981) y Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Norma PTB) .

Cada una de estas normas especifican la instrumentación, ambiente de prueba y parámetros electroacústicos a medir en las a.a.s, como punto de referencia y comparación entre los diversos diseñadores y fabricantes. Si bien las normas son diversas, son aproximadamente equivalentes y las diferencias que existen entre ellas no son significativas.

El desarrollo de estos procedimientos normativos se ha dado, como puede observarse en las normas citadas en el párrafo anterior, en los países poseedores de tecnología. En el caso del nuestro la oferta de prótesis auditivas proviene precisamente de ellos; por lo cual ante la carencia de un proceso normativo propio y atendiendo que las diferencias entre las actuales normas internacionales no son sustanciales, ver apéndice B , se eligió la norma IEC 118-7 (1983) como punto de referencia para el desarrollo de este trabajo.

II.2 EVALUACION DE UNA AYUDA AUDITIVA UTILIZANDO LA NORMA International Electrotechnical Commission IEC-118-7, 1983.

En la figura No.2 se muestra a manera de diagrama a bloques la instrumentación típica necesaria para la evaluación electroacústica de una a.a., se observan tres secciones principales I) excitación acústica, cuya tarea es la de proporcionar convenientemente los niveles de presión sonora y frecuencia de la señal senoidal de excitación; II) ambiente de prueba, necesario para asegurar condiciones experimentales y de registro adecuadas. - nivel de presión sonora constante en la vecindad del micrófono de la a.a., bajo nivel de ruido ambiente, condiciones ambientales próximas a un campo sonoro libre, etc.- y III) registro de la información de entrada y salida, en términos de magnitud y distorsión principalmente.

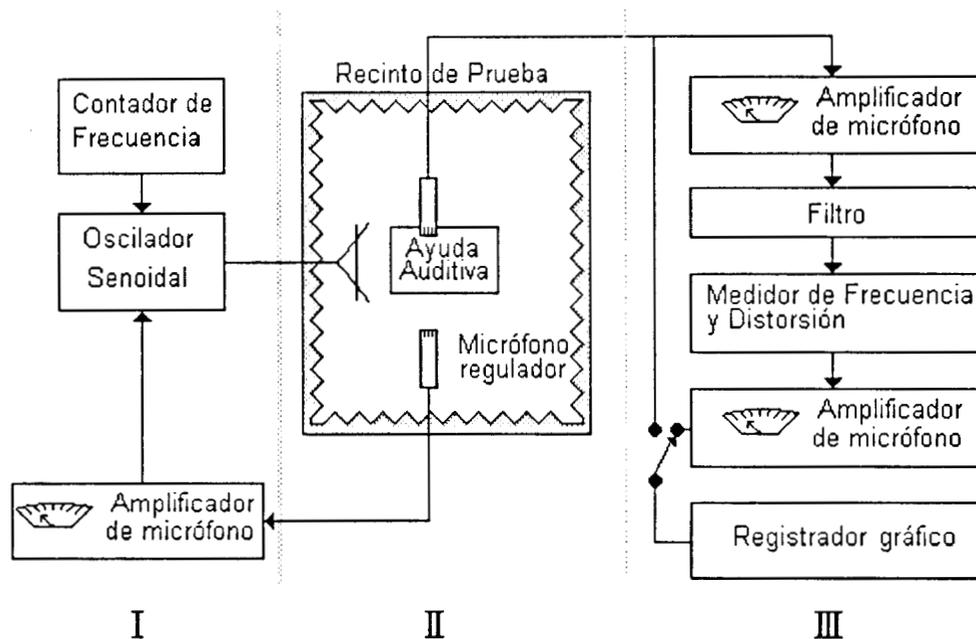


Figura No. 2. Diagrama a bloques de la instrumentación típica para el análisis electroacústico de una a.a. I) Excitación acústica; II) Ambiente de prueba y III) Registro, explicación en el texto.

En este trabajo se eligió seguir los lineamientos y procedimientos establecidos en la norma *IEC-118-7, 1983* para la obtención de los parámetros electroacústicos que caracterizan a una a.a. de conducción aérea y modo de amplificación lineal. En particular esta norma alude, como las demás, a: 1) Características del ambiente acústico de prueba; 2) Características de la señal de excitación; 3) Características del acoplamiento acústico de la a.a. y el micrófono de prueba del sistema de evaluación, y 4) La definición y significado de cada uno de los parámetros electroacústicos como funciones de entrada salida, esto es cómo la señal de salida varía en relación a su entrada.

En nuestro caso particular en la figura No. 3 se muestra un diagrama a bloques de la instrumentación utilizada. Esta comprende un sistema comercial evaluador de a.a.s funcionando en conjunto con una microcomputadora tipo pc y un digitalizador, ambos necesarios para la captura y posterior procesamiento de la información. Si se comparan las figuras No.2 y No.3 se podrá reconocer fácilmente que son equivalentes. En la figura No.3 los bloques (A), (B), (C) y (D) están incluidos en un sistema evaluador de a.a.s comercial *IGO-HAT 1500 De Madsen Electronics.*, correspondiendo a los bloques I y II de la figura No.2, similarmente los bloques (E), (F), (G) y (H) corresponderían al bloque III.

A continuación se aclaran algunos conceptos relevantes, según *IEC-118-7, 1983*:

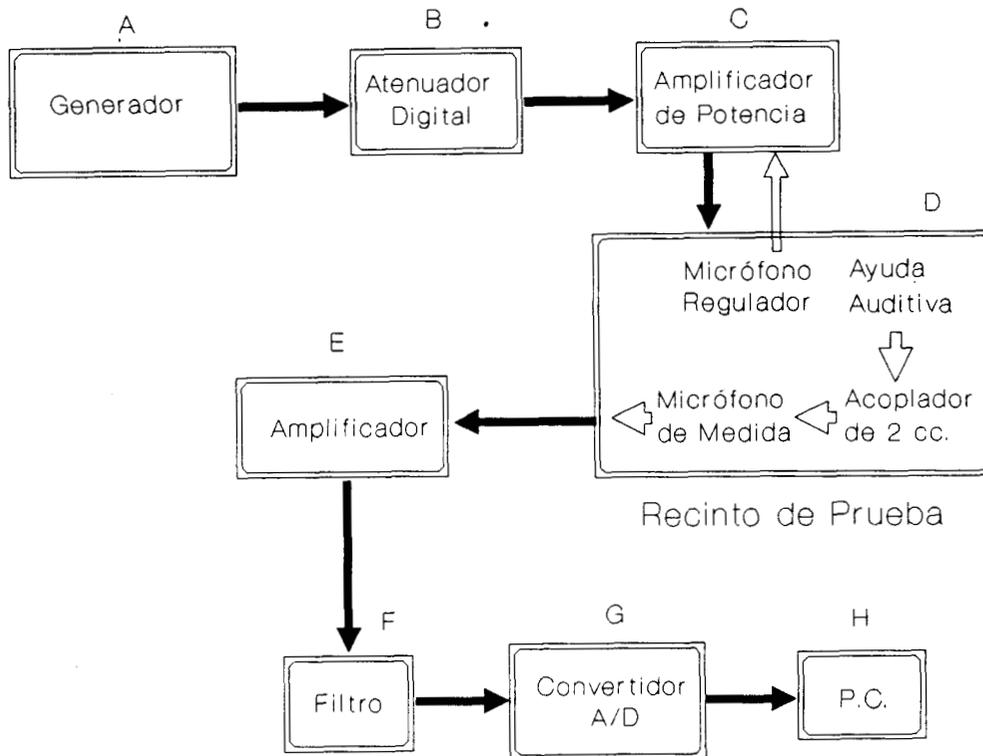


Figura No.3. Diagrama a bloques de la instrumentación empleada en este trabajo. (A), (B) y (C) corresponden a la excitación acústica, (D) corresponde a el recinto de prueba, (E) y (F) al registro, todos ellos parte de un sistema comercial de evaluación de a.a.s IGO-HAT 1500 de Madsen Electronics, (G) Tarjeta de conversión analógica digital PCL-812 y (H) Microcomputadora tipo PC.

Ambiente y equipo de Prueba:

La a.a. se debe colocar en un recinto anecóico (recinto acústicamente "muerto" libre de reverberaciones y vibraciones) libre de ruidos o campos magnéticos, de tal manera que la presencia de éstos no altere las mediciones más allá de 0.5 dB. En el interior de este recinto se debe generar, mediante una bocina, un campo sonoro libre a manera de excitación acústica de prueba, ver figura No. 4.

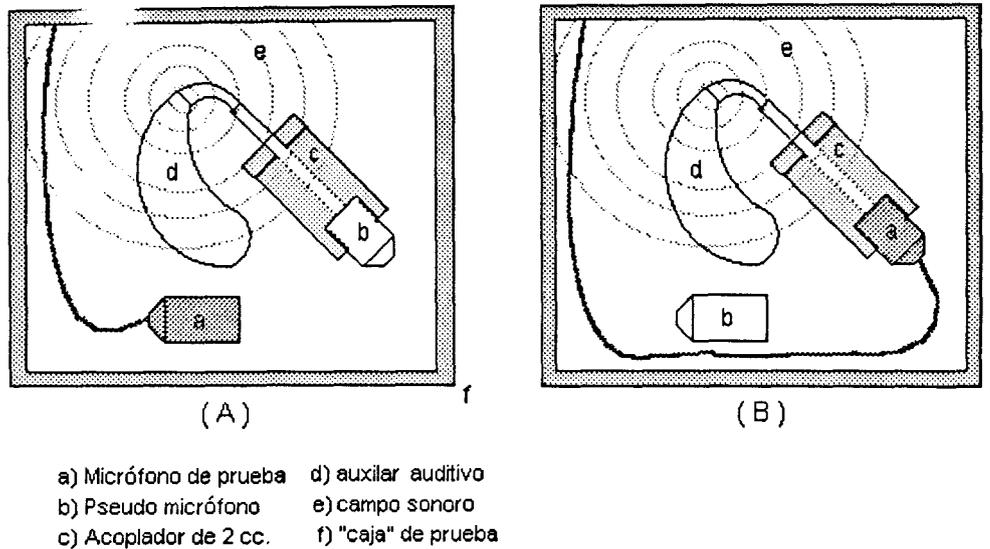


Figura No.4 Ubicación del a.a. en el interior del recinto de prueba. (A) Verificación del nivel SPL (nivel de presión sonora) del campo sonoro de prueba, interruptor de la a.a. en posición de apagado. (B) Captura de la señal amplificada por la a.a. para propósitos de evaluación. El centro del micrófono de la a.a. debe estar 5 ± 3 mm del centro del micrófono de control. Si se requiere una mayor distancia debido a las características físicas de la a.a., el micrófono de control debe estar lo más cerca posible del micrófono de entrada de la a.a.

Fuente Sonora:

Esta fuente, en combinación con un micrófono calibrado, debe ser capaz de mantener el nivel de presión sonora deseado, en el rango de 50 a 90 dB_{SPL}, a la entrada de la a.a. con un error de ± 1.5 dB_{SPL} en el intervalo de 200 a 2000 Hz y de ± 2.5 dB_{SPL} en el intervalo de 2000 a 5000 Hz. La frecuencia de la señal de prueba debe tener una desviación mínima de $\pm 2\%$.

Si la calibración de la fuente sonora depende de las condiciones ambientales, es necesario realizar las correcciones necesarias cuando se requiera.

Acoplamiento acústico:

Se refiere al acoplamiento mecánico requerido para acoplar la salida de la a.a. con el micrófono de prueba del sistema de evaluación. Este acoplador posee un volumen de 2 cc. La respuesta en frecuencia de la combinación micrófono-acoplador de 2 cc debe ser uniforme en un intervalo de de 200 a 5000 Hz con una variación a lo más de $\pm 1\%$.

El equipo necesario para la medición de niveles de presión sonora, en un acoplador, producidos por una a.a. deben seguir los siguientes requerimientos:

a) La calibración de los niveles de presión sonora del sistema de medida deben tener una exactitud de $\pm 0.5 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ en la frecuencia específica.

b) Los niveles de presión sonora medidos con el micrófono deben ser constantes con una variación a lo más de $\pm 1 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ en el rango de 200 a 2000 Hz y con $\pm 1.5 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ en el rango de 2000 a 5000 Hz.

c) La distorsión armónica total debe ser menor al 1% para niveles mayores de 130 dB_{SPL} en el rango de frecuencias de 200 a 5000 Hz, y menor al 3% para niveles de presión sonora entre 130 dB_{SPL} y 145 dB_{SPL} .

Es necesario mantener un nivel SPL constante de entrada en el campo sonoro por medio de un micrófono de monitoreo.

Para alcanzar un nivel SPL constante adecuado en el punto de prueba en el rango en frecuencias requerido, la distancia entre el centro del diafragma del micrófono de monitoreo y la a.a. debe estar entre 5 mm y 10 mm. Las a.a.s con

micrófonos direccionales deben estar orientadas con dirección hacia los puntos de máxima sensibilidad, hacia la fuente sonora, ver figura No.4. Se recomienda el uso de un micrófono de prueba calibrado de media pulgada.

Es necesario cuidar que el acoplador o algún otro soporte mecánico para la a.a. no introduzca perturbaciones del campo sonoro en la vecindad de la a.a. en las frecuencias de prueba.

Condiciones Normales de Operación para una a.a:

El voltaje de la batería de alimentación para la a.a. no debe variar más de $\pm 50\text{mv}$ del valor especificado.

El control de ganancia puede colocarse en la posición para prueba de máxima ganancia (full on gain) o en la posición de prueba de referencia, dependiendo del tipo de prueba que se esté efectuando.

El control de tono se debe colocar en una posición bien definida o en aquella posición en donde se observe el mayor rango en frecuencia. Todos los demás controles, incluyendo el de ganancia automática (CAG) se deben colocar en la posición que asegure el máximo OSPL90 y la máxima curva de ganancia total de la a.a. (IEC 118-0).

Medidas Recomendadas, Especificaciones y Tolerancias:

La norma define una serie de parámetros electroacústicos a medir los cuales describen las características de funcionamiento de la a.a., la interpretación que se les debe dar es:

Nivel de Saturación de Presión Sonora a 90 dB_{SPL} de entrada (OSPL90):

Se define como el nivel de presión sonora desarrollado en un acoplador de 2 c.c. cuando el nivel de la señal acústica de excitación de entrada es 90 dB_{SPL} y el control de ganancia de la a.a se encuentra al máximo. De esta curva se determina el máximo nivel de presión sonora (OSPL90).

El propósito de esta prueba es determinar la curva de nivel de presión sonora en un acoplador de 2 cc medida como función de la frecuencia a una intensidad de 90 dB_{SPL} de entrada, entendiéndose esta curva como la curva de saturación de la a.a. El control de ganancia (o volumen) debe colocarse al máximo. Con esta prueba se obtiene la máxima excursión a obtener en la a.a.

Ganancia Máxima (Full on Gain):

Es la ganancia acústica de la a.a. cuando su control de ganancia está en la máxima posición, para una entrada de 50 ó 60 dB_{SPL}. Para a.a.s con CAG el nivel de entrada debe ser de 50 dB_{SPL} de tal manera que no alcance el umbral del CAG. Esta prueba se realiza en el intervalo en frecuencias de 200 a 5000 Hz.

La finalidad de esta prueba es obtener la máxima ganancia de la a.a. a lo que se considera un nivel de conversación normal, en la zona del habla.

Curva Básica de respuesta en frecuencia:

El propósito de esta prueba es determinar la curva de respuesta en frecuencia de la a.a., se obtiene ajustando el control de ganancia (o volumen) en la posición de ganancia de referencia, esta posición corresponde al nivel de presión sonora resultante al restar 15 dB al valor SPL de la curva OSPL90 a la frecuencia de

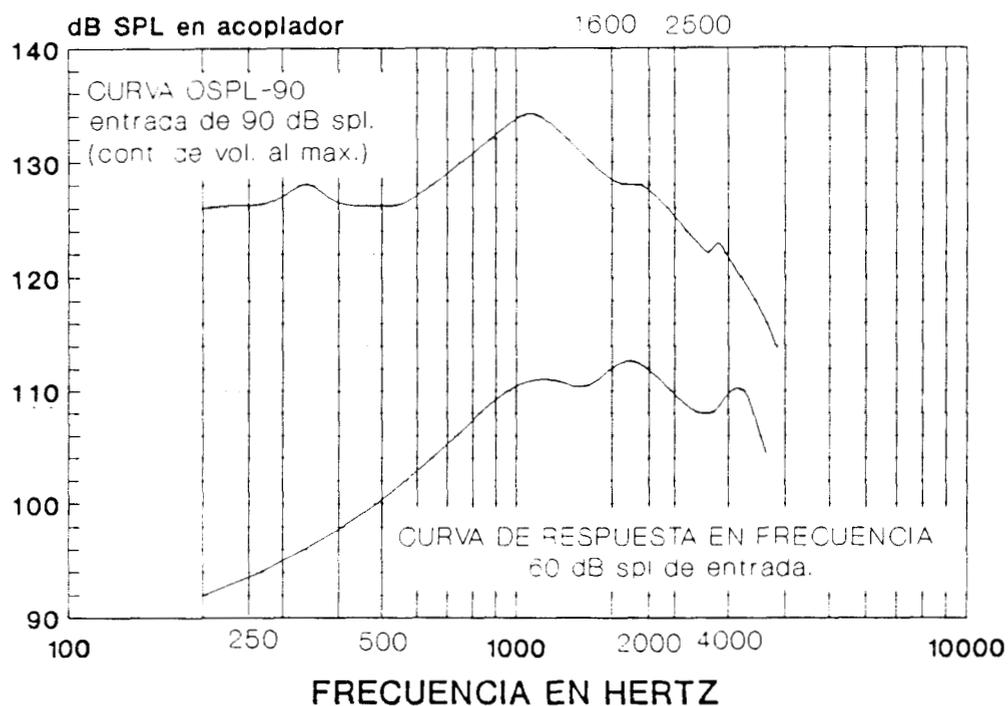


Figura No.5. Curva básica de respuesta en frecuencia. Entendida como la forma típica de funcionamiento de una a.a. El control de volumen está en la posición de *ganancia de referencia* y la excitación tiene un nivel de presión sonora típico de conversación (60 dB_{SPL}). La curva OSPL90 muestra el comportamiento de la a.a. cuando sucede un nivel de presión sonora moderadamente fuerte.

1600 Hz (denominada frecuencia de referencia); y excitando la a.a. con 60 dB_{SPL} (lo que equivale a un nivel de conversación normal). Con esta prueba se busca encontrar la respuesta básica de la a.a. y el ancho de banda que comprende, ver figura No. 5.

Distorsión Armónica Total:

Representa el porcentaje total de los niveles de presión sonora de la 2ª y 3ª armónicas generadas por la a.a. a una excitación de entrada de 70 dB_{SPL} en las frecuencias de 400, 500, 630, 800, 1000, 1250 y 1600 Hz. El control de ganancia (o volumen) se coloca en la posición correspondiente a la prueba de ganancia de

referencia. La posición de los demás controles depende del usuario (para mayor información revisar la norma IEC 118-0).

Ruido interno generado por la a.a.:

Mediante esta prueba se mide la magnitud del ruido interno generado por la a.a. El control de ganancia (volumen) se coloca en la posición correspondiente para la prueba de referencia, con una excitación de 0 dB_{SPL} de entrada.

En la Tabla No.1 se encuentran condensadas las pruebas que señala la norma para caracterizar una a.a

TABLA 1.- Pruebas especificadas por IEC-118 (15) para la valoración de ayudas auditivas.

CARACTERÍSTICA	dB _{SPL} de Entrada	FRECUENCIA (Hz)	CONTROL DE GANANCIA	PRESENTACIÓN
OSPL90(saturación)	90	200-5000	Máximo	Curva
Máximo OSPL90	90	cualquiera en 200 a 5000	Máximo	Número (dB)
Ganancia de Referencia	60	1600	En posición tal que la salida sea 15 dB menor que el valor OSPL90	
Respuesta en frecuencia	60	200-5000	Posición de ganancia de referencia.	curva
Distorsión armónica total	70	intervalo 400-1600	Posición de ganancia de referencia.	número (%)
Ruido equivalente de entrada	60	1600	Posición de ganancia de referencia.	número (dB)

Nota: Para información más detallada se invita al lector a consultar la norma en extenso en el apéndice B.

II.3 DISCUSION SOBRE LAS LIMITACIONES DE LAS PRUEBAS NORMALIZADAS:

Las diversas normas internacionales describen metodologías para la evaluación de prótesis auditivas mediante una excitación de tonos puros de intensidad variable y frecuencia específica, en un intervalo de 200 a 5000 Hz. Los resultados que se obtienen son parámetros electroacústicos de desempeño de la a.a. obtenidos, en su mayoría, a partir de su curva de respuesta en frecuencia.

Puesto que el barrido en frecuencia en este intervalo se hace a lo sumo en tercios de octava, la fidelidad con la que se obtiene la curva de respuesta en frecuencia es pobre, en la mayoría de los casos los evaluadores comerciales de a.a.s consideran alrededor de 21 puntos en el intervalo de 200 a 5000 Hz, de aquí que en la curva "interpolada" se tenga una resolución muy pobre.

Por otra parte se ha demostrado que con la técnica de medida con tonos puros, que especifica la Norma para la determinación de la curva de respuesta en frecuencia de una a.a., el resultado que se observa en muchas de ellas es un aplanamiento de la curva de respuesta en frecuencia en la región de frecuencia inferiores a 1 kHz; este efecto ha sido llamado "blooming", que al parecer se trata de un artefacto de medida que altera esta zona (21).

Desde un punto de vista técnico, trabajar con ondas senoidales puras implica algunos problemas como lo es la construcción de un generador senoidal acústico que entregue una señal prácticamente libre de componentes armónicos (16). Otro problema es la creación de ondas estacionarias; siempre que una fuente continua de sonido está presente en un recinto se producen dos campos sonoros, uno es

el campo de sonido directo o de arribo directo de la fuente y otro el campo sonoro reverberante que se produce por las reflexiones de las superficies del recinto. Los tonos puros se consideran ser estímulos no apropiados para usarse en campo sonoro debido a que la interacción entre el sonido directo y el reflejado en un campo cerrado provoca patrones de ondas estacionarias que causan variaciones considerables en el nivel de presión sonora de la misma señal en diferentes lugares.

En la actualidad, aunque no existe un estímulo complejo normalizado (de frecuencia no específica) ni un procedimiento de análisis con él, existen sistemas evaluadores de a.a.s comerciales (*IIGO-HAT 1500 de Madsen Electronics* y *Aurora de Nicolet Inc.*) que incorporan señales complejas como estímulos de prueba, aunque por otra parte existen sistemas que no los consideran (*Phonix 1000 de Frye Electronics* y *REM-100 de Rastronics Inc.*).

Hay algunas razones del por qué está surgiendo el uso de señales complejas para evaluar a.a.s; primero, éstas son más representativas de la voz o de las señales típicas del medio ambiente que los tonos puros (22); segundo, el uso de señales complejas consume menos tiempo de procesamiento y minimiza los problemas de ondas estacionarias en un campo sonoro y tercero, señales complejas multitonales o ruido limitado en banda pueden ser útiles para medir distorsión en un mayor número de frecuencias en una a.a.

Por último, puede resultar útil evaluar las características espectrales de la respuesta de una a.a. que resultan de señales de entrada que se parezcan a la voz en un intento de correlacionar información acústica con problemas tales como confusión entre consonantes.

Se propone para este trabajo excitar la a.a. mediante una señal compleja como lo es el *Ruido Blanco*, ver apéndice A, utilizando esta señal en conjunto con un método de análisis espectral de alta resolución para la obtención de la curva de respuesta en frecuencia de una a.a., y así lograr una mayor definición, eludiendo por otra parte los errores en que se incurren con el método normalizado.

CAPITULO III

LA AYUDA AUDITIVA COMO SISTEMA

Una a.a. normalizada está formada por diferentes bloques como se observa en la figura No. 6.

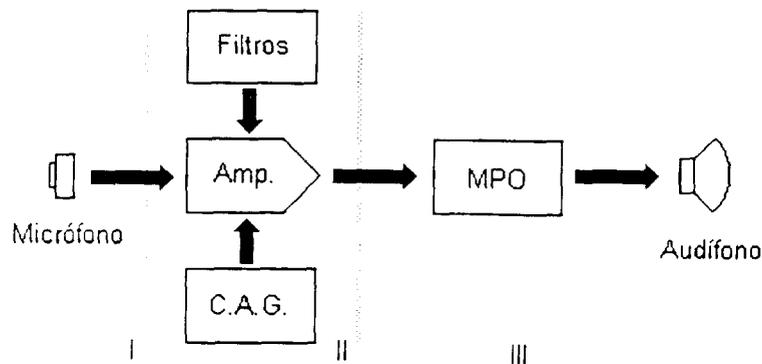


Figura No. 6 Diagrama a bloques de una a.a. Se observan tres partes principales: I) Micrófono de entrada; II) Bloque de amplificación (filtros, amplificador y control automático de ganancia C.A.G.) y III) Circuitos de protección, circuito limitador de máxima potencia de salida M.P.O. y bocina.

Los bloques principales de una a.a. son: un micrófono, un amplificador, un receptor (altavoz) y una fuente de poder; la tarea básica que debe cumplir toda a.a. es la de compensar, mediante una adecuada amplificación de los sonidos, la deficiencia auditiva de un sujeto, logrando con esto obtener un mayor beneficio de su audición residual.

Preservando la idea de auxiliar al individuo en la percepción de los sonidos del habla sin que esto signifique algún daño subsecuente, toda a.a. incorpora dispositivos de protección al usuario tal que lo proteja de situaciones catastróficas (sonidos intensos, repentinos y niveles de amplificación excesivos). Logrando con ello una amplificación conveniente y cómoda para el usuario al evitar rebasar su nivel de incomodidad sonora (LDL) (14).

Una a.a. incorpora controles que permiten manejar, dentro de ciertos límites, su curva de respuesta en frecuencia de acuerdo a las necesidades de adaptación del sujeto.

Asímismo posee controles encargados de brindar al paciente una amplificación segura y cómoda. Dentro de esta categoría están el control de Máxima Potencia de Salida (MPO) y el Control Automático de Ganancia (CAG). El primero de estos controles evita que se alcancen niveles de amplificación que puedan lesionar el oído del usuario. El segundo posibilita manejar modalidades de amplificación no lineales, reduciendo la magnitud de la amplificación de la a.a. para excitaciones de entrada con una magnitud por encima de un cierto umbral preestablecido por el especialista que realiza la adaptación.

Toda prótesis auditiva es básicamente un sistema no lineal en el que para propósitos de prueba es posible configurarla para evaluar en un intervalo lineal. Esta naturaleza no lineal de la a.a. no debe perderse de vista puesto que olvidarlo ocasiona una interpretación errónea de la curva de respuesta en frecuencia (17). De ahí que la interpretación de la curva de respuesta en frecuencia de la a.a. difiera si ésta contiene o no un control de CAG.

III.1 OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA DE UN SISTEMA

Casi todos los problemas de ingeniería involucran el estudio del comportamiento de un sistema. En el caso de una a.a., actualmente, esto se hace mediante el método de análisis senoidal. Aún en el audiograma convencional, el umbral del nivel auditivo de una persona respecto a la frecuencia, se encuentra mediante pruebas de tonos puros. Sin embargo una entrada senoidal es un tanto diferente de los estímulos que ocurren comúnmente en la naturaleza. La respuesta obtenida con tonos puros frecuentemente no se relaciona con la obtenida con señales complejas. Resulta pues razonable probar con señales que estén más cercanas a los sonidos de la naturaleza, a los cuales el oído o la a.a. están expuestos.

Por otra parte existen métodos de análisis como la respuesta al impulso y ruido blanco, que pueden brindar resultados más confiables y precisos a la par que satisfacen requerimientos de automatización. Estos dos procedimientos no encontraron amplia aplicación al menos por dos razones importantes, primero el equipo necesario para realizar el análisis espectral con un detalle adecuado había sido de un costo elevado y en muchas ocasiones los algoritmos eran muy lentos; segundo, no se disponían de medios para compensar las irregularidades en la respuesta en frecuencia de la fuente acústica generadora de la señal de prueba. Sin embargo recientemente, la aparición de computadoras de propósito especial y algoritmos de computación veloces han variado esta circunstancia (3).

Se puede decir que un sistema es un transductor de señal que transforma el estímulo o señal de entrada en la correspondiente señal de salida o respuesta. La a.a. como sistema transforma la señal de voz de entrada en una señal de voz "procesada" y amplificada.

Los sistemas generalmente se dividen en: a) distribuidos vs. parámetros concentrados; b) estacionarios vs. no-estacionarios; c) discretos vs. continuos; d) determinísticos vs. aleatorios; e) estables vs. inestables; f) invariantes en el tiempo vs. variantes en el tiempo. En su caso una a.a. puede clasificarse como un sistema de parámetros concentrados, estacionario, continuo, determinístico, lineal -en ciertas modalidades-, estable y variante en el tiempo.

Mucho de lo mencionado previamente es aplicable a la clasificación de señales. De particular importancia para este trabajo lo son las señales determinísticas vs. no-determinísticas. Las señales determinísticas son aquellas que aceptan una representación matemática precisa, tales como la senoide, el impulso, el escalon y señales exponenciales. Las señales no-determinísticas o aleatorias son aquellas como el ruido, y en cierto sentido, la voz humana que no puede representarse precisamente mediante recursos matemáticos.

El análisis de sistemas lineales mediante señales determinísticas ofrece pocas dificultades puesto que se basa en una sólida base matemática. Sin embargo, cuando se involucran señales aleatorias el enfoque tienen que ser probabilístico.

La mayoría de los casos de análisis de sistemas involucra el estudio de una "caja negra", i.e., el conocimiento de su estructura interna por medio de su respuesta a señales convenientes.

La respuesta de un sistema a una señal de entrada consiste de a) transitorios y b) componentes de estado estable. La respuesta transitoria es una respuesta natural y es una característica del sistema. Sin embargo en la mayoría de los casos,

la respuesta transitoria se desvanece con el tiempo. Puede estudiarse mediante señales del tipo no periódico como el escalón unitario. El estudio de la forma de onda característica del control automático de ganancia de una a.a. cae en esta categoría. La respuesta de estado estable persiste tanto como lo haga la señal de entrada y es por tanto la respuesta que perdura. Es en esta respuesta en la que estamos interesados y que puede obtenerse mediante señales determinísticas o aleatorias.

Las señales de entrada y salida de un sistema usualmente no se estudian en el dominio del tiempo, siendo la excepción los estudios que involucran el estudio de la forma de onda de la respuesta transitoria y retardo en el tiempo de un sistema. En el caso de una a.a. el retardo en el tiempo, aunque pequeño, entre las señales de entrada y salida puede llegar a ser una consideración de importancia especialmente cuando un sujeto utiliza una a.a. en un oído con cierto daño y posee el otro en buen estado. No obstante lo anterior, el análisis en el dominio de la frecuencia es más conveniente ya que brinda una mayor información acerca del sistema.

La entrada $x(t)$ y la salida $y(t)$ de un sistema lineal están relacionadas por la ecuación (1), como se muestra en la figura No.7.

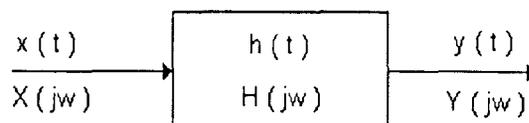


Figura No.7. Relación entrada - salida en un sistema lineal

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t-a)h(a)da$$

(1)

donde $h(t)$ es la respuesta al impulso del sistema y a es una variable muda. Aplicando directamente la transformada de Fourier a esta integral de convolución se obtiene

$$Y(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega) \quad (2)$$

donde $\omega = 2\pi f$ y $Y(j\omega)$, $X(j\omega)$ y $H(j\omega)$ son las transformadas de Fourier de $x(t)$, $y(t)$ y $h(t)$, respectivamente, siendo en general complejas. $H(j\omega)$ es la función de transferencia del sistema que contiene información de magnitud y fase, i.e.,

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \angle \phi(j\omega) \quad (3)$$

Para muchos de los procesos físicos presentes en la Naturaleza, una señal aleatoria representa un modelo matemático más realista que su contraparte determinística. Estas señales aleatorias no se pueden representar mediante una señal específica, una tabla de datos o regla de cualquier tipo, si la señal no ha ocurrido; admitiendo solamente una descripción estadística.

Invariablemente las señales presentes en la naturaleza poseen un cierto grado de aleatoriedad. Aunque para propósitos de análisis se trabaje con funciones específicas, los procesos generadores de estas señales (p.ej. la voz) son complejos y dificultan la descripción de las mismas, que en términos generales son no periódicas, aleatorias y de energía no finita.

Conceptualmente es posible hablar de una representación matemática para señales de energía infinita en términos de lo que se denomina proceso aleatorio estacionario. A estas señales, aleatorias o estocásticas, es preciso considerarlas

como miembros de un ensamble de señales, el cual está caracterizado por funciones de densidad de probabilidad, ver apéndice A.

La prueba con senoides es tal vez el método más conveniente para la evaluación de la respuesta en frecuencia y obtención de la función de transferencia de un sistema, aunque tiende a ser un método que consume mucho tiempo y ofrece una información limitada. Otra alternativa sería el uso de señales como el ruido blanco que contenga componentes de frecuencia en el ancho de banda del sistema.

El análisis armónico que significa la aplicación de las ecuaciones (1) y (2) sólo es posible cuando se emplean señales de excitación determinísticas. En contraparte para un "Análisis Espectral" las señales aleatorias como el ruido blanco sólo pueden especificarse mediante su función de autocorrelación en el dominio del tiempo y su densidad de potencia espectral en el dominio de la frecuencia.

La función de autocorrelación $R_{xx}(\tau)$ de una señal aleatoria estacionaria es una medida de su valor en ese instante u otro tiempo. Para $x(t)$

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^{\infty} x(t)x(t + \tau)dt \quad (4)$$

donde τ es el corrimiento en el tiempo y T es la extensión de la señal en el dominio del tiempo. La transformada de Fourier de $R_{xx}(\tau)$ dada por $S_{xx}(j\omega)$ denominada densidad de potencia espectral (PSD).

Similarmente existe una función de correlación cruzada entre $x(t)$ y $y(t)$ dada por

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^{\infty} x(t)y(t + \tau)dt \quad (5)$$

Remplazando $y(t)$ por la integral de convolución y trasladando la anterior ecuación al dominio de la frecuencia

$$S_{xy}(j\omega) = S_{xx}(j\omega)H(j\omega)$$

o bien

$$H(j\omega) = \frac{S_{xy}(j\omega)}{S_{xx}(j\omega)} \quad (6)$$

Si $S_{xx}(j\omega)$ es plano, como en el caso del ruido blanco, entonces

$$H(j\omega) = K S_{xy}(j\omega) \quad (7)$$

donde K es una constante.

Las ecuaciones (6) y (7) pueden utilizarse para estimar la función de transferencia con señales aleatorias. Puesto que $S_{xx}(j\omega)$ rara vez es plana, la ecuación (6) brinda una mejor estimación de $H(j\omega)$ de lo que hace la ecuación (5). Debe observarse que la función de auto-Densidad Espectral de Potencia es una cantidad real mientras que la Densidad de Potencia espectral cruzada $S_{xy}(j\omega)$ es compleja. Así se tiene la siguiente ecuación

$$S_{xy}(j\omega) = |S_{xy}(j\omega)| \angle \phi_{xy}(j\omega) \quad (8)$$

Si se comparan las ecuaciones (8) y (3) se observa que la información de fase dada por $S_{XX}(j\omega)$ es la misma que la de $H(j\omega)$.

El significado del corrimiento de fase con respecto a la frecuencia reside en el hecho de que el retardo en el tiempo con respecto a la frecuencia representa una diferencia de fase y está dada por (4).

$$t_d(\omega) = \frac{\phi_{xy}(\omega)}{\omega} \quad (9)$$

Referirse a procesos aleatorios implica tratar con registros de longitud (T) infinita que permitan dar resultados precisos. Ahora bien, si los resultados se basan en registros de longitud (T) finita se requiere que estos sean calificados por métodos estadísticos que avalen la probabilidad de su validez dentro de un cierto intervalo.

La representación matemática de estas señales se realiza en términos de promedios estadísticos, ejemplo de esto es la función de autocovarianza o autocorrelación $R_{XX}(\tau)$.

A través de la función de autocorrelación $R_{XX}(\tau)$ es posible obtener la densidad espectral de potencia $S_{XX}(\tau)$ para una señal aleatoria, por medio del promedio al cuadrado de la densidad espectral, ya que ésta es proporcional a la transformada de Fourier de $R_{XX}(\tau)$ y convierte al dominio de la frecuencia exactamente la misma información que $R_{XX}(\tau)$ convierte en el dominio del tiempo, cuando el proceso tiene un valor promedio cero.

La transformada de Fourier de la función de autocorrelación puede interpretarse en términos de la distribución en frecuencia de la potencia de una señal. En una secuencia la función de autocorrelación y su transformada permiten describir el efecto de procesar señales de energía infinita con un sistema lineal. Dicho de otra forma, pasar señales de energía infinita a través de un sistema lineal se puede describir en términos del efecto reflejado sobre la función de autocorrelación de una secuencia, cuando el proceso es estocástico. Un punto particularmente útil es considerar una señal de ruido blanco que en teoría tiene un espectro en frecuencia constante. Cuando una señal aleatoria de densidad espectral conocida (v.gr. ruido blanco) se hace pasar a través de un sistema lineal de respuesta en frecuencia desconocida, es posible determinar la respuesta en frecuencia del sistema de una forma sencilla, ver apéndice A.

CAPITULO IV

DESCRIPCION DEL SISTEMA

La instrumentación básica necesaria para la realización de las pruebas electroacústicas consistió de un excitador acústico de ruido blanco y tonos puros, la a.a. propiamente dicha, un ambiente de prueba acústicamente controlado, un acoplador acústico, un convertidor A/D y una microcomputadora, interconectados tal y como se muestra en la figura No.8.

IV.1 EQUIPO UTILIZADO

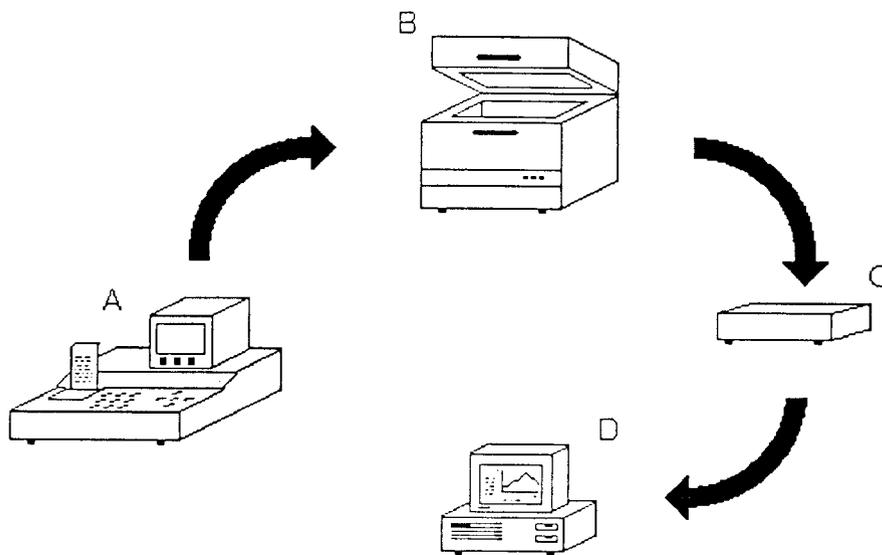


Figura No.8. Diagrama a bloques del Sistema. A) Sistema evaluador de ayudas auditivas marca *Madsen IGO-HAT 1500*. B) Recinto de prueba con ambiente acústicamente controlado. C) Convertidor analógico-digital PCL-812. D) Microcomputadora del tipo PC.

IV.2 GENERADOR DEL CAMPO SONORO Y RECINTO DE PRUEBA.

Como se puede observar en la figura No.7(A) un sistema evaluador de ayudas auditivas *Madsen IGO-HAT 1500*. Este sistema está diseñado de acuerdo a las normas ANSI S3.22 1982, 1987 e IEC 118 1959, 1983; para la prueba de a.a.s en modos de funcionamiento lineal y con CAG. Consiste de una microcomputadora de propósito específico, graficador interconstruido, monitor de color y de una "caja" o recinto de prueba (B) provisto de un ambiente acústicamente controlado. Dadas las características de aislamiento acústico de la "caja" el fabricante menciona que no es necesario tomar precauciones particulares en cuanto a las condiciones acústicas de la habitación donde se halle el equipo; sin embargo es recomendable una habitación silenciosa. De acuerdo a ANSI, las condiciones ambientales estándares deben ser:

Temperatura	$23^{\circ} \pm 5$
Humedad Relativa	0 % a 80%
Presión Atmosférica	760 (+ 35, - 150) mm Hg

Este recinto incluye micrófono de prueba de media pulgada, micrófono fantasma, acoplador de 2 cc (tipo DBO138) y adaptador micrófono/acoplador, ver figura No.4.

El módulo denotado por (A) en la figura No.8 es el responsable de producir la excitación de ruido blanco que genera el campo sonoro calibrado, de 50 a 85 dB_{SPL}, dentro del recinto de prueba (B). Las posibles variaciones de este campo debidas al ambiente circundante se corrigen mediante un programa de autocalibración propio del sistema.

Como método de prueba se emplea el **Método de Sustitución**, definido como: método de medida de la respuesta de una a.a. en el que ésta y el micrófono empleado para medir la presión sonora de campo libre, se colocan alternamente en el mismo punto (*punto de prueba*) del campo sonoro (IEC 118, 1959).

IV.3 GENERADOR DE RUIDO BLANCO.

Este forma parte del módulo (A) en la figura No.8. La "fuente" de ruido consiste en amplificar el ruido de la unión de un diodo semiconductor polarizado en modo inverso. Este ruido se filtra y amplifica por un filtro pasa altos con frecuencia de corte de 100 Hz y 40 dB/década, seguidamente se pasa por un atenuador digital, para después ser enviado hacia el altavoz del recinto de prueba. De este "ruido" es posible obtener tres diferentes tipos de excitación tales como "Speech Noise"- ruido definido en el ancho de banda de la voz humana-, Ruido Blanco y un ruido de banda ancha que puede ser configurado por el usuario; con la facilidad de ajustar la intensidad sonora de 50 hasta 85 dB_{SPL}, medidos en el recinto de prueba.

Se juzgó necesario comprobar las características del ruido blanco generado por este sistema por lo cual se analizó. Este análisis se realizó solicitando desde la microcomputadora del sistema *Madsen* una excitación acústica de ruido blanco de una intensidad de 60, 70 y 80 dB_{SPL}; procediendo a digitalizar la señal eléctrica del micrófono de prueba alojado en el recinto de prueba, en ausencia de a.a. De esta señal se obtuvo su densidad de probabilidad, se encontró una densidad Gaussiana centrada en cero.

IV.4 CONVERTIDOR ANALOGICO DIGITAL.

Consiste de una tarjeta de conversión analógica-digital multifunciones tipo PCL-812 (2) de alta velocidad para IBM PC/XT/AT y computadoras compatibles, figura No.8 (C). Esta tarjeta instalada en una ranura de expansión de la microcomputadora consiste de un convertidor A/D de 12 bits por aproximaciones

sucesivas con una frecuencia de muestreo máxima de 30 kHz en modo de acceso directo a memoria (DMA), y un rango bipolar para entradas analógicas entre ± 1 v hasta ± 10 v (2).

La señal eléctrica, de entre ± 5 volts, proveniente del micrófono de prueba se obtuvo posterior a una primera etapa de filtrado pasa altos del sistema *Madsen*. Dado que era necesario contar con rapidez en la conversión se eligió un modo de adquisición en DMA corriendo el convertidor a una frecuencia de 25 kHz, con esto, de acuerdo al teorema de Nyquist, aseguramos explorar en el rango de nuestro interés, 125 Hz a 8 000 Hz.

La programación necesaria para la adquisición y generación de los archivos se codificó en Turbo Pascal V.5

IV.5 MICROCOMPUTADORA

Se utilizó una microcomputadora 286 del tipo PC con coprocesador matemático, monitor VGA de color, disco duro de 40 Mbytes y memoria RAM de 1 Megabyte, figura No.8 (D).

Con esta microcomputadora se organiza la adquisición de la señal del micrófono de prueba y generan y analizan los archivos de cada una de las pruebas realizadas. Lo mismo que permite correr programas complementarios para el contraste de la información obtenida mediante tonos puros y ruido blanco.

IV.6 SACALC

Para el análisis de la señal, proveniente del micrófono de prueba, se utilizó un paquete comercial para el procesamiento digital de señales denominado *Signal Analysis Calculator -SACALC-* (13), escrito en Turbo Pascal V 5.5, capaz de realizar operaciones aritméticas y operaciones más complejas de una secuencia dada. Estas operaciones incluyen estimación espectral, predicción lineal, análisis estadístico, transformadas rápidas de Fourier, convoluciones, multiplicaciones de secuencias y ventaneo. Este programa opera con secuencias, entendiéndose con esto un número complejo en el sentido matemático y puede consistir de hasta 1024 muestras.

IV.7 PROGRAMACION.

Adicionalmente al paquete *SACALC* fué necesario desarrollar programación, codificada en Turbo Pascal V. 5.5 para:

- 1) Controlar la adquisición de la señal del micrófono de prueba, vía la PCL-812
- 2) Generación de los archivos correspondientes a la adquisición.
- 3) Graficación simultanea de las respuestas obtenidas con ruido blanco y tonos puros. De acuerdo al mismo formato del *Madsen*.

CAPITULO V

METODOLOGIA

Como elementos de experimentación se eligieron tres a.a.(s), dos de marca, una curveta y una caja, y una caja diseñada en el Laboratorio de Audiología de la UAM-I. Mediante el empleo del *Sistema Madsen*, a cada una de estas ayudas auditivas se les practicó una valoración por tonos puros y ruido blanco, de tal manera de obtener los parámetros electroacústicos de acuerdo a la norma (16) y poder compararlos.

V.1 CALIBRACION DEL SISTEMA MADSEN:

El *Sistema Madsen* se calibró atendiendo a dos aspectos principales: primero comprobación del nivel de presión sonora (SPL) a nivel del recinto o "caja" de prueba y segundo alteraciones de las curvas de respuesta en frecuencia de una a.a. debidas a variaciones del campo sonoro dentro del recinto de prueba.

Calibración del micrófono de prueba

Haciendo uso de una rutina propia del *Madsen* para la calibración del micrófono de prueba y de un pistófono B&K tipo 4230 que libera una intensidad de $93.7 \text{ dB}_{\text{SPL}} @ 1000 \text{ Hz}$ se ajustó la sensibilidad del micrófono; logrando con ello hacer corresponder la lectura leída por el micrófono de prueba con los 93.7 dB del pistófono. Con esto se asegura por una parte la fidelidad de la lectura

brindada por el micrófono de prueba y por otra el que la intensidad del campo sonoro dentro del recinto de prueba corresponda con lo exhibido en la pantalla del monitor *Madsen*; en este último sentido se comprobó con la ayuda del sonómetro el nivel SPL de ruido blanco presente en el interior de la "caja" de prueba, encontrando una variación máxima de ± 3 dB_{SPL} de la periferia con respecto al centro.

Calibración del recinto de prueba

Para la calibración de la "caja" de prueba se procede de la siguiente manera: se coloca la a.a. en la parte central de la caja de prueba y en posición de apagado, se acoplan, en cada extremo de la cavidad de 2 c.c., el receptor de la a.a. y el pseudo micrófono, cuidando que el micrófono de prueba quede a ± 3 mm del micrófono de ésta, tal y como lo muestra la figura No. 4.A. En estas condiciones se ejecuta el programa propio del *Madsen* que mediante una gráfica de frecuencia vs. intensidad obtiene la curva de respuesta en frecuencia del sistema (caja de prueba, a.a., micrófono, pseudomicrófono y acoplador de 2 c.c.). En teoría esta curva debiera ser plana atendiendo a que el sistema no introducirá información adicional a la que se busca en la evaluación de la a.a.; en caso contrario compensa las alinealidades de tal forma de ajustar a una curva plana que no enmascare la respuesta de la a.a.

Por último, la rutina de calibración del micrófono de prueba se realizó una sola vez, verificándose la misma ocasionalmente; no así la calibración de la "caja de prueba" que debía realizarse al inicio de cada experimento, cada vez que se cambiaba de excitación (i.e. ruido blanco o tonos puros), de a.a. o se alteraba la disposición del conjunto alojado en el interior de la "caja" de prueba.

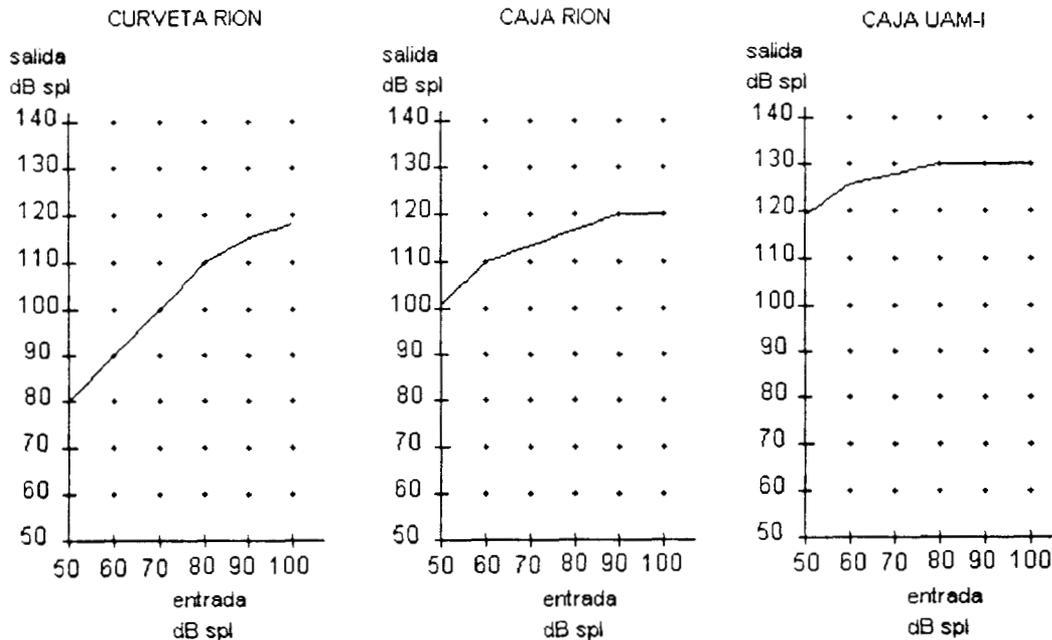


Figura No. 9. Determinación del intervalo de amplificación lineal de las a.a.s, para una excitación de un tono puro de entre 50 a 90 dB_{SPL} @ 1200 Hz.

V.2 DETERMINACION DEL INTERVALODE AMPLIFICACIÓN LINEAL EN LA A.A.

Concluida la rutina de calibración, se intercambiaron las posiciones de pseudo micrófono y el micrófono de prueba, ver la figura No.4B se encendió la a.a. y se procedió a ubicar un rango de trabajo en modo lineal. Para esto fué necesario desconectar a nivel de tarjeta de circuito impreso el control automático de ganancia CAG, cuando esta era posible, y en los casos en que esto no, se llevó este control hasta la posición de máximo umbral.

Para la determinación de un intervalo de amplificación lineal se utilizó la prueba de la relación entrada-salida del *Madsen*. Esta se realiza excitando con una señal de 1200 Hz con una intensidad de entre 50 a 90 dB_{SPL}; en estas condiciones se obtuvieron las gráficas que se observan en la figura No.9.

V.3 VALORACION DE LA A.A. CON TONOS PUROS:

Esta evaluación se realizó por completo mediante el empleo del *Madsen IGO-HAT 1500*, previa ejecución de la "**Calibración del micrófono de prueba**" y una vez determinado el rango lineal de la a.a.

1) Se encendió el sistema permitiendo un periodo de calentamiento mínimo de veinte minutos.

2) Del **Main menu** se eligió la opción **2. Testing Hearing Aid** que conduce al menú siguiente:

- 1. Test Site Calibration**
- 2. Identification**
- 3. H.A. identification**
- 4. Test A (Automatic, IEC 118-7 1983)**
- 5. Test B (Manual, IEC (1959))**
- 7. Analysis**
- ...

que permite calibrar el recinto de prueba, tal y como se describe en "**Calibración del recinto de prueba**", teclear los datos de quien realiza la prueba, fecha, número de serie y marca de la a.a. y modo de amplificación en que se encuentra funcionando, lineal o con CAG; eligiendo por último **Test A (Automatic, IEC 118-7 1983)** denotada por la opción **4** que considera, entre otros, los parámetros electroacústicos definidos en el apartado II.2. Esta opción considera los siguientes parámetros para la prueba:

TEST A	
Test Mode	Automatic
Measure Standard	IEC 118-7 1983
Stim. Type	Tone
Test Samples	12/Octave
Freq. Range Lower Limit	125 Hz
Freq. Range Upper Limit	8000 Hz
Battery Type	7: Mercury 675 1.3 v 5.0 ohms
Battery Menu	on

3) En estas circunstancias con el interruptor de la a.a. en posición de encendido y colocada dentro del recinto de prueba, como se muestra en la figura 4B, se procedió a ejecutar la evaluación para una intensidad de entre 60 a 90 dB_{SPL}.

V.4 VALORACION CON RUIDO BLANCO:

Esta evaluación se realizó utilizando el conjunto formado por el *Madsen IGO-HAT 1500*, la tarjeta de conversión PCL-812 y la microcomputadora tipo PC. Previa ejecución de la "**Calibración del micrófono de prueba**" y una vez determinado el rango lineal de la a.a., se procedió de la siguiente manera.

1) Se encendió el sistema permitiendo un periodo de calentamiento mínimo de veinte minutos.

2) Del **Main menu** se eligió la opción **2. Testing Hearing Aid** que conduce al menú siguiente:

- 1. Test Site Calibration**
- 2. Identification**
- 3. H.A. identification**
- 4. Test A (Automatic, IEC 118-7 1983)**
- 5. Test B (Manual, IEC (1959))**
- 7. Analysis**
- ...

que permite calibrar el recinto de prueba, tal y como se describe en "**Calibración del recinto de prueba**", utilizando en este caso como señal acústica de calibración la de ruido blanco, teclear los datos de quien realiza la prueba, fecha, número de serie y marca de la a.a. y modo de amplificación en que se encuentra funcionando, lineal o con CAG; eligiendo por último **Analysis** denotado por la opción **7**. En esta opción se cuenta con una señal acústica de entre 60 a 85 dB_{SPL} a nivel del recinto de prueba que permite obtener la curva de respuesta en frecuencia de la a.a., aunque en esta opción el *Sistema Madsen* no calcula ningún parámetro electroacústico como en las opciones **4** y **5**.

3) En estas circunstancias con el interruptor de la a.a. en posición de encendido y colocada dentro del recinto de prueba, como se muestra en la figura No. 4B, se procedió a ejecutar la evaluación para una intensidad de entre 60 a 85 dB_{SPL}.

4) En presencia de la excitación de ruido blanco se capturó, mediante la tarjeta de conversión PCL-812, la señal eléctrica generada por el micrófono de prueba a nivel del primer amplificador de acoplamiento. La longitud de la señal capturada fué de 1024 puntos en palabras de 12 bits para una frecuencia de muestreo de 25 kHz; permitiendo con esto lograr observar, sin problemas, frecuencias hasta de 8 kHz dentro de la señal entregada por el micrófono de prueba.

5) Los datos resultados de la digitalización de la señal del micrófono de prueba se guardaron en archivos para posteriormente ser analizados fuera de línea con ayuda del paquete para el procesamiento digital de señales *Sacalc* (13).

6) Con ayuda de *Sacalc* se calculó el espectro en frecuencia utilizando el Método Paramétrico de Burg con un orden 40 de acuerdo al criterio de Akaike (18) y limitado a 1024 puntos. Asumiendo un proceso estacionario en sentido amplio.

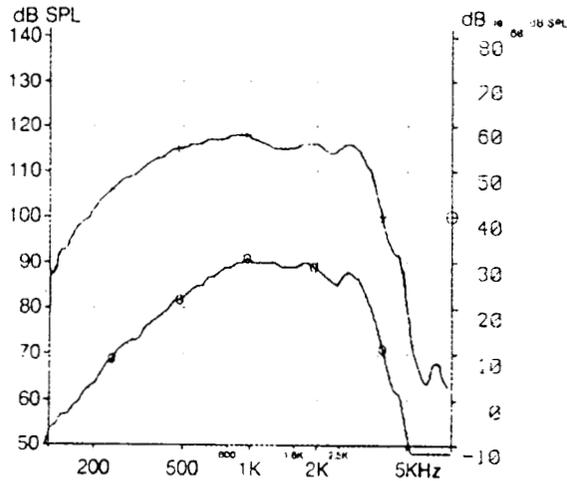
7) A partir del espectro obtenido en el punto anterior y mediante un programa escrito exprofeso se calcularon los parámetros electroacústicos aludidos por IEC 118-7 1983, eligiendo para la presentación de esta información un formato igual al del *Sistema Madsen* a fin de facilitar la posterior comparación de parámetros y gráficas.

CAPITULO VI

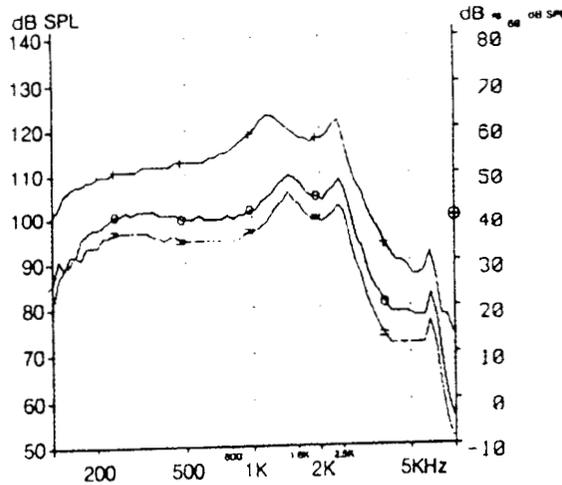
RESULTADOS

En las figuras No. 10 y No. 11 se pueden observar los resultados obtenidos con el método de tonos puros y ruido blanco. En el primer caso se trata de la impresión de salida generada por el *Sistema Madsen* y en el segundo de la salida generada por un programa escrito expresamente.

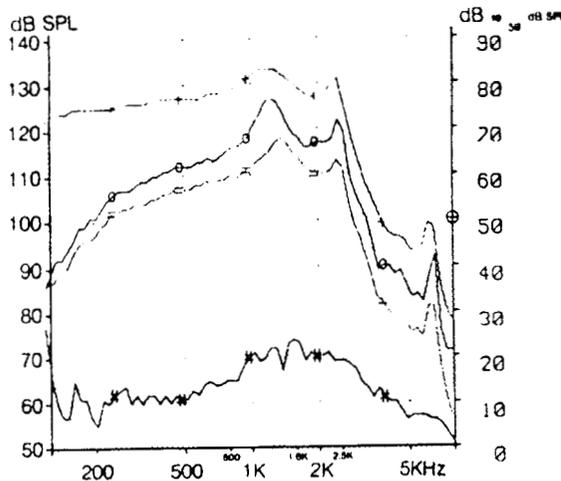
Con el propósito de facilitar la comparación de los resultados obtenidos por estos dos métodos, en la Tabla I se enlista un concentrado de los resultados obtenidos para las tres a.a.s empleadas. Con igual propósito en la figura No.12 se pueden observar en la columna de la derecha las curvas de respuesta en frecuencia obtenidas para una intensidad de entrada de 60 dB_{SPL} y en la columna de la izquierda se observan las curvas de SSPL90 para tonos puros y SSPL85 para ruido blanco.



Max. SSPL90/OSPL90:
844 Hz, 120 dB SPL
HFA-SSPL90/Ref. Test OSPL90:
117 dB SPL
HFA/Ref. Test Full-on Gain:
31 dB
Ref. Test Gain:
Goal Value: 42 dB
Meas. Value: 31 dB
Max. Output Freq. Response:
1000 Hz, 93 dB SPL
HFA/Ref. Test Freq. Response:
91 dB SPL
Frequency Range:
315 - 3779 Hz



Max. SSPL90/OSPL90:
1193 Hz, 125 dB SPL
HFA-SSPL90/Ref. Test OSPL90:
121 dB SPL
HFA/Ref. Test Full-on Gain:
51 dB
Ref. Test Gain:
Goal Value: 46 dB
Meas. Value: 46 dB
Max. Output Freq. Response:
1500 Hz, 108 dB SPL
HFA/Ref. Test Freq. Response:
106 dB SPL
Frequency Range:
150 - 3000 Hz



Max. SSPL90/OSPL90:
1127 Hz, 135 dB SPL
HFA-SSPL90/Ref. Test OSPL90:
132 dB SPL
HFA/Ref. Test Full-on Gain:
71 dB
Ref. Test Gain:
Goal Value: 57 dB
Meas. Value: 57 dB
Max. Output Freq. Response:
1418 Hz, 120 dB SPL
HFA/Ref. Test Freq. Response:
117 dB SPL
Frequency Range:
238 - 2832 Hz

Figura No.10. Gráficas y parámetros asociados resultantes de la evaluación mediante tonos puros practicada a tres a.a.s distintas - superior: curveta RION, medio: caja RION e inferior: caja UAM-I - utilizando el Sistema Madsen. (=) Curva de respuesta en frecuencia, (O) Curva de ganancia máxima y (+) Curva SSPL90.

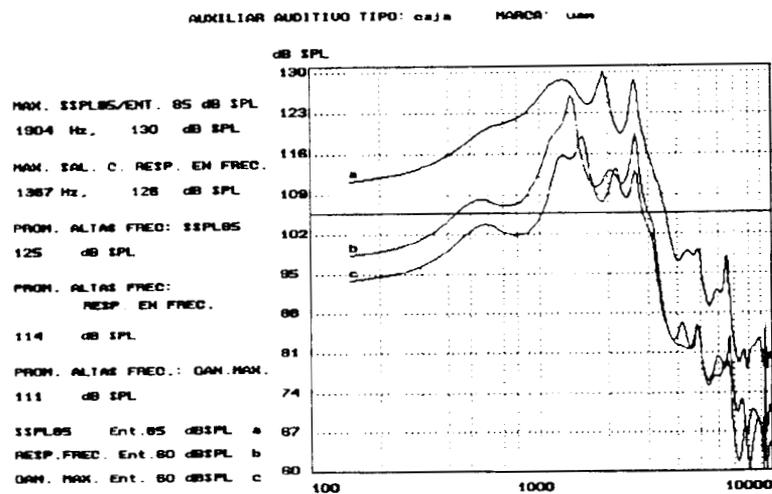
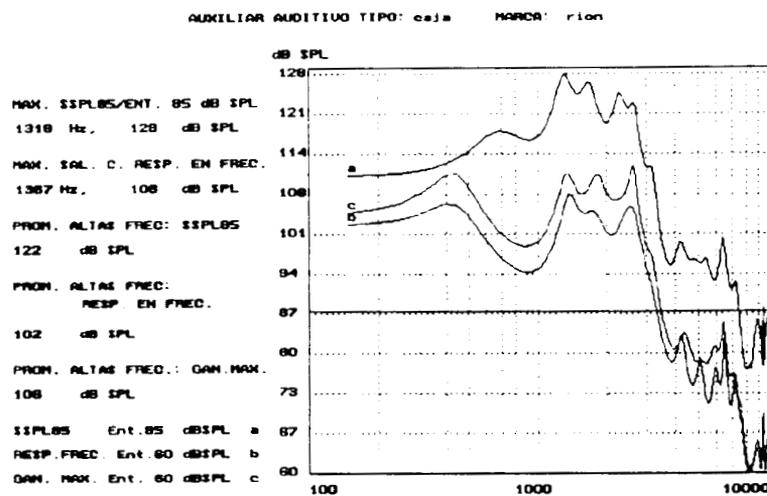
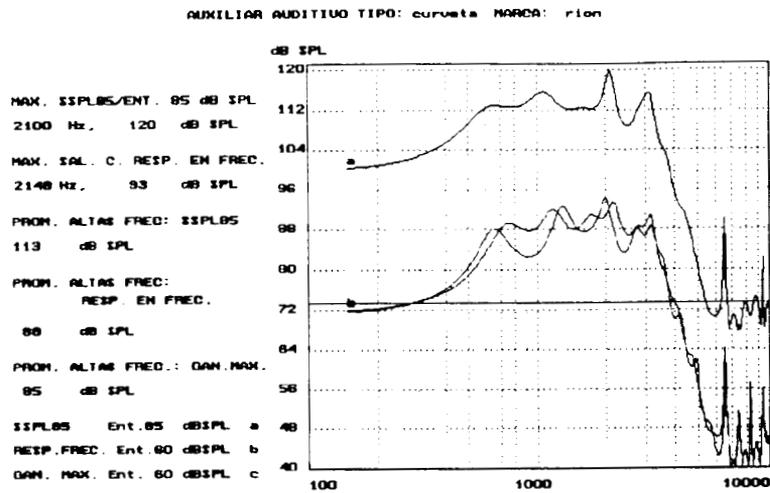


Figura No.11. Ensamble de los resultados correspondientes a la evaluación con ruido blanco, practicada a tres a.a.s distintas, utilizando el *Sistema Madsen*, la tarjeta PCL-812, la computadora y software desarrollado para el cálculo de los parámetros asociados.

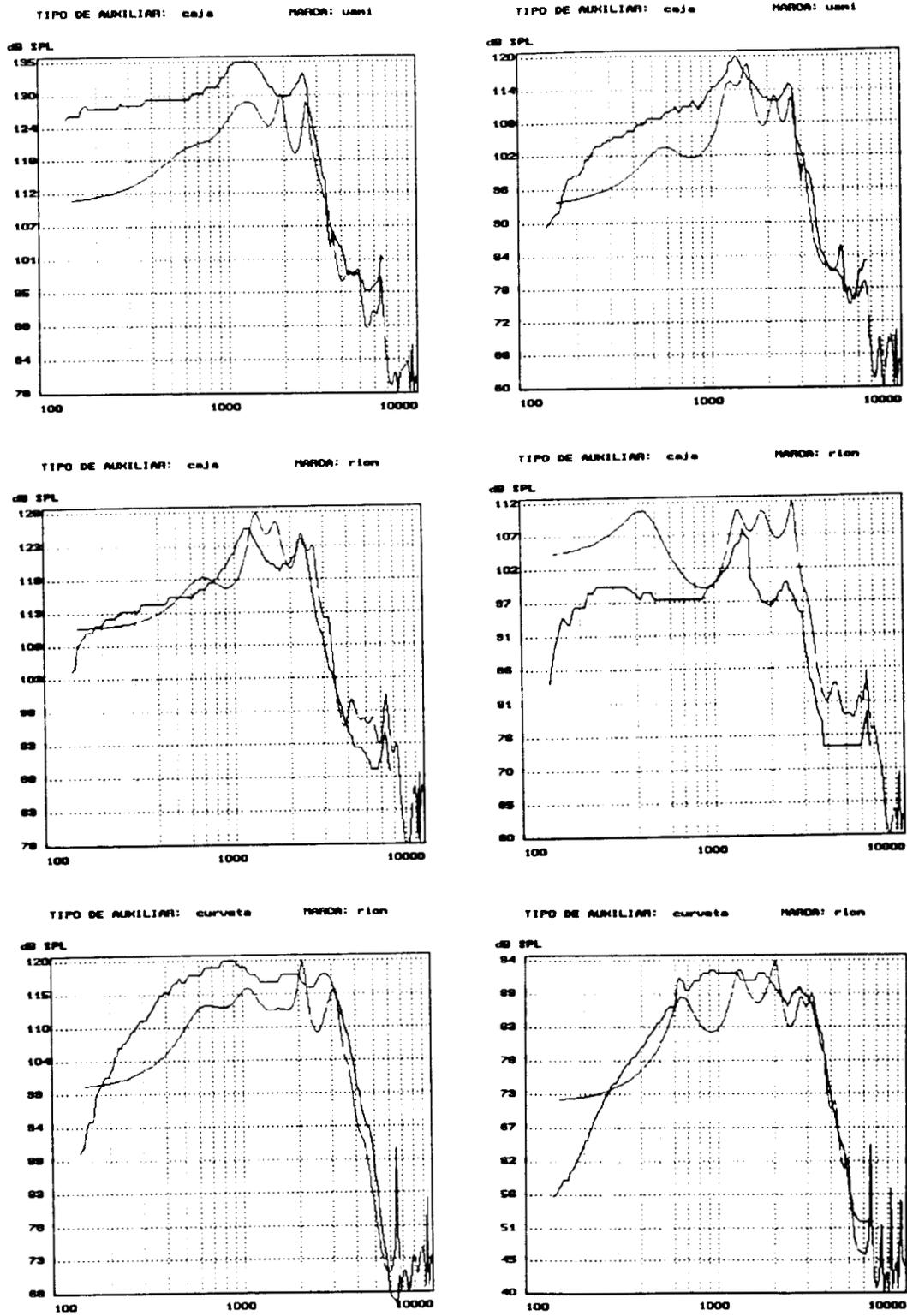


Figura No.12. Curvas SSPL90, columna izquierda y curvas de respuesta en frecuencia, columna derecha; obtenidas al evaluar con tonos puros y ruido blanco tres a.a.s diferentes.

Tabla I. Tabla comparativa de algunos de los parámetros electroacústicos obtenidos con los métodos de tonos puros y ruido blanco.

RION HB-75 curveta	RION HA-57 caja	UAMI caja
--------------------------	-----------------------	--------------

Max. SSPL90/OSPL90 tonos puros	SSPL85/OSPL85 ruido blanco		
(dB _{SPL} , Hz)			
Tonos Puros	120, 844	125, 1193	135, 1127
Ruido Blanco	120, 2050	128, 1130	130, 1920
HFA SSPL90/Ref. Test OSPL90			
(dB _{SPL})			
Tonos Puros	117	121	132
Ruido Blanco	113	122	125
Max. Output Freq. Response			
(dB _{SPL} , Hz)			
Tonos Puros	93, 1000	108, 1500	120, 1418
Ruido Blanco	95, 2000	113, 2350	119, 1300
HFA/Ref. Test Resp. Frec.			
(dB _{SPL})			
Tonos Puros	91	106	117
Ruido Blanco	85	106	111
Frequency Range			
(Hz)			
Tonos Puros	315 a 3779	150 a 3000	238 a 2832
Ruido Blanco	350 a 3900	100 a 3200	200 a 3100

De acuerdo a IEC 118-7, 118-2 1983 y ANSI S3.22 1982.

- Se utiliza la denominación en inglés para ser concordantes con la norma.
- La notación en cursiva se refiere a el parámetro correspondiente a la norma IEC 118.
- En el caso de ruido blanco la máxima intensidad de prueba fué de 85 dB_{SPL}

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

Atendiendo a los valores consignados por la tabla I, se puede ver que no existe una correspondencia uno a uno entre los resultados obtenidos por tonos puros y ruido blanco, sin embargo si se evidencia una similitud muy importante. Es de esperarse estas variaciones debido a factores tales como: 1) La intensidad máxima de excitación no es la misma, para tonos puros es de 90 dB_{SPL} y para ruido blanco de 85 dB_{SPL}; esto debido a limitaciones propias del *Sistema Madsen*. 2) Por consiguiente debido a lo anterior, parámetros como **Max. SSPL90/OSPL90 tonos puros** **SSPL85/OSPL85 ruido blanco** y **HFA SSPL90/Ref. Test OSPL90** no corresponden exactamente. 3) Lo mismo puede decirse del resto de los parámetros puesto que la totalidad de ellos se calculan a partir de la curva de respuesta en frecuencia, que es diferente para los dos métodos.

De las gráficas presentadas en la figura No. 12 se observan diferencias significativas entre las curvas logradas con ruido blanco (a) y las obtenidas con tonos puros (b), tanto para la curva de respuesta en frecuencia como para la de SSPL90 y SSPL85. Estas discrepancias se reflejan sobre todo a bajas frecuencias no siendo así para frecuencias mayores a 2500 Hz, resultado que ya se ha obtenido en trabajos como los de Preves (21) . Si bien no son curvas exactamente iguales, si presentan cierta similitud. El por qué de las diferencias entre los dos métodos empleados para la obtención de la curva de respuesta

en frecuencia, para una operación en modo de amplificación lineal, es algo que aún aguarda una respuesta satisfactoria, aunque debe considerarse que la mayor resolución del método de ruido blanco reduce a la curva obtenida con el método de tonos puros a una curva suavizada y parcial de la verdadera curva de respuesta de la a.a.; por otra parte la manera en que se ubicó la región de amplificación lineal en las a.a.s empleadas en este trabajo bien pudiera no ser del todo adecuada, considerando que se ubicó una región de linealidad con una señal de tono puro de 1 200 Hz para después excitar la a.a. con una señal de ruido blanco.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el método de ruido blanco ofrece una curva de respuesta en frecuencia con mayor resolución, evidenciando comportamientos no vistos en la prueba de tonos puros.

Muy probablemente debido a lo anterior el conjunto de parámetros electroacústicos obtenidos con uno y otro método resultan diferentes, no hay que perder de vista que este conjunto de parámetros se calculan en su mayoría en base a la curva de respuesta en frecuencia. No obstante lo anterior, estos resultados permiten plantear la posibilidad de que el método de evaluación con ruido blanco ofrece ventajas sobre el método de tonos puros, para el caso de una a.a. operando en un rango lineal de amplificación, en cuanto a la obtención fiel de sus parámetros electroacústicos representativos, así como una reducción en la complejidad de los equipos empleados para este fin.

Sin duda el tema dista de estar agotado puesto que hoy día existe un sinnúmero de a.a.s con características de amplificación muy particulares, para las cuales el modo de amplificación lineal es el trivial. No hay que olvidar que a

lo largo de este informe no se ha aludido a otro aspecto fundamental en el diseño de a.a. y que es la "calidad" del sonido amplificado por ésta, visto esto a través de los índices de distorsión armónica presentes en la señal acústica proporcionada al paciente. Sin embargo este método alterno significa un paso hacia adelante en el problema de la caracterización adecuada de una a.a. con miras a la consecución de una prótesis que cumpla cabalmente las necesidades de amplificación del paciente deficiente auditivo.

BIBLIOGRAFIA

- 1) American National Standards.
"American National Standards for Specification of Hearing Aid Characteristics"
ASA S3.22-1982. New York, 1982.
- 2) Advantech Co.
"Enhanced Multi-Lab Card PCL-812.
(12 bits) A/D + D/A + DIO + Counter User's Manual".
- 3) Bruel & Kjaer.
"Frequency Response Methods"
Technical Review, 1975.
- 4) Cornejo, J.M., Granados,P., et. al.
"Paquete Tecnológico para la Fabricación de Ayudas Auditivas".
Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica.
Vol. XI No. 1 Querétaro, Gro. 1990.
- 5) Dillon, Harvey, Walker, Gary.
"Comparison of Stimuli used in Sound Field audiometric Testing".
Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 71 No. 1
January 1982. pp.12
- 6) Cornejo, J.M.
"Diseño y Evaluación de una Ayuda Auditiva tipo Caja Normalizada".
Tesis de Maestria. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
Diciembre, 1990.
- 7) Doebelin Ernest
"Measurement Systems Application and Design".
Mc. Graw Hill International Editions, 1990. Singapore.
- 8) Enders A. Robinson.
"A Historical Perspective of Spectrum Estimation"
Proceedings of The IEEE, vol. 70 No. 9 Sept. 1982.
- 9) Frye, G.
"Crest Factor and Composite Signals for Hearing Aid Testing".
Hearing Journal, vol.40, pp. 15-18, 1987.

- 10) Granados, P., Aljama, T., Cadena, M., Cornejo, J.
"Evaluación de Ayudas Auditivas Mediante la Técnica de Ruido Blanco"
Rev. Mex. Ing. Biomed. vol.13(1), pp. 239-247. 1992.
- 11) Granados, P., Aljama, T., Cadena, M., Cornejo, J.
"Evaluación de Ayudas Auditivas en un Rango Lineal con Ruido Blanco",
XVI Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica.
Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica. Vol. 14(2) Nov. 1993.
- 12) Granados, P., Aljama, T., Cadena, M., Cornejo, J.
"Improved White Noise Method in the Evaluation of Linear Hearing-Aids Characteristics"
Medical Advances Through Technology.
En prensa, 1993.
- 13) Hardy, William T.
"Signal Analysis Calculator".
Artech House, 685 Canton Street, Norwood, Ma. 02062.
U.S.A. 1990.
- 14) Hawkins, D.
"Loudness Discomfort Levels: A Clinical Procedure for Hearing Aid Evaluations".
Journal of Speech and Hearing Disorders, Vol XLV, Febrero 1980.
- 15) Hodgson, Williams R., Skinner, Paul H. Edds.
"Hearing Aid Assessment and Use in Audiologic Habilitation"
Second Edition. Ed. Williams & Wilkins, 1979.
- 16) International Electrotechnical Commission.
Publication 118-7, 1983. Hearing Aids.
"Measurement of the Performance Characteristics of Hearing Aids for quality inspection for delivery purposes"
Geneve, Suisse.
- 17) Kinghorn, W.
"Linear and Nonlinear Systems".
Hearing Instruments, julio 1976.
- 18) Lim, Jae S. Oppenheim, Alan V.
"Advanced Topics in Signal Processing".
Prentice Hall, New Jersey U.S.A., 1988.

- 19) Madsen, Poul B.
"Insertion Gain Optimization"
Hearing Instruments, vol.37, no.1, 1986.
- 20) Oppenheim, Alan V.; Schafer, Ronald.
"Digital Signal Processing".
Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
- 21) Preves, David A., Beck, Lucille B., et al.
"Input Stimuli for Obtaining Frequency Responses of Automatic
Gain Control Hearing Aids"
Journal of Speech and Hearing Research, vol. 32, March 1989.
- 22) Stelmachowicz, P., Lewis, D., Seewald, R., Hawkins, D.
"Complex and Pure Tone Signals in The Evaluation of Hearing Aid
Characteristics".
Journal of Speech and Hearing Research, vol(33), June 1990.
- 23) Studebaker, G.
"Utilization of Real Time Spectral Analyzers for the
Electroacoustical Evaluation of Hearing Aids".
Auditory and Hearing Prosthetics Research. pp. 347-376
New York: Grune and Stratton (1979).

APENDICE A

FUNDAMENTOS TEORICOS DE PROCESOS ALEATORIOS.

A.1 PROCESO ALEATORIO

Para muchos de los procesos físicos presentes en la Naturaleza, una señal aleatoria representa un modelo matemático más realista que su contraparte determinística. Estas señales aleatorias no se pueden representar mediante una señal específica, una tabla de datos o regla de cualquier tipo, si la señal no ha ocurrido; admitiendo sólo una descripción estadística.

Invariablemente las señales presentes en la naturaleza poseen un cierto grado de aleatoriedad, aunque para propósitos de análisis se trabaje con funciones específicas. Los procesos generadores de estas señales (p.ej. la voz) son complejos y dificultan la descripción de las mismas, que en términos generales son no periódicas y de energía no finita. La variable aleatoria, cuya caracterización se realiza en términos de probabilidades y promedios, es una función cuyo dominio es un espacio muestra (conjunto de salidas diferentes para un experimento dado) y su rango es un intervalo de la recta de los números reales.

La parte conceptual que permite hablar de una representación matemática para señales de energía infinita reside en lo que se denomina proceso aleatorio estacionario (18).

La representación matemática de estas señales se realiza en términos de promedios, sumando sus propiedades en términos de una secuencia de energía finita denominada autocovarianza o autocorrelación. Esto significa que el hecho de que un sistema lineal procese señales de energía infinita, puede describirse en términos del efecto reflejado en la función de autocovarianza.

A.2 LA VARIABLE ALEATORIA:

El grupo de variables aleatorias X_t para $-\infty < t < \infty$, constituye la definición de un proceso aleatorio, donde cada función es una realización del proceso. Formalmente, un proceso aleatorio es una familia indexada de variables aleatorias; esta familia se caracteriza por un conjunto de funciones de distribución de probabilidad que pueden ser función del tiempo (19).

$$F_{X_t}(x_t, t) = P\{ X \leq x \}$$

donde X_t denota la variable aleatoria y x_t es un valor particular de X_t .

Es equivalente especificarlo en términos de la función de densidad de probabilidad

$$f_{X_t}(x_t, t) = \frac{\partial F_{X_t}(x_t, t)}{\partial x_t}$$

Estas probabilidades dan idea de la distribución de amplitudes de la variable aleatoria o de la probabilidad de ocurrencia de valores grandes o pequeños.

La interdependencia de dos variables aleatorias X_{t1} y X_{t2} de un proceso aleatorio se describe mediante la función de probabilidad de distribución conjunta

$$F_{X_{t1}, X_{t2}}(x_{t1}, t_1, x_{t2}, t_2) = P\{x_{t1} \leq X_{t1} \text{ y } x_{t2} \leq X_{t2}\}$$

Una caracterización completa del proceso aleatorio requiere la especificación de todas las posibles probabilidades de distribución conjuntas. En el caso donde todas las funciones de probabilidad son independientes del tiempo, se dice que el proceso aleatorio es estacionario.

En muchas aplicaciones del procesamiento digital de señales, los procesos aleatorios sirven como modelos para señales en el sentido que una señal particular de energía infinita se puede considerar como una función muestra del proceso aleatorio. Aunque los detalles de tales señales no son predecibles, ciertas

propiedades promedio del ensamble se pueden predecir dada la ley de probabilidad del proceso.

A.3 PROMEDIOS Y PROCESOS ERGODICOS:

Es de utilidad caracterizar una variable aleatoria en términos de sus promedios como la media y la varianza. La media del proceso se define como

$$m_{x_t} = E[X_t] = \int_{-\alpha}^{\alpha} x f_{X_t}(x, t) dx$$

donde **E** denota la **esperanza matemática**.

En general, si **g** es una función con X_t una variable aleatoria, donde el conjunto de variables aleatorias **g(x_t)** definen un proceso aleatorio, **el valor esperado** de **g(X_t)** se define como

$$E[g(x_t)] = \int_{-\alpha}^{\alpha} g(x) f_{X_t}(x, t) dx$$

Ahora, si se está interesado en la relación entre dos o más señales de energía infinita

$$E[g(x, y)] = \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_{-\alpha}^{\alpha} g(x, y) f_{X_{t_1}, X_{t_2}}(x, t_1, y, t_2) dx dy$$

donde f_{X_1, X_2} es la función de densidad de **probabilidad conjunta** de las variables X e Y. Si X e Y son linealmente independientes se cumple que

$$E[X_{t_1}, X_{t_2}] = E[X_{t_1}] \cdot E[X_{t_2}]$$

donde si además ocurre para todo t_1 y t_2 se dice que los procesos aleatorios X_{t_1} y X_{t_2} son **estadísticamente independientes**. **Los procesos aleatorios estadísticamente independientes son también linealmente independientes.**

Para el caso de procesos estacionarios el valor medio es el mismo para todas las variables aleatorias, esto es, el valor medio de un proceso estacionario es una constante m_X .

Debido a que la media de una variable aleatoria no es suficiente para describir su comportamiento, es necesario definir otros promedios estadísticos también denominados momentos.

- Valor cuadrático medio o potencia promedio.

$$m_2 = E[X^2] = \int_{-\alpha}^{\alpha} x^2 f_X(x, t) dx$$

- Desviación estándar o varianza de X es una medida de la dispersión alrededor del promedio de $f_X(x)$.

$$\sigma^2 = E[(X - m_X)^2]$$

donde para el caso de un proceso estacionario esta varianza es constante.

- Función de autocorrelación. Esta es una medida de la dependencia entre los valores del proceso aleatorio a diferentes tiempos. En este sentido, describe la variación en el tiempo de una señal aleatoria, definida como:

$$R_{XX}(t_1, t_2) = E[X(t_1)X(t_2)]$$

- Función de autocovarianza.

$$\text{Cov}[X(t_1), X(t_2)] = R_{XX}(t_1, t_2) - E[X(t_1)]E[X(t_2)]$$

- Correlación cruzada, es una medida de la dependencia entre dos señales aleatorias diferentes.

$$R_{XY}(t, t + \tau) = E[X(t)Y(t + \tau)]$$

- Covarianza, definida como:

$$C_{XY}(t, t + \tau) = E[(X(t) - m_{Xt})(Y_{t+\tau} - m_{Y(t+\tau)})]$$

Las propiedades estadísticas de un proceso aleatorio varían generalmente con el tiempo, sin embargo, un proceso estacionario se caracteriza por una condición de equilibrio en el que las propiedades estadísticas son invariantes al corrimiento en el tiempo. Similarmente, todas las funciones de probabilidad conjuntas también son invariantes a un corrimiento en el tiempo.

Para un proceso estacionario se puede escribir :

$$m_X = E[X] = \bar{x}$$

$$\sigma_X^2 = E[(X - m_X)^2]$$

$$R_{XX}(t, t + \tau) = R_{XX}(\tau)$$

como funciones independientes del tiempo.

Es posible encontrar que algunos procesos aleatorios no son estacionarios en el sentido estricto, esto es que sus distribuciones de probabilidad no son invariantes en el tiempo, su valor medio es constante y la función de autocorrelación no varía con el tiempo; a estos se les denomina procesos estacionarios en el amplio sentido.

En un contexto de procesamiento digital de señales, la noción de un ensamble de señales de energía infinita es un concepto matemáticamente conveniente que permite emplear la teoría de probabilidad para representar señales de energía infinita. Sin embargo, en un sentido práctico es preferible trabajar con una sola función en lugar de un número infinito de ellas. Ya que sería más conveniente tomar un solo miembro de un proceso aleatorio e inferir la ley de

probabilidad o los promedios correspondientes para la totalidad del ensamble.

En ciertos procesos denominados ergódicos, la estadística completa se puede obtener a partir de cualquier realización, es decir, cada función muestra tiene una información estadísticamente idéntica y por lo tanto cada función describe (estadísticamente) al proceso aleatorio.

Debido a que sobre una realización es posible determinar sólo promedios en el tiempo, para un proceso ergódico los promedios en el tiempo deben ser iguales a los promedios del ensamble. La distribución de amplitud del ensamble en cualquier instante t es idéntica a la distribución de amplitud de una sola función muestra, es decir

$$E[\cdot] = A[\cdot] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [\cdot] dt$$

donde **A** se utiliza para denotar **promedios en el tiempo**.

Otra forma de establecer ergodicidad de un proceso es si el promedio en el tiempo se define como:

$$A[\cdot] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [\cdot] dt$$

y se define \bar{x} :

$$\bar{x} = A[x(t)]$$

como el valor promedio de la función muestra, y su función de autocorrelación como:

$$R_{xx}(\tau) = A[x(t)x(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau) dt$$

tomando el valor esperado de las dos ecuaciones anteriores

$$E[\bar{X}] = E\left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt\right] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T E[x(t)] dt$$

Si el proceso es estacionario, entonces

$$E\left[\dot{X}\right] = \bar{X} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T dt = \bar{X}$$

procediendo en forma similar

$$E[R_{xx}(\tau)] = R_{xx}(\tau)$$

Un proceso es ergódico si:

$$E[x(t)] = E\left[\dot{x}\right]$$

$$\bar{x} = \bar{X}$$

$$R_{xx}(\tau) = R_{xx}(\tau)$$

Si la varianza y el valor promedio del ensamble no cambian en el tiempo se puede considerar que el proceso es estacionario.

A.4 CARACTERISTICAS ESPECTRALES DE PROCESOS ALEATORIOS:

La aplicación de la Transformada de Fourier a señales determinísticas permite obtener información de la distribución de la energía con respecto de la frecuencia. Aplicando el mismo método para señales aleatorias tenemos:

$$F_X(\omega) = \int_{-\alpha}^{\alpha} x(t)e^{-j\omega t}$$

con las siguientes consideraciones

a) La Transformada de Fourier de un proceso aleatorio se debe realizar para todo el ensamble. Puesto que aplicarla por individual a cada miembro de éste arroja valores diferentes, es preferible utilizar la función valor esperado del ensamble.

b) Un problema que se tiene al utilizar directamente sobre el ensamble la Transformada de Fourier en procesos estocásticos, es que ésta no existe. Dado que para que exista es condición que la señal o función del tiempo sea absolutamente sumable, es decir;

$$\int_{-\alpha}^{\alpha} |x(t)| dt < \alpha$$

condición que no la cumplen los procesos estocásticos estacionarios.

Para utilizar la Transformación de Fourier es necesario modificar las funciones muestra del proceso de tal forma que la transformación exista. La forma más sencilla es definir una función muestra que tenga una duración finita.

Si existe un tiempo T finito entonces la Transformada de Fourier de la señal $x_T(t)$ existe.

Si T es finito, $X_T(t)$ tiene energía finita.

$$x_T(t) \leftrightarrow X_T(\omega)$$

donde la energía del proceso $x_T(t)$ está dada por:

$$\text{Energía de } x_T(t) = \int_{-T}^T X_T^2(t) dt$$

Utilizando el Teorema de Parseval

$$\int_{-T}^T X_T^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} |X_T(\omega)|^2 d\omega$$

$$\frac{1}{2T} \int_{-T}^T X_T^2(t) dt = \frac{1}{4\pi T} \int_{-\alpha}^{\alpha} |X_T(\omega)|^2 d\omega$$

es posible obtener el valor esperado de

$$\frac{1}{T} |X_T(\omega)|^2$$

$$E\left\{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt\right\} = E\left\{\frac{1}{4\pi T} \int_{-\alpha}^{\alpha} |X_T(\omega)|^2 d\omega\right\}$$

$$\lim_{T \rightarrow \alpha} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2 dt = \lim_{T \rightarrow \alpha} \frac{1}{4\pi T} \int_{-\alpha}^{\alpha} E\{|X_T(\omega)|^2\} d\omega$$

$$\lim_{T \rightarrow \alpha} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} \lim_{T \rightarrow \alpha} \frac{E\{|X_T(\omega)|^2\}}{2T} d\omega$$

Si el proceso es estacionario, el promedio en el tiempo queda

$$A[\bar{x}^2(t)] = A[\bar{x}^2] = \lim_{T \rightarrow \alpha} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} \lim_{T \rightarrow \alpha} \frac{E\{|X_T(\omega)|^2\}}{2T} d\omega$$

En general se define la potencia promedio del proceso aleatorio $x(t)$ como:

$$P_{xx} = \lim_{T \rightarrow \alpha} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T E[x^2(t)] dt = A[E[x^2(t)]]$$

y la potencia promedio de un proceso aleatorio en el dominio de la frecuencia, es:

$$P_{xx} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} \lim_{T \rightarrow \alpha} \frac{E\{|X_T(\omega)|^2\}}{2T} d\omega$$

Se define como espectro de potencia o espectro de densidad de potencia α :

$$S_{xx}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \alpha} \frac{E\{|X_T(\omega)|^2\}}{2T}$$

de tal forma

$$P_{xx} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} S_{xx}(\omega) d\omega$$

Cuando el proceso es ergódico en la frecuencia:

$$S_{xx}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X_T(\omega)|^2}{2T}$$

Para un proceso estocástico se tiene que:

$$S_{xx}(\omega) \xleftrightarrow{f} A[R_{xx}(t, t + \tau)]$$

Para el caso en que $x(t)$ sea un proceso, al menos, *débilmente* estacionario:

$$A[R_{xx}(t, t + \tau)] = R_{xx}(\tau)$$

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\alpha}^{\alpha} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} S_{xx}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$

Estas relaciones forman el enlace entre la descripción en el dominio del tiempo (funciones de autocorrelación) y la descripción en el dominio de la frecuencia (espectro de potencia). La formulación de estas relaciones en el tiempo discreto se conocen como el Teorema de Wold.

Cuando se consideran dos procesos aleatorios es posible definir el Espectro de Potencia Cruzado.

Si $X_T(\omega)$ es la Transformada de Fourier de una función muestra truncada y $Y_T(\omega)$ es una transformación similar a partir de otro proceso, la potencia cruzado $P_{XY}(T)$ dentro del intervalo $(-T, T)$ está dado por:

$$P_{XY}(T) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_T(t)y_T(t)dt = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t)dt$$

definiendo el espectro de Potencia cruzado como:

$$S_{XY}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E[X_T^* Y_T(\omega)]}{2T}$$

$$P_{XY} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} S_{XY}(\omega) d\omega$$

de forma similar:

$$S_{YX}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E[Y_T^*(\omega) X_T(\omega)]}{2T}$$

$$P_{YX}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} S_{YX}(\omega) d\omega$$

En general, para un proceso aleatorio, la función de autocorrelación cruzada no puede recuperarse a partir del espectro de potencia cruzado. Esto sólo es posible en el caso de procesos conjuntos débilmente estacionarios, donde se puede obtener $R_{XY}(\tau)$ a partir de $S_{XY}(\omega)$.

A.5 RUIDO BLANCO, PROPIEDADES:

El término de ruido blanco se utiliza para denominar a un proceso aleatorio débilmente estacionario que tiene densidad espectral constante para todos los valores de ω . El proceso de ruido blanco tiene una función de autocorrelación igual a:

$$R_{xx}(\tau) = \delta_0 \delta(\tau)$$

donde no existe correlación entre las muestras que forman el proceso. Su espectro de potencia es:

$$S_{xx}(\omega) = \delta_0$$

y su valor cuadrático medio $R(0)$ está dado por:

$$R(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} S_{xx}(\omega) d\omega$$

Como $S_{xx}(\omega)$ es una constante para toda ω , el valor cuadrático medio es infinito. Por lo tanto el proceso Ruido Blanco no es un proceso realizable. Sin embargo el concepto de ruido blanco es muy importante en el análisis de sistemas lineales con señales aleatorias. La utilización del concepto de ruido blanco simplifica bastante los desarrollos matemáticos que surgen en la generación de las diferentes técnicas de procesamiento de señales aleatorias.

A.6 RESPUESTA DE SISTEMAS LINEALES A SEÑALES ALEATORIAS:

Conceptos como respuesta en frecuencia y sistemas lineales invariantes en el tiempo son de particular importancia en el análisis de sistemas.

Considérese un sistema lineal invariante en el tiempo que tenga una respuesta al impulso $h(t)$. Si $x(t)$ es una señal de entrada de un proceso aleatorio estacionario en el amplio sentido. Entonces la salida del sistema lineal es una función muestra de un proceso aleatorio de salida, que se relaciona con el proceso de entrada mediante la siguiente transformación lineal:

$$y(t) = \int_{-\alpha}^{\alpha} x(t - \tau) d\tau \quad \text{ó}$$

$$y(t) = \int_{-\alpha}^{\alpha} x(\tau) h(t - \tau) d\tau$$

Si la señal de entrada está caracterizada, ya sea por su valor promedio, su función de autocorrelación, etc., es deseable poder caracterizar en forma similar la respuesta $y(t)$.

El promedio del proceso de salida es, considerando el caso discreto:

$$m_y = E[y(n)] = \sum_{k=-\alpha}^{\alpha} h(k)E[x(n-k)]$$

$$m_y = m_x \sum_{k=-\alpha}^{\alpha} h(k)$$

considerando que el valor esperado de una suma es la suma de los valores esperados.

Recordando también que:

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\alpha}^{\alpha} h(k)e^{-j\omega k}$$

$$H(e^{j0}) = \sum_{k=-\alpha}^{\alpha} h(k)$$

$$m_y = m_x H(e^{j0})$$

donde la componente de dc de la salida es igual a la componente de dc de la entrada multiplicada por la ganancia de dc del sistema.

El valor cuadrático medio de la salida es:

$$\begin{aligned} E[y^2(n)] &= E\left[\sum_{k=0}^{\alpha} h(k)x(n-k) \sum_{l=0}^{\alpha} h(l)x(n-l) \right] \\ &= E\left[\sum_{k=0}^{\alpha} \sum_{l=0}^{\alpha} x(n-k)x(n-l)h(l)h(k) \right] \end{aligned}$$

$$= \sum_{k=0}^{\alpha} \sum_{l=0}^{\alpha} E[x(n-k)x(n-l)]h(l)h(k)$$

$$E[y^2(n)] = \sum_{k=0}^{\alpha} \sum_{l=0}^{\alpha} R_{xx}(l-k)h(l)h(k)$$

y para el caso continuo:

$$E[y(t)] = \int_0^{\alpha} \int_0^{\alpha} R_{xx}(\lambda_2 - \lambda_1)h(\lambda_1)h(\lambda_2)d\lambda_1 d\lambda_2$$

Asumiendo que el proceso es no estacionario, la función de autocorrelación del proceso de salida es:

$$\begin{aligned}
 R_{yy}(n, n+m) &= E[y(n)y(n+m)] \\
 &= E\left[y(n) \sum_{h=-\alpha}^{\alpha} h(k)x(n+m-k)\right] \\
 &= \sum_{k=-\alpha}^{\alpha} R_{yx}(m-k)h(k) \\
 &= R_{yx}(m)*h(k)
 \end{aligned}$$

pero como

$$\begin{aligned}
 R_{yx}(m) &= R_{xy}(-m) \\
 R_{yy}(n, n+m) &= R_{xy}(-m)*h(m) = R_{yy}(m) \\
 \text{y} \\
 R_{xy}(-m) &= h(-m)*R_{xx}(-m)
 \end{aligned}$$

se tiene por lo tanto

$$R_{yy}(m) = h(m)*h(-m)*R_{xx}(-m)$$

Por otro lado, recordando que:

$$\begin{aligned}
 \delta_{yy}(\omega) &= \mathcal{F}\{R_{yy}(m)\} \\
 \mathcal{F}\{R_{yy}(m)\} &= \mathcal{F}\{R_{xx}(-m)*h(m)*h(-m)\}
 \end{aligned}$$

Se tiene:

$$S_{yy}(\omega) = S_{xx}(\omega) |H(e^{j\omega})|^2$$

$$S_{yy}(\omega) = |H(e^{j\omega})|^2 S_{xx}(\omega)$$

este resultado tiene una aplicación útil cuando la señal de entrada es ruido blanco; esto es,

$$R_{xx}(m) = \sigma_x^2 \delta(m)$$

y el espectro en potencia de una entrada de ruido blanco es

$$S_{xx}(\omega) = \sigma_x^2 \quad -\pi \leq \omega \leq \pi$$

A.7 ESTIMADORES ESPECTRALES. EL METODO DE BURG:

La estimación de la densidad espectral de potencia de un proceso estocástico se obtiene generalmente mediante el uso del algoritmo de la FFT. Este método de análisis espectral tiene la ventaja de una gran eficiencia computacional, sin embargo, posee grandes desventajas. La principal de ellas está relacionada con la habilidad para reconocer respuestas espectrales de 2 ó más señales. Una segunda limitación es el ventaneo implícito de datos en donde los lóbulos de ventaneo pueden enmascarar y distorsionar la respuesta espectral de interés (18).

Con el fin de mejorar la estimación de la densidad espectral de potencia obtenida por el método clásico de FFT, se han desarrollado diferentes algoritmos, entre ellos se encuentra el algoritmo de Burg.

John Burg establece en su trabajo de "Análisis de Máxima Entropía Espectral" establece que: "El método usual digital para obtener una estimación del espectro en potencia de una función de autocovarianza asume que la función de correlación es cero para todas las banderas para las cuales ninguna estimación está disponible y utiliza algún tratamiento de las banderas estimadas para reducir el efecto de truncación de la función de autocovarianza. El método aquí discutido a pesar de que retiene todas las banderas estimadas sin modificación, utiliza una estimación no cero para las banderas no estimadas directamente. El principio particular de estimación usado es que el espectro estimado debe ser el más aleatorio o tener la máxima entropía de cualquier espectro de potencia que sea consistente con los datos medidos. Esta nueva técnica de análisis da una mayor resolución en la estimación espectral de la que se pudiera obtener con técnicas convencionales con un pequeño incremento en el tiempo de computación."

Burg, así como Yule Walker y el método de covarianza, son estimadores puramente autorregresivos, requieren la selección del grado del coeficiente autorregresivo. Se basan en modelos de series de tiempo. El principal problema en la estimación paramétrica del espectro en potencia es encontrar el modelo en series de tiempo. Una vez que se ha encontrado el modelo, es sencillo encontrar el espectro en potencia via la transformada discreta de Fourier. El modelo asumido por Burg deriva la muestra actual de una secuencia de la suma pesada de valores

de muestras previas y un término de ruido de promedio cero.

El método de Burg utiliza un método similar al de covarianza en el sentido que el error de filtrado se guarda en los datos. En forma adicional el método de Burg corre los datos a través del error de filtrado en ambas direcciones (hacia adelante y hacia atrás) que establece otra forma minimizando la suma de los errores en ambos sentidos.

Asumiendo un proceso estacionario en amplio sentido, los errores hacia adelante (e_{pn}) y hacia atrás (b_{pn}) se definen respectivamente como:

$$e_{pn} = x_n - \hat{x}_n = \sum_{k=0}^p a_{pk} x_{n-k}$$

$$b_{pn} = \sum_{k=0}^p a_{pk}^* x_{n-p+k}$$

donde:

\hat{x}_n es el valor pronosticado basado en "p" muestras previas

a_{pk} son los parámetros pronosticados

p es el orden del modelo

x_n son muestras de datos

Con el fin de estimar los parámetros pronosticados, Burg minimiza la suma de energías de los errores de predicción hacia adelante y hacia atrás, esto es:

$$E_p = \sum_{n=p}^{N-1} |e_{pn}|^2 + \sum_{n=p}^{N-1} |b_{pn}|^2$$

con la limitación que los parámetros del modelo satisfacen la recursión de Levinson:

$$a_{pk} = a_{p-1,k} + a_{pp} a_{p-1,p-k} \dots \dots \dots (a)$$

para órdenes de 1 a "p". Sin embargo esta limitación asegura la estabilidad del filtro de predicción. Es posible mostrar que E_p es sólo una función de la reflexión de los coeficientes a_{pp} y de los errores de predicción de orden "p-1". De esta forma, si utilizamos la ecuación (a), sólo se requiere la estimación de a_{ij} para $i = 1, 2, \dots, p$, donde a_{ij} se puede obtener de:

$$a_{ii} = \frac{-2 \sum_{k=i}^{N-1} b_{i-1,k-1}^* e_{i-1,k}}{\sum_{k=i}^{N-1} (|b_{i-1,k-1}|^2 + |e_{i-1,k}|^2)}$$

El proceso PSD se obtiene mediante:

$$S(f) = \frac{\sigma_v^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a_{pk} \exp(-j2\pi fk) \right|^2}$$

donde

σ_v^2 es el error de predicción de la varianza

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 118-7
Première édition — First edition
1983

Appareils de correction auditive

Septième partie: Mesure des caractéristiques fonctionnelles des appareils
de correction auditive pour un contrôle de qualité en vue d'une livraison

Hearing aids

Part 7: Measurement of the performance characteristics of hearing aids
for quality inspection for delivery purposes



© CEI 1983

Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque
forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la
photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by
any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm,
without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope	7
2. Object	7
3. General conditions	7
4. Explanation of terms	9
5. Nominal characteristics	11
6. Test space and test equipment	13
7. Test conditions	15
8. Recommended measurements	19

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HEARING AIDS

Part 7: Measurement of the performance characteristics of hearing aids
for quality inspection for delivery purposes

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 29: Electroacoustics.

A first draft was discussed at the meeting held in Sydney in 1980. As a result of this meeting, a draft, Document 29(Central Office)123, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in January 1981.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Japan
Austria	Korea (Republic of)
Belgium	Netherlands
Bulgaria	Norway
Czechoslovakia	Poland
Denmark	Romania
Egypt	South Africa (Republic of)
Germany	Spain
Hungary	Sweden
Israel	United Kingdom

HEARING AIDS

Part 7: Measurement of the performance characteristics of hearing aids for quality inspection for delivery purposes

1. Scope

This standard gives recommendations for the measurement of the performance characteristics of air-conduction hearing aids of a particular model for the purpose of comparing measured properties with those specified by the manufacturer.

This standard does not relate to mechanical or environmental tests. It should not be used as the basis for the exchange of information about hearing aid characteristics in general, nor is it intended to be used as a basis for fitting hearing aids to individuals.

Note — Terms such as “manufacturer” and “purchaser” are used in this standard. These terms may be understood, however, to refer to the supplier and recipient respectively in any arrangement for the supply of hearing aids in which the use of this standard is called for.

2. Object

- 2.1 The object of this standard is to describe practical reproducible methods for determining the compliance of a limited number of electroacoustical and electrical characteristics of delivered hearing aids with nominal performance data supplied by the manufacturer.
- 2.2 Though the number of measurements covered by this standard is limited, it is not intended that all measurements described herein shall be made in every case.
- 2.3 This standard does not specify any tolerances for hearing aid performance.

Such tolerances are subject to agreement between manufacturer and purchaser.

Note — In the case of a custom-made in-the-ear aid, the data supplied by the manufacturer applies only to the particular hearing aid being delivered.

3. General conditions

- 3.1 All sound pressure levels specified are referred to 20 μ Pa. Sound pressure level will be abbreviated to SPL.
- 3.2 *Acoustic test method*

The acoustic test procedure is based on a method of measurement in which the sound pressure level at the sound entry of the hearing aid is kept constant. This is normally accomplished by the use of a pressure-calibrated control microphone.

This method is designated “constant entrance sound pressure method” or shortened “pressure method” throughout this standard.

The sound output from the hearing aid is coupled to the IEC reference coupler according to IEC Publication 126: IEC Reference Coupler for the Measurement of Hearing Aids Using Earphones Coupled to the Ear by Means of Ear Inserts.

Notes 1. — The test results may differ substantially from those obtained under free-field conditions, especially for body-worn types of hearing aids having the sound entry located on a surface of the outer housing the physical dimensions of which are comparable to the wavelength of the incident sound.

2. — For measuring the variation of acoustical parameters of hearing aids as a function of the direction of sound incidence, progressive wave conditions are required. Small acoustic test boxes in which progressive wave conditions are not present cannot be used for this purpose.

3. — For testing hearing aids with directional microphones, manufacturer and purchaser should use acoustic test boxes of the same make and type to secure identical measurement conditions. The results from such measurements may not represent the true directional characteristics of the hearing aid.

3.3 Reference is made to the following IEC publications:

Publication 68: Basic Environmental Testing Procedures.

Publication 118-0: Hearing Aids, Part 0: Measurement of Electroacoustical Characteristics.

Publication 118-1: Part 1: Hearing Aids with Induction Pick-up Coil Input.

Publication 118-2: Part 2: Hearing Aids with Automatic Gain Control Circuits.

Publication 126: IEC Reference Coupler for the Measurement of Hearing Aids Using Earphones Coupled to the Ear by Means of Ear Inserts.

3.4 *Reporting of data*

All data reported shall be clearly labelled: "Quality inspection method according to IEC Publication 118-7".

4. Explanation of terms

4.1 *Pressure method*

A method of measurement in which the input sound pressure level is controlled close to the sound entry of the hearing aid by a pressure calibrated control microphone, thus substantially eliminating diffraction effects from the hearing aid (see IEC Publication 118-0, Sub-clause 4.4).

4.2 *Reference test frequency*

The frequency at which the setting of the gain control is made in relation to OSPL₉₀ (Output Sound Pressure Level for an input sound pressure level of 90 dB) to obtain a reference test position of the gain control. The reference test frequency shall normally be 1 600 Hz. For certain hearing aids for which a higher reference test frequency is more appropriate (so-called high-tone hearing aids) 2 500 Hz shall be used. If 2 500 Hz is used this shall be clearly stated in the test report (see IEC Publication 118-0, Sub-clause 4.18).

4.3 *Nominal reference test OSPL₉₀*

manufacturer.

4.4 *Nominal reference test gain*

The nominal reference test gain, to be assigned by the manufacturer, is the gain of the hearing aid at the reference test frequency when its gain control is set to amplify an input sound pressure level of 60 dB to a level in the acoustic coupler of 15 dB below nominal reference test OSPL₉₀ (see Figure 1, page 25). If the gain available will not permit this, the full-on gain is the nominal reference test gain.

Note. — From the definition above, it can be seen that the nominal reference test gain also equals the nominal reference test OSPL₉₀ minus 75 dB when measured with an input SPL of 60 dB.

4.5 *Nominal reference test gain control position or nominal reference test gain setting*

The position of the gain control at which the nominal reference test gain, assigned by the manufacturer for the model, is achieved.

4.6 *Further definitions*

Reference is made to the following IEC publications:

Publication 118-0: Hearing Aids, Part 0: Measurement of Electroacoustical Characteristics.

Publication 118-1: Part 1: Hearing Aids with Induction Pick-up Coil Input.

Publication 118-2: Part 2: Hearing Aids with Automatic Gain Control Circuits.

5. **Nominal characteristics**

The characteristics with the prefix “nominal” listed below are those that may be assigned by the manufacturer for the hearing aid model in question (see also Figure 1) and are subject to verification, using the methods described in this standard.

- Nominal battery or supply voltage;
- Nominal battery current;
- Nominal OSPL₉₀ frequency response curve;

- Nominal full-on gain at the reference test frequency;
- Nominal full-on acoustic gain frequency response curve;
- Nominal basic frequency response curve;
- Nominal total harmonic distortion;
- Nominal equivalent input noise level;
- Nominal maximum pick-up coil sensitivity.

6. Test space and test equipment

6.1 *Unwanted stimuli in the test space*

Unwanted stimuli in the test space, such as ambient noise, mechanical vibrations and electrical or magnetic stray fields shall be sufficiently low so as not to affect the test results by more than 0.5 dB. This may be achieved if the output level of the hearing aid falls by at least 10 dB, when the signal source is switched off.

6.2 *Sound source*

6.2.1 The sound source, in combination with a pressure-calibrated controlling microphone and servo system or other means, shall be capable of producing at the test point the requisite sound pressure levels between 50 dB and 90 dB within a tolerance of ± 1.5 dB over the frequency range 200 Hz to 2 000 Hz and within ± 2.5 dB over the range 2 000 Hz to 5 000 Hz.

6.2.2 The frequency of the sound source shall be within $\pm 2\%$ of the indicated value.

6.2.3 For frequency response and full-on gain measurements, the total harmonic distortion of the acoustic signal shall not exceed 2% up to an SPL of 70 dB and 3% up to an SPL of 90 dB.

For harmonic distortion measurements the total harmonic distortion of the acoustic signal up to 70 dB SPL shall not exceed 0.5%.

If the calibration of the sound source depends on ambient conditions, corrections for such dependence shall be made when necessary (see Sub-clause 7.3.4).

6.3 *Acoustic coupler*

The IEC reference coupler in accordance with IEC Publication 126 shall be used.

6.4 *Measurement system for the acoustic coupler sound pressure level*

The equipment for the measurement of the coupler sound pressure level produced by the hearing aid shall fulfil the following requirements:

- a) the calibration of the sound pressure level measurement system shall be accurate within ± 0.5 dB at a specified frequency;
- b) the pressure sensitivity level of the measuring microphone shall be frequency-independent within ± 1 dB in the frequency range 200 Hz to 2 000 Hz and within ± 1.5 dB in the frequency range of 2 000 Hz to 5 000 Hz relative to the pressure sensitivity level at 1 000 Hz;
- c) the total harmonic distortion shall be less than 1% for sound pressure levels up to 130 dB in the frequency range 200 Hz to 5 000 Hz, and less than 3% for sound pressure levels above 130 dB and up to 145 dB;
- d) the sound pressure level corresponding to hum, thermal agitation and other noise sources shall be at least 10 dB below the level of the lowest signal level reported as measured. For this purpose a high-pass filter not affecting frequencies of 200 Hz and above may be employed;

- e) the output indicator used shall give r.m.s. indication within a tolerance of ± 0.5 dB at a signal crest factor of not more than 3

Notes 1. — If under certain conditions it is necessary to use a selective measuring system in order to ensure that the response of the hearing aid to the signal can be differentiated from inherent noise in the hearing aid, the use of the selective system should be stated in the test report.

- 2 — It is well known that the type of output indicator employed may influence the test results significantly if a non-sinusoidal voltage is being measured. Such non-sinusoidal voltages may be present when making measurements with high input levels.

- f) if the calibration of the acoustic coupler depends on ambient conditions, especially the atmospheric pressure, corrections for such dependence shall be made when necessary (see Sub-clause 7.3.4).

6.5 *Equipment for automatic sweep frequency recording*

- 6.5.1 The equipment shall be capable of maintaining at the test point the requisite sound pressure levels as in Sub-clause 6.2.1.
- 6.5.2 The indicated frequency on a recorder chart shall be accurate within $\pm 5\%$.
- 6.5.3 The automatically recorded values shall not differ more than 1 dB from the steady-state value observed for any frequency over the range 200 Hz to 5 000 Hz.
- 6.5.4 The recorder or display device used for the automatic frequency recording shall have a steady-state accuracy within ± 0.6 dB over the frequency range 200 Hz to 5 000 Hz.

7. Test conditions

7.1 *General*

Procedures for controlling the sound field and establishing test conditions for the hearing aid are described below.

7.2 *Control of the sound field*

- 7.2.1 The input SPL at the hearing aid reference point is kept substantially constant:

- a) by means of a monitoring microphone (see Sub-clause 7.2.2);
b) with electronic data storage (see Sub-clause 7.2.3).

- 7.2.2 To achieve adequately constant SPL at the reference point over the required frequency range the distance between the centre of the diaphragm of the monitoring microphone (preferably half-inch, see Sub-clause 7.2.4) and the reference point of the hearing aid shall be between 5 mm and 10 mm. Hearing aids with directional microphones shall be oriented with direction for maximum sensitivity pointing towards the sound source.

Figures 2 and 3, pages 26 and 27, show examples of test arrangements.

7.2.3 An alternative method of keeping the sound pressure level constant is to let the pressure microphone be 5 mm to 10 mm from the reference point of the hearing aid; measure the SPL at discrete frequencies with the model of hearing aid to be tested in its test position. By suitable means, for instance digital equipment or a tape recorder, store and subsequently reproduce the required voltages for constant SPL at the reference point with either the monitoring microphone still in place or a dummy simulating that microphone in the same place in order to fulfil pressure method conditions.

Note. — Methods of test that do not keep the monitoring microphone or a dummy in place, may give different results between the methods given in Sub-clauses 7.2.2 and 7.2.3. Different results may also occur if the sound field is calibrated with a hearing aid other than the model under test in place.

7.2.4 For both methods mentioned above, the use of a half-inch microphone is recommended. The diameter of the microphone actually used should be stated.

7.2.5 *Sound field in the vicinity of the reference point of the hearing aid*

Care should be taken that neither the coupler nor the mechanical support for the hearing aid will appreciably disturb the sound field in the vicinity of the hearing aid at the test frequencies used, and they should not introduce spurious effects arising from mechanical resonances or mechanical vibrations, nor should they in any respect affect any mechanical or acoustical property of the hearing aid under test.

7.3 *Normal operating conditions for a hearing aid*

The normal operating conditions apply for measurements where no other conditions are prescribed.

The normal operating conditions are:

7.3.1 *Battery or supply voltage*

Either an actual battery of the type normally used in the hearing aid, partially discharged to avoid typical high initial voltage, or a suitable power supply that simulates the voltage and internal impedance of real batteries of the type normally used, may be employed.

The type of power source used, the supply voltage and, in case of a power supply, the internal impedance shall be stated.

The battery voltage measurements shall be accurate within ± 50 mV of the value specified.

7.3.2 *Gain control*

The settings of the gain control are either the full-on setting or nominal reference test gain setting. The setting used shall be stated.

7.3.3 *Normal settings of other controls*

Tone control settings shall be stated and should be chosen at well-defined positions and preferably to give the widest frequency range.

Settings for all other controls, including automatic gain controls, should be chosen to give the highest $OSPL_{90}$ and the highest full-on gain. If the highest $OSPL_{90}$ is not associated with the highest gain, the setting giving the highest $OSPL_{90}$ shall be used. (See IEC Publication 118-0, Sub-clause 6.4.3.)

7.3.4 Ambient conditions

Actual conditions in the test space at the time of test shall be stated and kept within the following tolerances:

temperature:	$(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$
relative humidity:	40% to 80%
atmospheric pressure:	$(101.3 \pm_{20}^5) \text{ kPa}$

If these conditions cannot be achieved actual conditions shall be stated. Reference is made to IEC Publication 68: Basic Environmental Testing Procedures.

7.3.5 Sound outlet system such as insert earphones, ear-hook type or sound tubing. Reference is made to IEC Publication 126.

The sound outlet system used shall be stated.

7.3.6 Accessories used in connection with the hearing aid microphone opening. The particular accessories used shall be stated.

8. Recommended measurements

8.1 Frequency response curves

All published curves showing variation of a parameter with frequency shall be plotted on a grid having a linear decibel ordinate scale and a logarithmic frequency abscissa scale with the length of one decade on the abscissa equal to the length of 50 dB on the ordinate.

8.2 Output sound pressure level frequency response curve for an input sound pressure level of 90 dB ($OSPL_{90}$ frequency response curve)

The purpose of this test is to determine the curve of the sound pressure level obtainable in the acoustic coupler measured as a function of frequency with an input sound pressure level of 90 dB and the gain control in the full-on position.

The test procedure is:

- turn the gain control full on and set other controls into the assigned positions;
- adjust the input sound pressure level to 90 dB at a suitable frequency;
- keeping the input sound pressure level constant at 90 dB, vary the frequency of the sound source over the frequency range from 200 Hz to 5 000 Hz and measure the sound pressure level in the acoustic coupler versus frequency.

8.3 Full-on acoustic gain response curve

Full-on gain shall be measured with the gain control of the hearing aid set to its full-on position and with a sinusoidal input sound pressure level of 50 dB or 60 dB, as selected. However, an input sound pressure level of 50 dB shall be used if the separation between the full-on gain curve with a 60 dB input SPL and the $OSPL_{90}$ curve is less than 5 dB at any frequency over the range 200 Hz to 5 000 Hz. For automatic gain control (AGC) aids, if the AGC mode cannot be put out of action, the input sound pressure level shall be 50 dB. The input sound pressure level used shall be stated in all cases.

The test procedure is:

- a) turn the gain control full on and set other controls into the assigned positions;
- b) adjust the input SPL to 50 dB or 60 dB at a suitable frequency;
- c) vary the frequency of the sound source over the frequency range 200 Hz to 5 000 Hz keeping the input SPL constant;
- d) the full-on acoustic gain is recorded as the difference between the coupler SPL and the input SPL versus frequency.

8.4 Basic frequency response curve at nominal reference test gain setting

The purpose of this test is to determine the frequency response curve at the nominal reference test gain setting.

The test procedure is:

- a) adjust the gain control to the nominal reference test gain value assigned by the manufacturer to within ± 1 dB and set other controls into the assigned positions;
- b) vary the frequency of the sound source over the frequency range 200 Hz to 5 000 Hz keeping the input SPL constant at 60 dB, and measure the sound pressure level in the coupler versus frequency.

8.5 Battery current

The purpose of this test is to determine the battery current. With the gain control in the reference test gain position measure the battery current at the reference test frequency and at an input SPL of 60 dB.

The direct-current measuring system shall have the following characteristics:

1. an accuracy of $\pm 5\%$ at the value of current measured;
2. a resistance not exceeding $50 \Omega/I$, where I is the current being measured, in milliamperes;
3. an impedance not exceeding 1Ω over the frequency range 200 Hz to 5 000 Hz.

Note. — One method of realizing Item 3 above is to bypass the current meter with an 8 000 μ F capacitor. The capacitor should not shunt the battery or the power supply.

8.6 *Total harmonic distortion*

The test procedure is:

- a) adjust the gain control to the nominal reference test gain value assigned by the manufacturer for the model and set other controls to their assigned positions;
- b) adjust the input sound pressure level to 70 dB;
- c) adjust the frequency to the one-third octave frequency between 400 Hz to 1 600 Hz inclusive, assigned by the manufacturer;
- d) measure the total harmonic distortion in the acoustic coupler or the second and third harmonics.

Note. — Care should be taken when measuring the total harmonic distortion, because errors can be caused by spurious signals, for example noise or hum.

8.7 *Internal noise generated in the hearing aid*

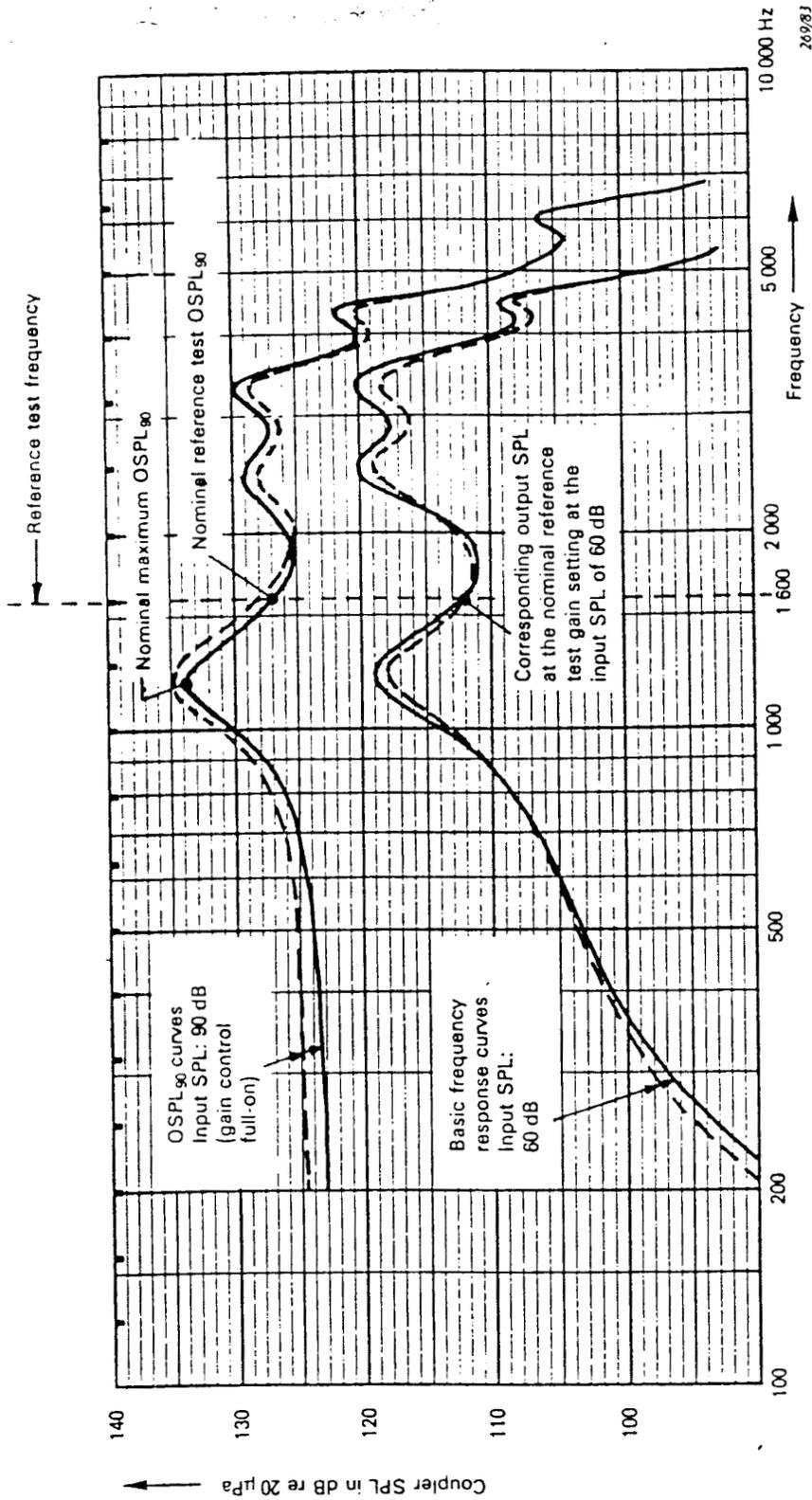
The test procedure is:

- a) adjust the gain control to the nominal reference test gain value assigned by the manufacturer for the model and set other controls to their assigned positions;
- b) switch off the input sound source (see Sub-clause 6.1);
- c) measure the total output noise SPL and calculate the equivalent input noise level by subtracting the nominal reference test gain.

8.8 *Maximum induction pick-up coil sensitivity within an audio-frequency magnetic field*

The test procedure is:

- a) turn the gain control full-on and set other controls to the assigned positions;
- b) adjust the frequency of the magnetic field to the reference test frequency;
- c) adjust the magnetic input to 10 mA/m;
- d) with the hearing aid oriented for maximum pick-up sensitivity, measure the output SPL in the acoustic coupler;
- e) the maximum induction pick-up coil sensitivity is expressed as the output SPL at a magnetic field strength of 1 mA/m.



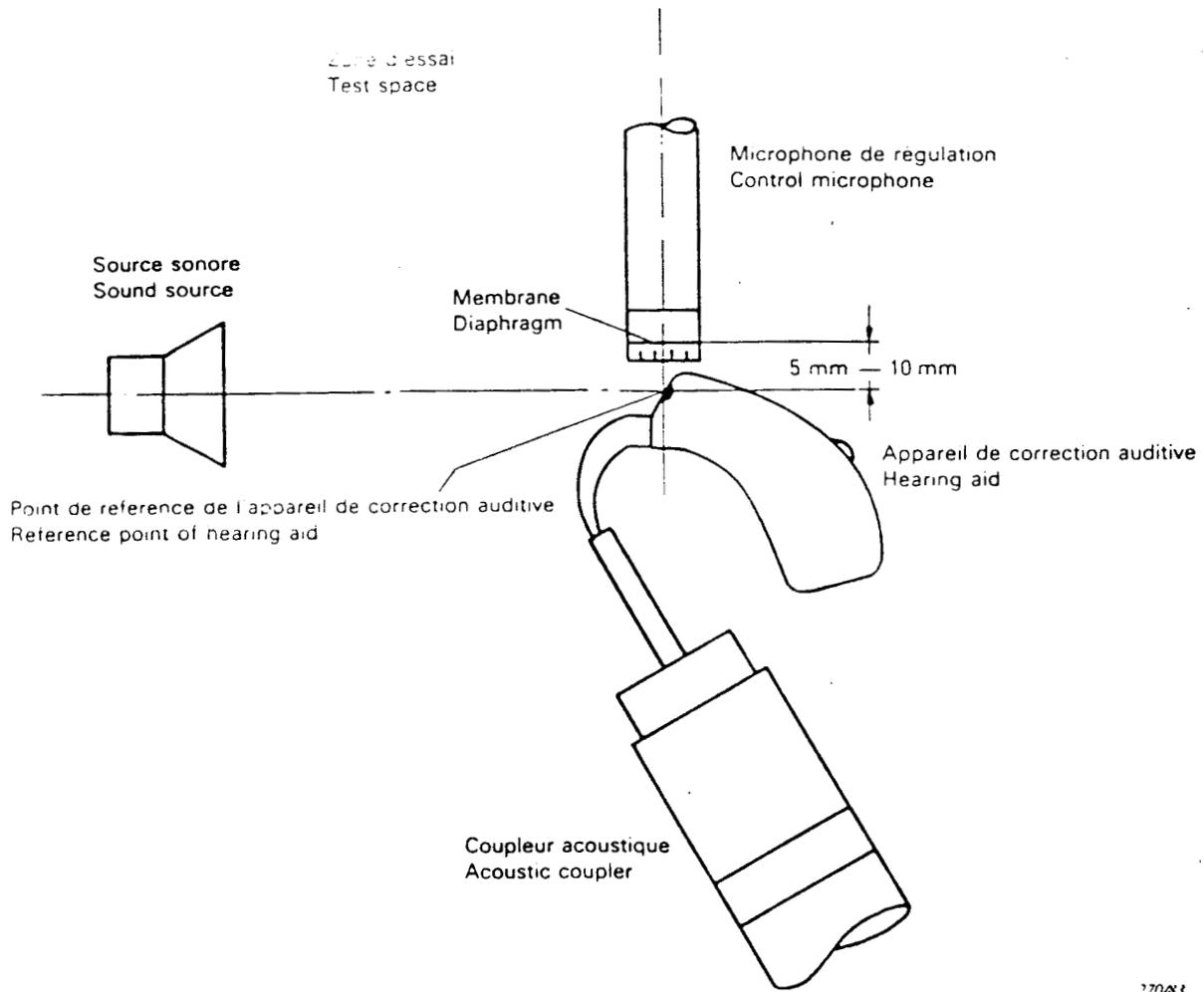
— nominal curves assigned by the manufacturer
 - - - curves for sample selected at random

Reference test gain control position is determined by $R = S - 15$ dB (R and S expressed in decibels), where:

R = nominal reference test gain (see Sub-clauses 4.4 and 4.5)

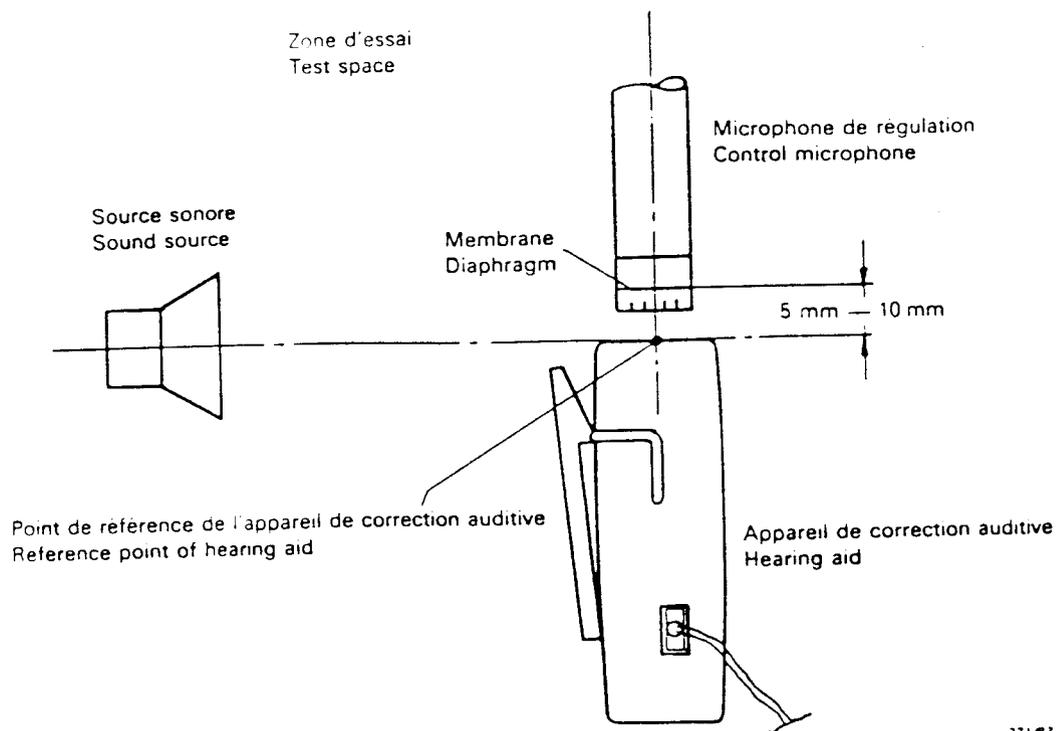
S = saturation level $OSPL_{90}$ at the reference test frequency (see Sub-clause 4.3).

FIG. 1. — Example of $OSPL_{90}$ and basic frequency response curves.



270/83

FIG. 2. — Exemple de disposition expérimentale pour un contour d'oreille.
Example of test arrangement for behind-the-ear hearing aid.



271/83

FIG. 3. — Exemple de disposition expérimentale pour un appareil de correction auditive du type boîtier.
Example of test arrangement for body-worn hearing aid.