

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE COMPENSACIÓN DE
MEDICIONES DE NIVEL DE PRESIÓN SONORA BASADO EN LAS CURVAS
ISOFÓNICAS.**

**YURI ANDREA MARTÍNEZ OVIEDO
AYLLIN ALEJANDRA SUÁREZ LEAL**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERIA DE SONIDO
BOGOTÁ
2005**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE COMPENSACIÓN DE
MEDICIONES DE NIVEL DE PRESIÓN SONORA BASADO EN LAS CURVAS
ISOFÓNICAS.**

**YURI ANDREA MARTÍNEZ OVIEDO
AYLLIN ALEJANDRA SUÁREZ LEAL**

Tesis de grado

Asesores:

Ingeniero Francisco Ruffa

Profesor Manuel Joves

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERIA DE SONIDO
BOGOTÁ
2005**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, noviembre 8 de 2005

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, familia y amigos que tengo.

A mi abuelito: Ramón Oviedo, que desde el cielo me acompaño y me guío para que todo saliera bien.

A mis padres por su apoyo y amor, por sus porras y ánimo para culminar este proyecto.

A mis hermanos Totis y Carolina, por los buenos ratos compartidos.

A la persona que más amo: Ronald Alexander Doncel, por su apoyo y compañía, por darme el valor para seguir adelante a pesar de todos los obstáculos presentados durante la realización del trabajo.

Yuri Andrea Martínez Oviedo

DEDICATORIA

A Dios, gestor de este proyecto y todos los proyectos de mi vida.

Con todo el cariño a mis padres Luz Marina Leal y German Suárez, quienes con generosidad me impulsaron y apoyaron para llevar a cabo este proyecto.

A mi hermano Germán Oswaldo, fuente constante de motivación.

Al amor de mi vida: mi novio José Álvaro y su familia, que han sido la compañía más grata y amable que he tenido durante la realización de proyecto.

Ayllin Alejandra Suárez Leal

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por Bendecirme para llegar hasta donde he llegado, por haber protegido mi familia de aquel fatal accidente.

A mis padres que me apoyaron anímica, moral, material y económicamente durante todos estos años.

A mis hermanos Totis y Carolina por ser y estar, por compartir el espacio y los momentos significativos.

A mi compañera y amiga de trabajo Ayllin Alejandra Suárez Leal que si su apoyo y esmero no hubiera sido posible la culminación del proyecto.

Al Padre Rector Fray Fernando Garzón Ramírez y al Ingeniero Pedro Valleta porque sin su ayuda no hubiésemos podido presentar el trabajo en Argentina.

A nuestros tutores: el Ing. Francisco Ruffa y al profesor Manuel Joves por su constante apoyo y colaboración.

Yuri Andrea Martínez Oviedo

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme culminar este trabajo y por darme valor para enfrentar los obstáculos que se nos presentaron durante su realización.

A mi compañera de trabajo y amiga Yuri Andrea Martínez por ser una persona responsable, pues gracias al esfuerzo conjunto pudimos terminar el proyecto.

Al señor Edgar Otto Martínez por su gran colaboración y asesoría en el área de programación.

Al Padre Rector Fray Fernando Garzón Ramírez y al Profesor Pedro Valleta porque sin su ayuda no hubiésemos podido presentar el trabajo en Buenos Aires.

A nuestros tutores: el Ing. Francisco Ruffa y al profesor Manuel Joves por brindarnos amable y diligentemente sus asesorías en todos los momentos que las necesitamos.

Ayllin Alejandra Suárez Leal

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1 ANTECEDENTES	5
1.2 DESCRIPCION Y FORMULACION DEL PROBLEMA	5
1.3 JUSTIFICACION	5
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	6
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	6
1.5.1 Alcances	6
1.5.2 Limitaciones	6
2. MARCO DE REFERENCIA	7
2.1 MARCO CONCEPTUAL	7
2.1.1 Sonido y Ruido	7
2.1.2 Sonoridad	13
2.1.3 Sistema auditivo humano	16
2.1.4 Fenómenos Psicoacústicos	21
2.2 MARCO NORMATIVA	26
2.2.1 Norma IRAM 4066 (ISO 226)	26
2.3 MARCO TEORICO	31
2.3.1 Funcionamiento del oído humano	31
2.3.2 La audición	32
2.3.3 Evaluación Subjetiva del Sonido y del Ruido	41

2.3.4	Curvas de ponderación. Respuesta relativa para los medidores de nivel sonoro	44
3.	METODOLOGIA	48
3.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	48
3.2	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA	48
3.3	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	48
3.4	HIPÓTESIS	48
3.5	VARIABLES	49
3.5.1	Variables Independientes	49
3.5.2	Variables Dependientes	50
4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.1	VENTANA DE BIENVENIDA AL SISTEMA	50
4.2	VENTANA DE INGRESO AL SISTEMA	51
4.3	VENTANA DE SELECCIÓN	51
4.4	VENTANA DE INGRESO DE DATOS Y COMPENSACIÓN	52
4.5	VENTANA DE TABLA COMPARATIVA	54
4.6	EJEMPLO DE CÁLCULO	55
4.7	DETERMINACION DE NIVELES DE MOLESTIA Y RIESGO DE PÉRDIDA AUDITIVA	
5.	DESARROLLO INGENIERIL	59
5.1	DIAGRAMA DE BLOQUE DEL DESARROLLO DEL ALGORITMO	60
5.2	EXPLICACIÓN DE CADA UNO DE LOS PASOS DE LA FASE 1	61
5.3	EXPLICACIÓN DE CADA UNO DE LOS PASOS DE LA FASE 2	62
6.	CONCLUSIONES	65
7.	RECOMENDACIONES	66
	BIBLIOGRAFIA	67
	ANEXOS	69

INTRODUCCIÓN

La percepción del sonido a través del oído humano es subjetiva y varía de un individuo a otro, por tal motivo se crearon las curvas de igual sonoridad, que son la base del estudio del presente proyecto. La captura de niveles y frecuencias del oído no es uniforme, por lo cual los sistemas de medición adoptaron curvas de compensación trazadas desde 1933: las ponderaciones A, B, C y D.

Las personas dedicadas a la acústica y los instrumentos de medición han adoptado la ponderación A para múltiples condiciones de nivel y frecuencia, sin tener en cuenta que la curva A se acomoda a la respuesta del oído humano en casos particulares, específicamente en la región de sonoridad de 60 fones.

Lo anterior plantea la necesidad de crear un sistema que realice las compensaciones correctas para todos los casos de nivel y frecuencia posibles en la audición humana. Por esto, se ha decidido diseñar un algoritmo de compensación, en el cual se ingresen los valores L_{eq} por octava y proporcione como resultado los valores compensados por octava, simulando la percepción de la audición humana.

El presente trabajo busca dejar un aporte en el mundo de la acústica y la psicoacústica, pues el diseño y la implementación de este nuevo sistema replantearía algunos conceptos de la acústica, normas y los medidores de nivel sonoro en el mundo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

La dependencia de la frecuencia en la sensación de sonoridad fue trabajada y medida por Fletcher y Munson, en 1933. Se pensaba que utilizando una red de filtrado (o ponderación de frecuencia) adecuada sería posible medir esa sensación en forma objetiva. Esta red de filtrado tendría que atenuar las bajas y las muy altas frecuencias, dejando las medias casi inalteradas. Había sin embargo dificultades para implementar tal sistema de medición. El oído se comporta de diferente manera con respecto a la dependencia de la frecuencia para diferentes niveles físicos del sonido. Por ejemplo, a muy bajos niveles, sólo los sonidos de frecuencias medias son audibles, mientras que a altos niveles, todas las frecuencias se escuchan más o menos con la misma intensidad sonora. Por lo tanto parecía razonable diseñar tres redes de ponderación de frecuencia correspondientes a niveles de alrededor de 40 dB, 60 dB y 100 dB, llamadas A, B y C respectivamente. Primero había que obtener un valor aproximado para decidir cual de las tres redes se debía utilizar, y luego realizar la medición con la ponderación adecuada. La segunda dificultad importante proviene del hecho de que las curvas de Fletcher y Munson (al igual que las finalmente normalizadas por la ISO, Organización Internacional de Normalización) son promedios estadísticos realizados con personas, lo cual significa que los valores obtenidos son aplicables a poblaciones y no a individuos específicos; más aún, son aplicables a poblaciones jóvenes y otológicamente normales, ya que las mediciones se realizaron en personas de dichas características. La tercera dificultad tiene que ver con el hecho de que las curvas de Fletcher y Munson fueron obtenidas para tonos puros, es decir sonidos de una sola frecuencia, los cuales son muy raros en la naturaleza. La mayoría de los sonidos de la vida diaria, tales como el ruido ambiente, la música o la palabra, contienen muchas frecuencias simultáneamente.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Se hace necesario diseñar e implementar un algoritmo que realmente adapte las mediciones acústicas o de ruido a la audición humana, teniendo en cuenta que el oído no está expuesto siempre al mismo nivel sonoro, ni tiene una percepción uniforme a todas las frecuencias audibles. Por lo anterior se llega al planteamiento de la siguiente pregunta:

¿Cual sería el algoritmo apropiado que compense las curvas de igual sonoridad para llegar a determinar los niveles sonoros reales que percibe el oído humano?

1.3 JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto se sustenta en la necesidad de tener datos de mediciones acústicas que en realidad se adapten a la audición humana, pues las curvas de ponderación existentes no son reales en este aspecto, pues omiten que el oído humano no está expuesto siempre al mismo nivel sonoro, ni tiene una percepción uniforme a todas las frecuencias audibles.

La realización de este trabajo sería sumamente útil para las personas relacionadas con el campo de la acústica y del sonido, ya que se tendría que hacer modificaciones en las normas y/o sistemas de medición.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un algoritmo que compense mediciones de nivel de presión sonora basado en las curvas isofónicas, con el fin de determinar los niveles sonoros reales que percibe el oído humano.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar los niveles sonoros compensados que generen daño auditivo según las normas.
- Estipular los niveles sonoros compensados que produzcan molestia auditiva de acuerdo al sistema diseñado.
- Comparar el sistema propuesto con mediciones en ponderación A.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1 Alcances

- Modificación del funcionamiento de los instrumentos de medición sonora.
- Replanteamiento de varias teorías acústicas.
- Modificación de normas acústicas a nivel mundial.

1.5.2 Limitaciones

- Escasez de tiempo para llevar a cabo la totalidad del proyecto.
- Ausencia física temporal de los tutores del proyecto.
- Difícil acceso a la información pertinente al desarrollo del proyecto, puesto que ha sido un tema de poca indagación.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 Sonido y ruido

El sonido es un fenómeno físico audible que se produce por la acción de alguna fuente vibrante que está en contacto con un medio capaz de transmitirlo. La fuente puede ser la voz humana, un parlante, una máquina industrial, una industria en su conjunto, etc. El medio es, con mayor o menor eficiencia, cualquier sólido, líquido o gas (el aire el más importante), que esté en contacto con esa fuente y que permite que la señal sonora llegue hasta un detector (un micrófono o el oído, el más importante, complejo y delicado).

Se trata también de una forma de energía que es liberada por una fuente sonora y transportada por el medio a través de un movimiento oscilatorio que adquieren sus partículas componentes. Por ser una forma de energía, pueden detectarse sus efectos, entre los que se incluyen el daño auditivo o molestia. Para cuantificar esa capacidad de “hacerse oír”, a la energía sonora de un sonido se la mide en forma indirecta mediante una escala de decibeles (dB).

Una de las razones del uso de esta escala en la acústica es para reducir el amplio rango audible. La escala de decibeles se reduce simplemente de 0 dB hasta 130 dB.

Esta transformación resulta muy apropiada, porque el oído humano responde a los estímulos sonoros, según una escala en logarítmica.

No sólo el valor de la energía es fundamental para analizar los sonidos, sino que también lo es la frecuencia, es decir, las veces que oscilan las partículas del medio

en cada unidad de tiempo cuando transmite el sonido. Cuanto más agudo sea, tanto mayor es la frecuencia, la que se mide en hertzios, (Hz). En la figura 1 se observa que el oído es más sensible a las frecuencias medias altas, justamente las más importantes en la emisión de la palabra.

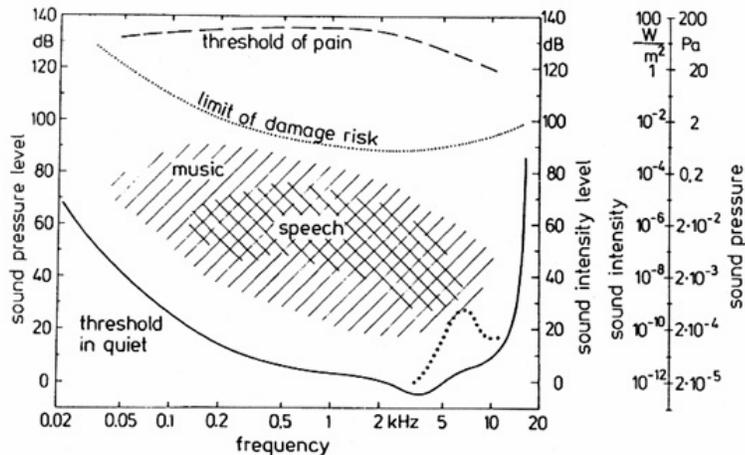


Figura 1. Rango de frecuencias y nivel sonoro.
Fuente: <http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/umb.html>

Ambas variables (nivel sonoro y frecuencia) reunidas, dan la información más completa sobre un sonido (su espectro). El espectro consiste en un gráfico o tabla de los valores de nivel sonoro que le corresponden a cada intervalo de frecuencias (llamados bandas de frecuencia). En la práctica suelen utilizarse las bandas de octavas, o sea aquellas que están centradas en el valor que es el doble de la anterior y la mitad de la siguiente, o sea sistema de filtros, los cuales sólo dejan pasar ciertas bandas de frecuencia que están normalizadas internacionalmente.

Las bandas de octavas son: 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 8000 Hz, 16000 Hz.

Un espectro de nivel sonoro es la respuesta de un recinto, en cada instante y para cada sitio de su interior, a la acción de una fuente sonora o conjunto de fuentes, que se puede medir o al menos percibir auditivamente.

Por otro lado, la característica acústica propia de una fuente está dada por su espectro de potencia sonora, cuyos valores también están medidos en dB por banda de frecuencias. A medida que el sonido evoluciona, estos valores liberados al ambiente sufren alteraciones debido a las propiedades geométricas y acústicas del recinto generando espectros de nivel sonoro cambiantes. La misma fuente puede producir efectos diferentes en ambientes diferentes, e incluso en distintos puntos del mismo ambiente y en un mismo punto, en instantes sucesivos. Un espectro de potencia (propiedad de la fuente sonora) no produce siempre el mismo espectro sonoro (propiedad de la interacción entre la fuente, su ubicación y cada sitio del recinto).

El ruido, en realidad, el ruido es el mismo fenómeno físico del sonido y si bien pueden citarse diferencias técnicas entre ambos, la de carácter subjetivo puede resumirse en la cita de la Organización Mundial del Trabajo (O. I. T.).

“El término ruido comprende cualquier sonido que pueda provocar una pérdida de audición o ser nocivo para la salud o entrañar cualquier otro tipo de peligro”.

- La onda sonora. Se entiende por onda sonora a los periodos alternantes de compresión y rarefacción (dilatación) de las moléculas dentro de un medio como el aire. Es decir, la onda sonora es una vibración normalmente experimentada a través del aire, y como tal posee dos características de suma importancia: la frecuencia y la intensidad.

La frecuencia es energía acústica o número de ondas sonoras que pasan por un punto en un segundo, correlacionables con el tono y medibles en Hertzios. La cóclea humana puede detectar frecuencias que van de 20 Hz a 20.000 Hz, siendo los límites más importantes para la recepción de la conversación, los que van de 500 Hz a 3000 Hz.

La intensidad para un tono puro, es el nivel de presión de un sonido. La primitiva medición de la audición humana por medio de presión de sonido en dinas / cm² es difícil debido a la sensibilidad tan diferente del oído a varias frecuencias, por lo cual se ha desarrollado la escala decibélica, medida logarítmica de la audición y que por medio de la estandarización estableció como límites de la intensidad sonora una escala de 0dB a 120 dB.

- Valores índices. Para poder valorar la posibilidad de daño auditivo ocasionado por ruido y su protección (objetivo final del trabajo), deben estudiarse valores representativos que lo evalúen y simplifiquen la información dada por su espectro. Para ello se modificó la escala de decibeles en una llamada escala de compensación A o simplemente dB(A). Esta escala reemplaza a todo un espectro por un único valor numérico considerando al nivel de cada banda de frecuencias con un peso relativo similar a como lo haría el oído humano: le da menos importancia a las bajas frecuencias y a las muy altas respecto de las centrales de acuerdo con valores que se han normalizado ¹. La ponderación o compensación A no es precisa para todos los casos de nivel sonoro y frecuencia, aún así es utilizada en nuestros días.

En consecuencia, y aceptando pérdidas de información, se reemplaza a todo un espectro completo de nivel sonoro por un simple número expresado en dB(A). Este valor se puede medir directamente con un equipo apropiado (la mayoría de los medidores de nivel sonoro) pero también se puede calcular a partir de un espectro tal y como se explica a continuación:

Se suman con el signo que corresponda los valores de nivel sonoro del espectro en cuestión con los de la tabla 1 banda por banda, obteniéndose un espectro modificado. Es igual para todas las ponderaciones.

(1) Norma IRAM 4074, "Medidor de Nivel Sonoro".

Frecuencia [Hz]	Ponderación A [dB]
63	-26,2
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1000	0
2000	1,2
4000	1
8000	-1,1

Tabla 1. Valores relativos del perfil A en dB

Para ciertos análisis de ruidos puede prescindirse de su comportamiento real mediante idealizaciones que simplifiquen su estudio pero permitan mantener acotadas las variaciones de los parámetros sujetos a estudio.

En este sentido, para prever el riesgo de hipoacusia por ruidos no impulsivos, puede remplazarse la evolución real de los ruidos por otro ficticio con un nivel constante con la condición de mantener la misma energía sonora durante el lapso de estudio o permanencia. Por supuesto que esta simplificación hará perder propiedades del ruido real como por ejemplo (y obviamente) su evolución temporal, pero cuando sólo se quiere determinar la agresión sobre el sistema auditivo, esta pérdida no es significativa.

Esto se hace dentro del marco de llamado “Principio de igual energía” que postula que el riesgo de hipoacusia está dado por la dosis de ruido recibida, es decir, por la acumulación de energía sonora a lo largo del tiempo de agresión. Así se define el Nivel Sonoro Continuo Equivalente (NSCE) que resulta de remplazar a la evolución temporal del nivel sonoro real expresado en dB(A) por un valor promedio constante conservando la misma dosis. Esta simplificación surge de admitir que la causa de daño auditivo es la acumulación de energía sonora (dosis) a lo largo de una jornada y no los valores puntuales (salvo para ruidos impulsivos).

- Efectos del ruido. Los efectos del ruido van más allá de los directos sobre la audición, afectando a la unidad psicofísica del ser humano (molestia, cansancio, vértigos, desmayos, etc.) como se ha hecho notar en numerosas publicaciones especializadas y congresos internacionales. Casualmente una de las acepciones etimológicas de la palabra “noise” (ruido) es “nausea” (náusea) por tratarse precisamente de uno de los efectos. Debe aceptarse la dificultad de cuantificar los efectos directos e indirectos por lo variable de la sensibilidad individual y los riesgos para este tipo de ensayos.

Debido a que uno de los efectos indirectos es la falta de concentración en ambientes ruidosos, es posible y de hecho sucede, que ocurran accidentes de trabajo como consecuencia de la falta de atención en el control de máquinas o en la percepción de indicaciones o señales de peligro. Por esta razón la O.I.T. recomienda al decir:

*“El ruido debería medirse en los lugares de trabajo ruidosos cuando:
Revista importancia, por razones de seguridad, que no se exponga a un
trabajador a la tensión y la fatiga suplementarias resultantes del ruido”²*

El ruido de origen Industrial no sólo afecta los trabajadores sino también puede comprometer la capacidad de concentración, inteligibilidad de la palabra en oficinas propias e incluso a la tranquilidad y descanso de vecinos.

Para controlar los efectos del ruido, existen criterios que fijan valores máximos de nivel sonoro admisibles en el interior de recintos de acuerdo con la actividad específica que se realice en ellos. Así quedan determinadas las atenuaciones mínimas requeridas para reducir los niveles existentes hasta los recomendados. En la tabla 2 se muestran los niveles máximos recomendados

(2) Oficina Internacional del Trabajo, “PROTECCION DE LOS TRABAJADORES CONTRA EL RUIDO Y LAS VIBRACIONES EN LOS LUGARES DE TRABAJO”. (Ginebra, 1977).

por uno de los criterios acústicos más recientes. El criterio fija curvas de nivel sonoro por bandas de frecuencias y se da en forma resumida como valor en dB(A).

Recinto	Máximo
Sala de conferencias (menos de 50 personas)	< 38
Dormitorio, hospital (en general para descanso)	38 – 48
Oficina privada, biblioteca	38 – 48
Salas de estar en viviendas para conversación, escuchar radio y TV	38 – 48
Oficinas generales, recepción	43 – 53
Laboratorios, oficinas de ingeniería	48 - 58
Salas de computación	53 – 63
Salas de máquinas (en el límite de conversación telefónica o personal)	58 – 68
Áreas de trabajo sin condiciones para inteligibilidad	63 - 78

Tabla 2. Valores de nivel sonoro recomendados como máximos para distintos recintos en dB(A)

Esta tabla debe considerarse al recinto mencionado como representante de una clase y al primer valor de cada línea como el recomendado y al segundo como al máximo aceptable.

2.1.2 Sonoridad.

La sonoridad es una medida subjetiva de la intensidad con la que un sonido es percibido por el oído humano. Es decir, la sonoridad es el atributo que permite ordenar sonidos en una escala del más fuerte al más débil.

La sonoridad depende de la intensidad de un sonido, pero también de su frecuencia y de otras variables, como pueden ser la sensibilidad del oído de quien escucha y de la duración del sonido.

Como la sonoridad no es una magnitud absoluta, lo que se hace es medir el nivel de sonoridad, es decir, determinar cómo es de fuerte un sonido en relación con otro. Para medir el nivel de sonoridad hay dos unidades: el fonio y el sonio.

- El sonio. Es una unidad que no sirve para comparar la sonoridad de dos sonidos diferentes, se estableció una nueva unidad, el son (o sonio), capaz de establecer la relación real de sonoridad de sonidos diferentes.

El son está definido arbitrariamente como la sonoridad de un sonido senoidal de 1 kHz con un nivel de presión sonora (intensidad) de 40 dBSPL.

- El fonio. El fon (o fonio) está definido arbitrariamente como la sonoridad de un sonido senoidal de 1 kHz con un nivel de presión sonora (intensidad) de 0 dB SPL. Así, 0 dB es igual a 0 fon y 120 dB es igual a 120 fon. Eso siempre para sonidos sinusoidales con frecuencias de 1 kHz.

$$S = 10 * \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ fonios}$$

Ecuación 1. Conversión de sonios a fonios

El fon es una unidad que no sirve para comparar la sonoridad de dos sonidos diferentes, sino que hace referencia a la sonoridad de un determinado sonido. Lo que se debe a que la escala de fones está relacionada con una escala logarítmica.

- Curvas isofónicas. Las curvas isofónicas son curvas de igual sonoridad. Estas curvas calculan la relación existente entre la frecuencia y la intensidad (en decibelios) de dos sonidos para que éstos sean percibidos como igual de fuertes, con lo que todos los puntos sobre una misma curva isofónica tienen la misma sonoridad.

Así, si 0 fon corresponden a una sonoridad con una intensidad de 0 dB con una frecuencia de 1 kHz, también una sonoridad de 0 fon podría corresponder a una sonoridad con una intensidad de 60 dB con una frecuencia de 70 Hz.

Las primeras curvas de igual sonoridad fueron establecidas por Munson y Fletcher en 1930.

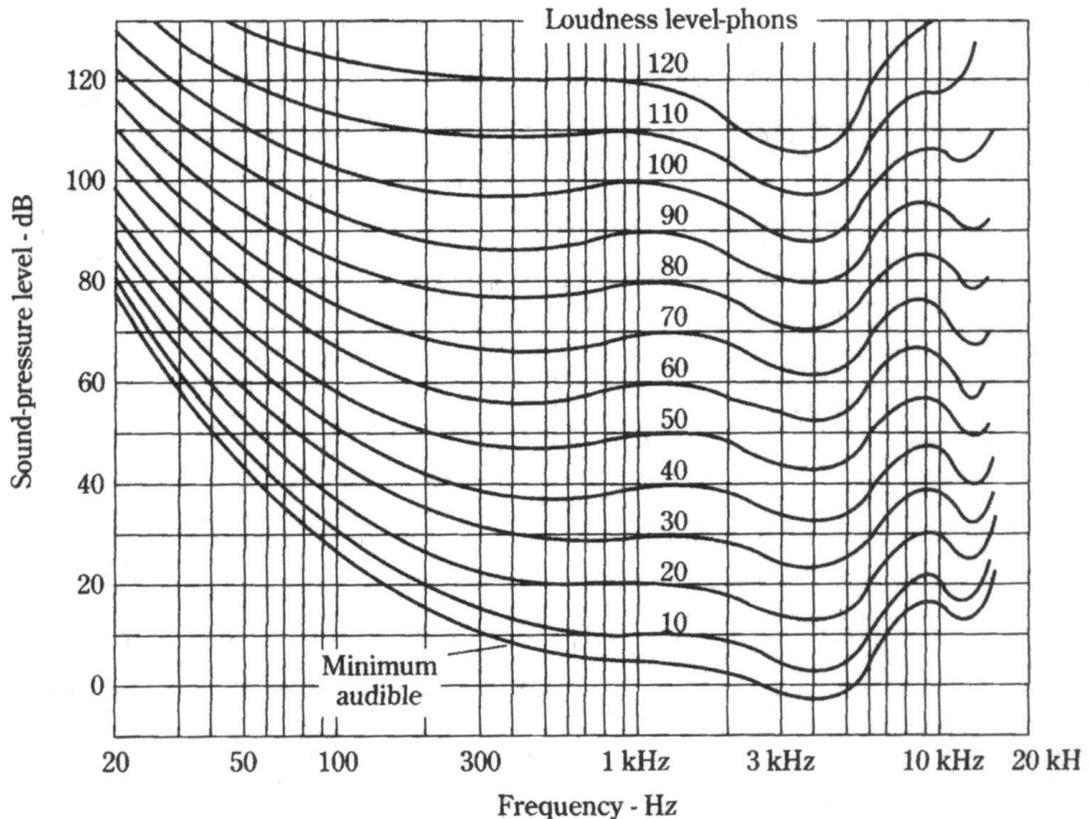


Figura 2. Curvas Isofónicas de Fletcher y Munson.

Fuente:<http://www.miliarium.com/Paginas/Leyes/urbanismo/estatal/RD1909-81A.htm>

En estas curvas isofónicas se observa como, a medida que aumenta la intensidad sonora, las curvas se hacen, cada vez, más planas. Esto se traduce en que la dependencia de la frecuencia es menor a medida que aumenta el nivel de presión sonora, lo que significa que si disminuye la intensidad sonora los primeros sonidos en desaparecer serían los agudos (altas frecuencias).

Las curvas de Munson y Fletcher fueron recalculadas, más tarde, por Robinson y Dadson.

Las curvas Munson y Fletcher y las curvas de Robinson y Dadson sólo son válidas para un campo sonoro directo, dado que no tienen en cuenta que no percibimos por igual los sonidos si provienen de diferentes direcciones (campo sonoro difuso).

El fenómeno psicoacústico de la diferente sensibilidad del oído a diferentes frecuencias, y la variación de esa "respuesta en frecuencia" (realmente los contornos son casi como las curvas de respuesta en frecuencia puestas al revés) a medida que van cambiando los niveles de escucha fue cuantificado de forma exhaustiva por primera vez por los investigadores Fletcher & Munson en los años treinta del siglo pasado. Por eso a este tipo de curvas se les llama comúnmente contornos de Fletcher & Munson, aunque hoy en día suelen utilizarse contornos más exactos medidos con posterioridad, como pueden ser los de Robertson & Dadson, o bien los contornos estandarizados ISO.

2.1.3 Sistema auditivo humano

El oído humano puede percibir una amplia serie de frecuencias (aproximadamente de 16 Hz hasta 20.000 Hz). Sin embargo, las variaciones individuales son enormes. Por regla general, la percepción de las altas frecuencias es mejor en la infancia y disminuye paulatinamente con el tiempo, de manera que el adulto normal se le dificulta oír las frecuencias que pasan de 10.000 Hz o 12.000 Hz.

En la vejez aparece una afección llamada PRESBIACUSIA, en la que la percepción del oído por conducción aérea u ósea disminuye a medida que las frecuencias son más altas.

La intensidad sonora está dada por decibeles cuyo símbolo es dB; 0 dB corresponde a una intensidad apenas perceptible, 20 dB indica un sonido 100

veces más intenso, mientras que un sonido de 60 dB es un millón de veces más intenso. A una distancia entre 1 y 2 metros, un murmullo produce 20 dB y un diálogo normal produce unos 60 dB. A 10 metros de distancia un martillo neumático produce un sonido de 100 dB, es decir 10.000 millones de veces más intenso que el escasamente audible. Esta es la enorme serie de intensidades que podemos percibir.

- El pabellón de la oreja. El oído externo (O.E) tiende a concentrar las ondas sonoras, principalmente las altas frecuencias, y llevarlas al conducto auditivo externo.

Así como los ojos proporcionan la visión estereoscópica, permitiendo calcular distancias, los oídos proporcionan una audición estereoscópica, con lo que se puede calcular con precisión, la dirección del sonido y la posición de la fuente que le da origen. Esto se logra por diferencias en la fase de vibración al llegar a cada oído y además por diferencias de intensidad, calidad o timbre, ya que en el oído más alejado el sonido tiene que seguir una trayectoria angular. La forma de los pabellones (los diversos pliegues) nos ayuda a diferenciar el sonido procedente directamente de atrás del que nos llega directamente de frente.

- Conducto auditivo externo C.A.E. La función del conducto auditivo externo es proteger la membrana y mantener relativamente constantes las condiciones de temperatura y humedad necesarias para conservar las características elásticas de dicha membrana. También actúa como elemento resonante, de manera que en la membrana timpánica las vibraciones sonoras tienen un nivel de presión considerablemente mayor que en el pabellón del oído. Esto es particularmente cierto en las frecuencias 2,000 Hz a 5,500 Hz, en las que el aumento de presión varía de 5 dB a 10 dB.

- El tímpano o membrana timpánica M.T. La membrana timpánica esta formada por una serie de fibras circulares y radiales; debe mantenerse tensa para ser más sensibles a las vibraciones, sobre todo las de las frecuencias elevadas, lo que se consigue mediante el músculo tensor del tímpano. En la membrana timpánica los cambios de presión en las ondas sonoras se transforman en vibraciones mecánicas de longitud de onda totalmente pequeña; por ejemplo, durante una conversación normal el desplazamiento de la membrana timpánica es del orden del diámetro de una molécula de hidrogeno.

La membrana timpánica actúa también como barrera protectora del contenido del oído medio (O.M) constituye, además, un espacio acústico de bastante absorción para que las vibraciones aéreas en el oído medio se fragmenten y dispersen por las paredes, el epitimpano y las celdas mastoideas, y así no se ejerza presión contra la ventana redonda (V.R) evitándose la neutralización de las vibraciones que desde la cóclea o caracol viene en dirección contraria a la ventana oval (V.O).

- La cadena oscicular. Los tres huesillos del oído funcionan a más de 800 Hz como uno solo y transmiten las vibraciones del tímpano (al que están unidas las apófisis larga y externa del martillo) a la ventana oval, sobre la que descansa la base del estribo.

Estos huesillos, con una suspensión perfecta, no solo transmiten vibraciones casi sin distorsión, sino que suministran parte de la energía adicional necesaria al pasar la vibración de un medio de conducción poco denso, el aire, a otro más denso, la perilinfa. Esto se logra, en parte, por el sistema de palancas que constituyen los huesillos. Como el yunque es más corto que la apófisis larga del martillo, se reduce la amplitud de las vibraciones al llegar a la ventana oval, pero se aumenta su potencia en una proporción aproximada de 2 a 1.

Un factor mucho más importante para aumentar la energía de las vibraciones transmitidas al oído interno es la diferencia en las áreas relativas de la membrana timpánica y la ventana oval. La presión sonora recibida por el área mucho más extensa de la membrana timpánica, aumenta aproximadamente en proporción de 10 a 1 cuando se transmite a un área mucho menor de la ventana oval.

- Oído interno. Las vibraciones que la base del estribo transmite a la ventana oval, inducen vibraciones en la perilinfa que rodea y baña el laberinto membranoso, en el que se alojan los órganos terminales del oído y del equilibrio. Macroscópicamente el laberinto membranoso está constituido por dos partes: la porción cocleosacular y la porción utriculovestibular. Estas dos partes se encuentran comunicadas por el conducto de Hensen, este proporciona la continuidad fisiológica de todas las partes del laberinto membranoso.

La cóclea tiene forma de caracol, en el interior de sus espiras existe una división horizontal que forma dos rampas espirales paralelas (escalas o escalas): una superior la scala vestibuli (escala vestibular), y una inferior, la scala tympani (escala timpánica). También contienen perilinfa.

La división está formada por tres estructuras. A partir del interior de la espiral se extiende un borde óseo (lámina espiral) que se continúa hacia fuera por un ligamento grueso, denominado ligamento espiral; estas dos estructuras están conectadas por la relativamente delgada membrana basilar, sobre la cual descansa el órgano corti.

Entre las escalas se encuentra un tercer compartimento cuneiforme llamado conducto coclear. Está separado de la scala vestibular por la membrana de Reissner y de la scala timpánica por la membrana basilar. El conducto coclear

contiene un líquido llamado endolinfa, su función es nutrir al órgano corti, aislándolo de cualquier vibración o ruido producido por su riego sanguíneo intrínseco. ya que el conducto coclear se encuentra cerrado en el helicotrema, no existe una comunicación directa entre la endolinfa y la perilinfa. sin embargo, a través del conducto de hensen hay comunicación con los conductos semicirculares, lo que explica la diversidad de síntomas observadas en el síndrome de meniére.

El órgano de corti, como se ha dicho anteriormente, se encuentra sobre la membrana basilar. está formado por una gran diversidad de células de sostén intercaladas, y descansado sobre ellas se encuentran las células ciliadas, que constituyen los órganos sensoriales terminales. estas células se encuentran dispuestas por segmentos de hileras bien definidas, una sola hilera interna y varias externas. el número total aproximado de células es de 7.000 internas y 24.000 externas.

En la superficie libre de las células ciliadas se presentan unas prolongaciones cortas y rígidas, semejantes a cerdas llamadas cilios, 40 por célula en la espira inferior y hasta 100 por célula en la apical. Sobre las células ciliadas apoya una estructura de aspecto gelatinoso llamada membrana tectorial o tectoria, en la que se encuentran incrustados los externos de los cilios.

- Las vías nerviosas y el cerebro. El nervio coclear está constituido por neuronas de primer orden que pasan del órgano de corti al pedúnculo cerebral sin hacer conexión y después hacen conexión con las neuronas de orden superior que pasan a través de los núcleos (puntos de unión) dentro del cerebro, llenando así las señales de los oídos los lados de la corteza cerebral.

a) Parten más fibras nerviosas del extremo basal de la cóclea que del extremo apical; unas fibras se conectan con solo una o dos fibras, otras con varias.

Estas neuronas de primer orden se agrupan ordenadamente dentro del nervio auditivo; las fibras de la cóclea central con los de la parte central y las fibras basales y apicales se unen alrededor de la parte central en direcciones opuestas.

b) Las neuronas de primer orden pasan a los núcleos cocleares dorsales o ventrales dentro del pedúnculo cerebral, formándose uniones con las neuronas de segundo orden, que pasan a los complejos olivares superiores izquierdo y derecho, haciendo unión con las neuronas de tercer orden, que pasan al colículo inferior, haciendo sinapsis con las neuronas de cuarto orden que pasan al cuerpo geniculado medio en el tálamo, donde finalmente se unen las neuronas de quinto orden que pasan al área temporal auditiva de la corteza cerebral. Las señales que se originan en cualquiera de de las dos cócleas llegan por último a ambas áreas auditivas, la izquierda y la derecha; por lo tanto, una lesión del lado izquierdo de la corteza puede causar la pérdida de la audición en el oído derecho.

2.1.4 Fenómenos psicoacústicos

El oído y el sistema nervioso auditivo, determinan las características que deben satisfacer los propios sonidos. Al evaluar las condiciones acústicas que se presentan en el ambiente, es importante conocer el significado que puede tener a través del sistema auditivo, puesto que cualquier variación puede ser significativa.

Existen muchas hipótesis, entre ellas, el comportamiento no lineal del oído que impide la aplicación del principio de la superposición lineal, obstaculizando su análisis. La percepción subjetiva de las variables acústicas está determinada por condiciones ambientales, por la actitud del oyente y por el orden; la duración y la repetición de los estímulos, factores que como respuestas resultan ser independientes por lo que algunos interrelacionan entre si. Ya que en las mediciones es complicado conocer todos los factores que intervienen y mantener

constante los que se necesiten, los resultados pueden diferir notablemente entre las diversas personas si no se establecen condiciones normalizadas.

Por ende los resultados de las mediciones de la percepción auditiva son necesariamente estadísticos y en su mayoría representados gráficamente, cabe anotar que también se pueden expresar matemáticamente, pero tales expresiones son muy complejas y tienen poco significado analítico.

- Umbrales de audibilidad. El umbral de audibilidad para una frecuencia específica es la mínima presión sonora efectiva capaz de provocar una sensación auditiva en ausencia de ruido. Se expresa usualmente en decibeles referidos $20\mu Pa$ (ó dBSPL).

El umbral de audibilidad ha sido medido en diferentes formas. Puede medirse a la entrada del conducto auditivo externo o en un campo libre plano o difuso en ausencia de la cabeza del oyente. Su valor depende también de sí el estímulo se presenta a un solo oído (monoaural) o a los dos oídos (binaural). Estas pruebas se hacen con grupos de personas jóvenes masculinos entre 10 y 25 años de edad normalmente sanos.

Existen 2 formas comunes para la medición del umbral de audibilidad estas son:

- a) Los umbrales de audibilidad cuando el sonido se presenta a un oído mediante audífonos, midiendo la presión a al entrada del C.A.E.
- b) Se coloca una fuente de sonido a una distancia mayor de un metro directamente frente al oyente en un recinto muy absorbente y sin ruido.

La presión se mide en la posición correspondiente al centro de la cabeza del oyente en ausencia de este. La diferencia entre la forma número uno y la fórmula número dos corresponde a la percepción binaural y a efectos de difracción.

El umbral de audibilidad varía de un individuo a otro y aún para una misma persona varía de día a día y de hora a hora. Después de que la persona está expuesta a un ruido de nivel moderado, ocurre una ligera reducción temporal de la sensibilidad que desplaza el umbral de audibilidad hacia arriba. Las mediciones del umbral por debajo de 30 Hz son inseguras debido a que la intensidad requerida es alta, por esto es difícil evitar la presencia de distorsión en la fuente del sonido.

El límite de frecuencias audibles varía de una persona a otra, la pérdida de agudeza auditiva es mayor en los hombres que en las mujeres, ya que probablemente están más expuestos a ruidos intensos. El umbral de audibilidad tal como se ha definido corresponde a la percepción de tonos puros.

- Efecto de enmascaramiento. Debido a la presencia de ruido de fondo, se pierde la inteligibilidad de la voz. El desplazamiento del umbral de audibilidad se denomina enmascaramiento. Cuantitativamente el enmascaramiento es la cantidad en decibeles que se eleva el umbral de audibilidad por la presencia de un ruido. A menos que el nivel de ruido de fondo sea suficientemente bajo, la voz no podrá ser completamente inteligible, ni la música adecuadamente apreciada.

El enmascaramiento puede ser producido por tonos puros como por ruidos de espectro continuo, los estudios realizados hasta el momento indican que los

tonos de baja frecuencia producen un gran efecto de enmascaramiento, y los tonos de alta frecuencia producen poco enmascaramiento.

Para que un tono puro pueda escucharse en presencia de un ruido de banda ancha, es necesario que tenga un nivel de presión sonora mayor al nivel espectral del ruido a su frecuencia, aumentando un cierto número de decibeles. Esta cantidad mínima de dB se define como relación crítica.

La ecuación puede expresarse como:

$$N_{tp} = N_e + R.C$$

Ecuación 2. Relación crítica

Donde

N_{tp} = es el nivel mínimo que debe tener el tono puro para ser perceptible es decir, es el umbral del tono en presencia de ruido.

N_e = es el nivel espectral medio del ruido en al frecuencia del tono puro.

$R.C$ = es la relación crítica en dB.

El enmascaramiento producido por un ruido de banda ancha en un tono estará dado por la diferencia entre el umbral en presencia de ruido y el umbral en ausencia de ruido, entonces:

$$M = N_{tp} - u = N_e + R.C - U$$

Ecuación 3. Enmascaramiento en decibeles

Luego,

M es el enmascaramiento en decibels

U es el umbral en ausencia de ruido dado por la curva de umbral de audibilidad.

La forma en que se incrementa la sensación de intensidad de los sonidos complejos de banda ancha.

2.2 MARCO NORMATIVA

2.2.1 Norma IRAM 4066 (ISO 226)

ACÚSTICA

CURVAS DE IGUAL NIVEL DE SONORIDAD

OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma especifica combinaciones de niveles de presión sonora y frecuencias de tonos puros continuos, los que son percibidos como de igual sonoridad por oyentes humanos. Las especificaciones están basadas en las siguientes condiciones:

- a) El campo sonoro es una onda libre plana y progresiva en ausencia del oyente.
- b) La fuente sonora se encuentra directamente frente al oyente.
- c) Las señales sonoras son tonos puros.
- d) Los niveles de presión sonora se miden en la posición donde se ubicaría el centro de la cabeza del oyente, pero sin su presencia.
- e) Audición binaural.
- f) Los oyentes son personas otológicamente normales, con edades de 18 a 25 años inclusive.

DEFINICIONES

Para los fines (propósitos) de esta norma se aplican los siguientes términos y definiciones.

Persona otológicamente normal. Persona en estado normal de salud, libre de todo síntoma de enfermedades del oído y de obstrucción por cera en el canal auditivo y no posee historia de sobreexposición al ruido, drogas ototóxicas o antecedentes familiares de pérdidas auditivas.

Campo sonoro libre. Campo sonoro donde los límites del ambiente ejercen un efecto despreciable en las ondas sonoras.

Nivel de sonoridad. Valor en fones, con el mismo valor numérico de un nivel de presión sonora en decibeles correspondiente a un sonido de referencia, consistente en una onda progresiva plana sinusoidal a la frecuencia de 1000 Hz, frontalmente incidente, que se considera de igual sonoridad a la del sonido dado.

Relación de igual sonoridad. Curva o función que expresa la relación entre sus niveles de sonoridad y de presión sonora, para un tono puro de una frecuencia dada.

Curva de igual sonoridad – nivel. Curva en el plano de niveles de sonoridad – frecuencia que une puntos cuyas coordenadas representan tonos puros juzgados de igual sonoridad.

Curva normal de igual sonoridad – nivel. Curva en el plano de niveles de sonoridad – frecuencia que representa el promedio de tonos puros juzgados de igual sonoridad por personas otológicamente normales en el grupo de edades de 18 a 25 años inclusive.

Umbral de audición. Nivel de un sonido al que una persona responde 50% de detecciones correctas en repetidas pruebas, bajo condiciones especificadas.

FÓRMULA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS CONTORNOS DE IGUAL SONORIDAD

- Obtención del nivel de presión sonora L_p de un tono puro de frecuencia f , el que tiene un nivel de sonoridad L_N , está dada por:

$$L_p = \left(\frac{10}{\alpha f} \cdot \lg Af \right) dB - L_u + 94dB$$

Ecuación 4. Cálculo del nivel de presión sonora.

Siendo:

$$Af = 4.47 \times 10^{-3} \times (10^{0.025L_N} - 1.15) + \left[0.4 \times 10 \left(\frac{T_f + L_u}{10} \right) \right]^{\alpha f}$$

Ecuación 5. Cálculo de Af

T_f = Umbral de audición

αf = Exponente para la percepción de sonoridad

L_u = La magnitud de la función de transferencia lineal normalizada a 1000 Hz

La ecuación es aplicable a cada frecuencia para valores desde el límite inferior de 20 fones a los siguientes límites superiores:

20Hz a 4000 Hz 90 fones

5000Hz a 12500 80 fones

La ecuación es solamente informativa para los niveles inferiores a 20 fones, ya que se carecen de datos experimentales entre 20 fones y los umbrales de audición. La misma consideración es aplicable a niveles de 90 a 100 fones desde

20 a 1000 Hz, debido a que sólo se cuenta con datos a 100 fones, obtenidos en un solo laboratorio de investigación.

Los valores resultantes son

Frecuencia (Hz)	af	Lu -dB	Tf dB
20	0.532	-31.6	78.5
25	0.506	-27.2	68.7
31.5	0.480	-23	59.5
40	0.455	-19.1	51.1
50	0.432	-15.9	44
63	0.409	-13	37.5
80	0.387	-10.3	31.5
100	0.367	-8.1	26.5
125	0.349	-6.2	22.1
160	0.330	-4.5	17.9
200	0.315	-3.1	14.4
250	0.301	-2	11.4
315	0.288	-1.1	8.6
400	0.276	-0.4	6.2
500	0.267	0.0	4.4
630	0.259	0.3	3
800	0.253	0.5	2.2
1000	0.250	0.0	2.4
1250	0.246	-2.7	3.5
1600	0.244	-4.1	1.7
2000	0.243	-1	-1.3

2500	0.243	1.7	-4.2
3150	0.243	2.5	-6
4000	0.242	1.2	-5.4
5000	0.242	-2.1	-1.5
6300	0.245	-7.1	6
8000	0.254	-11.2	12.6
10000	0.271	-10.7	13.9
12500	0.301	-3.1	12.3

Tabla 3. Parámetros de la ecuación 4 usados para calcular las curvas normales de igual sonoridad – nivel

- Obtención de los niveles de sonoridad a partir de los niveles de presión sonora.

El nivel de sonoridad L_N de un tono puro de frecuencia f , que tiene un nivel de presión sonora L_p está dado por:

$$L_N = (40 \cdot \lg Bf) \text{ fones} + 94 \text{ fones}$$

Ecuación 6. Cálculo del nivel de sonoridad de un tono puro

Donde

$$Bf = \left[0.4 \times 10^{\left(\frac{Lp + LU}{10} - 9 \right)} \right]^{\alpha f} - \left[0.4 \times 10^{\left(\frac{Tf + LU}{10} - 9 \right)} \right]^{\alpha f} + 0.005135$$

Ecuación 7. Cálculo de Bf

y Tf , αf y Lu tienen el mismo significado que la ecuación 4

Las mismas restricciones aplicadas a la ecuación x son también aplicables a la ecuación 6.

2.3 MARCO TEORICO

2.3.1 Funcionamiento del oído humano

- Transmisión de las vibraciones sonoras al oído interno. Las vibraciones del estribo en la ventana oval se transmiten hacia la perilinfa por la escala vestibular. La membrana de Reissner transmite estas vibraciones a la endolinfa y de allí, a través de la membrana basilar, a la escala timpánica por donde desciende hacia la ventana redonda. Así las vibraciones de la ventana redonda corresponden con las de la ventana oval, aunque una fracción de segundo más tarde y en oposición de fase; esto ocurre cuando la base del estribo penetra en la ventana oval y entonces la ventana redonda cede hacia la caja del tímpano.
- Transformación de la energía mecánica en potencial bioeléctrico. Las vibraciones de la membrana basilar producen una tracción sobre las células ciliadas unidas a la membrana tectoria. Por lo anterior, la energía hasta entonces mecánica se transforma en impulsos eléctricos que estimulan las fibras del VIII par craneal y dan lugar así a los potenciales de acción que hacen posible la transmisión a través de las líneas nerviosas.

en general, se acepta la hipótesis de que las células ciliadas están agrupadas en segmentos, según la frecuencia que transmiten; por ejemplo, las frecuencias altas se encuentran en el externo inferior de la cóclea y las de frecuencias bajas en la región cercana al ápice. actualmente se acepta que esta activación segmentaría es producida por ondas permanentes en la endolinfa.

- Transmisión de impulsos al cerebro. En el órgano de corti cada célula ciliada es conectada por lo menos con una fibra nerviosa. Además, cada fibra

nerviosa tiene conexión con una célula ciliada y algunas con varias. En general, las células ciliadas internas tienen sinapsis con una sola neurona y las externas con muchas. Esta superposición de conexiones nerviosas se cree que es para proporcionar flexibilidad funcional y la capacidad de compensar lesiones en alguna célula ciliada o en ciertas neuronas.

El nervio auditivo consta de 30.000 neuronas. El ganglio espiral, en el que se encuentran las neuronas bipolares, cuyas prolongaciones centrípetas forman el nervio coclear, que se dirige a los núcleos cocleares dorsales y ventrales, situados en la protuberancia.

De estas estaciones de relevo, las fibras pasan a la oliva superior del mismo lado, otras pasan y cruzan al lado opuesto. Pueden también pasar hacia arriba al cuerpo geniculado interno con o sin sinapsis intermedias, con neuronas localizadas en los lemniscos laterales y en los tubérculos cuadrigéminos posteriores. Entre estos núcleos localizados en el mesencéfalo existe una segunda vía de decusación más pequeña, de modo que los estímulos recibidos en los oídos pueden ser sincronizados en uno de los dos niveles o en ambos. Al llegar a la corteza se percibe los diversos tonos. En general, a medida que los impulsos nerviosos ascienden por las vías auditivas, existe entre los oídos una creciente interacción y sincronización. Es por esto que las lesiones por encima del nivel pedúnculo cerebral inferior necesitan métodos diagnósticos audiológicos muy complicados, así como estudios radiológicos.

2.3.2 La audición

El punto más interesante de la acústica fisiológica es el mecanismo coclear que convierte la energía sonora que recibe la ventana oval, transmitida por la cadena oscicular del oído medio, en impulsos nerviosos que pasan a lo largo del nervio auditivo hasta el cerebro; en realidad los mecanismos propuestos distinguen una teoría auditiva de la otra.

Existen dos hipótesis acerca del mecanismo coclear del oído, que fueron precursoras de las teorías auditivas actuales.

- A mediados del siglo XIX, Hermann Von Helmholtz, fisiólogo y físico alemán, escribió un trabajo definitivo sobre psicoacústica, *DIE LEHRE VON DEN TONEMPFINDUNGEN* (sobre las sensaciones del tono), y bosquejó su teoría del lugar de resonancia de la audición. Helmholtz dijo que la característica más distintiva del oído se expresaba por la ley acústica de Ohm, que expresa que el aparato auditivo distingue la fundamental y los armónicos de los sonidos en ondas de forma senoidal. Así Helmholtz buscó el sistema mecánico que analiza los sonidos dentro del oído interno. Examinó la cóclea e identificó primero los resonadores como arcos de Corti, las fibras rígidas que sostienen los cilios en el órgano de Corti. Para Helmholtz la membrana basilar y el piano eran análogos, ya que todas las fibras de la membrana basilar estaban en tensión y las fibras apicales eran mucho más largas que las basales. Las vibraciones sonoras, después de pasar a través del oído externo y del oído medio, ponían en movimiento varias cuerdas (fibras) de la membrana basilar, las cuerdas eran complemento de la fundamental y de las armónicas, tal como las vibraciones sonoras pueden poner en movimiento varias cuerdas del piano no amortiguadas. Cada fibra de la membrana basilar estimulada a un nervio diferente para enviar impulsos a lo largo del nervio auditivo a áreas discretas del cerebro. Los sonidos intensos provocaban una descarga nerviosa más rápida que daba lugar a sensaciones más fuertes. La teoría del lugar de resonancia de Helmholtz fue considerada durante mucho tiempo como una descripción de las funciones del oído interno, pero los anatomistas al inspeccionar la membrana basilar, encontraron que el número de fibras nerviosas era insuficiente para asignar una a cada altura tonal discriminable. Lo que se refiere a la respuesta, en la teoría de lugar de resonancia, era insostenible, pero el concepto del lugar de la cóclea ha subsistido en la teoría moderna.

A fines del siglo xix, william rutherford, fisiólogo inglés, bosquejó en su teoría del teléfono. rutherford probó que el oído interno no era mas que un mecanismo de relevo para el estímulo sonoro. El oído interno convertía la energía sonora en energía eléctrica conducida por la línea telefónica, según la teoría de Rutherford cada célula ciliada en el órgano de corti responde a cada estímulo sonoro, al transducir el sonido a vibraciones eléctricas equivalentes (en amplitud, frecuencia, timbre), al estímulo sonoro. Las ondas eléctricas llegan al cerebro y la corteza cerebral lleva a cabo el análisis de Fourier. Rutherford dice que el análisis del sonido es aprendido y que, por lo tanto, se localiza en aquellas porciones del cerebro relacionadas con el aprendizaje. La teoría del teléfono se consideró meritoria hasta que los fisiólogos encontraron que el nervio auditivo es incapaz de responder con bastante rapidez para transmitir las ondas eléctricas de, por lo menos, 15.000 Hz y es un echo experimental que no trasmite la onda del estímulo. La transmisión telefónica de un estímulo sonoro duplicado o analógico era insostenible pero el concepto de la transmisión en código a lo largo del nervio auditivo ha subsistido en la teoría moderna. En principio, la teoría del teléfono ha sido rechazada por la mayoría de los investigadores de la acústica. La teoría simplemente se ocupa del problema central de la audición desde el oído hasta el cerebro y no explica al ley de la acústica de OHM.

- Mecánica coclear de Bekesy. Georg Von Bekesy estableció que la membrana basilar entera vibra y da un efecto de resonancia. La investigación ha demostrado que el sonido de frecuencias medias y altas producen ondas viajeras a lo largo de la membrana basilar no periodos máximos en lugares diferentes; un fenómeno de pseudo frecuencia, por lo anterior recibió el premio novel en 1961.

Bekesy empezó su trabajo experimental con un modelo coclear mecánico, basado en ecuaciones sin dimensión independientes del tamaño absoluto de las cócleas vivas, técnica semejante a la que utilizan los ingenieros náuticos

que predice la conducta del barco a partir de modelos experimentales. La cóclea artificial estaba desenrollada para simplificar su forma en espira no esencial, se acanalo un tubo de latón con un extremo cerrado que representaba a la membrana basilar, el extremo ancho el helicotrema y se le lleno con agua que representaba a la perilinfa; Bekesy había extraído una gota de perilinfa de un oído humano y en experimentos de caída libre había determinado su viscosidad casi idéntica a la del agua. Un pistón, que representaba al estribo, era movido por medio de un diapasón eléctrico para duplicar el movimiento de onda senoidal, que sé hacia vibrar contra una membrana que representaba la ventana oval, adapta al extremo abierto del tubo para generar ondas de presión hidráulica dentro del tubo.

Cuando Bekesy coloco el antebrazo a lo largo de la tira de plástico. Sintió levantarse una vibración en un lugar único a lo largo de la tira; el lugar dependía de la frecuencia del diapasón; las frecuencias altas movían la elevación hacia el extremo cerrado del tubo.

Cuando el diapasón vibraba para generar ondas de presión hidráulica, el polvo descendía hacia la lamina intercalada desde el estribo hasta el helicotrema reflejando así una onda viajera a lo largo de la membrana basilar en dirección hacia fuera. Poco después se detuvo el movimiento del polvo y la perilinfa pareció estar en reposo, con excepción de dos remolinos o vórtices en miniatura en un lugar específico que dependía de la frecuencia de las vibraciones del músculo del estribo. Los vórtices se localizaban hacia el estribo en las frecuencias bajas y hacia el helicotrema en las frecuencias altas.

El examen microscópico de otro más semejante a la cóclea, reveló las propiedades de las ondas viajeras inducidas en la membrana basilar por ondas de presión hidráulica en la perilinfa. La membrana basilar entera vibraba en forma de eventos ondulares sucesivos. La amplitud máxima de las ondas

tenían importancia crítica; los sonidos de frecuencia alta producían ondas de amplitud máxima hacia el estribo y los de frecuencia baja producían ondas de amplitud máxima hacia el helicotrema. El lugar de la amplitud máxima, circundando por remolinos, determinaba el LUGAR, (la célula) a lo largo de la membrana basilar encargado de las señales enviadas a lo largo del nervio coclear. Cuando Bekesy colocó el antebrazo a lo largo de la lámina intercalada de plástico de su primer modelo para sentir el punto de presión que se movía con el cambio de frecuencia, el punto de presión fue el punto de amplitud máxima.

Bekesy hizo observaciones directas de las ondas que viajan a lo largo de la membrana basilar en el hombre. Desarrollando una técnica que emplea instrumentos quirúrgicos en miniatura, extrajo el oído interno de un cadáver fresco con un taladro circular hueco, dejó al descubierto la cóclea al cortar el hueso circundante, simuló el movimiento del estribo haciendo vibrar la ventana oval con una rueda electromagnética, y observó la membrana basilar a través de un microscopio calibrado. Un estímulo de forma de ondas senoidal produjo, de hecho, una sensación de ondas que descendían hacia la membrana basilar. Cuando el estímulo estaba por encima de 28 Hz, la membrana vibraba uniformemente a lo largo de su longitud. Cuando el estímulo estaba por encima de 28 Hz, la onda viajera se elevaba a la amplitud máxima en un lugar específico a lo largo de la membrana: las frecuencias bajas cerca del helicotrema y las frecuencias altas cerca del estribo, tal como lo habían predicho sus modelos.

- Pruebas de localización de la frecuencia coclear. Muchas investigaciones realizadas con animales, sostiene que los tonos puros altos dañan los lugares cocleares basales y los tonos de frecuencia media dañaron los lugares cocleares apicales. La cóclea es un verdadero transductor. Aunque su mecánica fue explicada por el modelo de ondas viajeras de Bekesy y

confirmada en parte por la evidencia de la localización de frecuencias en la membrana basilar, la capacidad traductora de la cóclea y la conversión de las ondas viajeras de Bekesy en los potenciales electrónicos enviados al cerebro, sigue siendo un enigma. Por esto, la actividad eléctrica de la cóclea ha sido estudiada de modo intensivo.

- **Electrofisiología del sistema auditivo.** En 1930 Ernest Gleen Weber y Charles W. Bray llevaron a cabo una investigación que pareció confirmar la teoría del teléfono de Rutherford; Weber y Bray declararon que el experimento fue planeado para encontrar la respuesta a ciertas preguntas fundamentales de la teoría auditiva, a través de la determinación de la relación que existe entre la frecuencia y la intensidad del sonido que perturba al oído, y el carácter de la respuesta del nervio auditivo. Se utilizó un gato como animal experimental, se le abrió el cráneo lo suficiente para tener acceso al nervio auditivo derecho. Se colocó un electrodo alrededor del nervio y un segundo electrodo en otra parte del cuerpo. Un cable forrado de 18.3 m de longitud conducía las corrientes recibidas hasta un amplificador de tubos de vacío situado en un cuarto a prueba de ruidos y, después de la amplificación, llegaba a un rector telefónico.

Se estimuló el oído del animal y los impulsos nerviosos resultantes fueron apreciados como sonidos por un observador que escuchaba al receptor en el cuarto de prueba de ruidos.

Los estímulos sonoros aplicados al oído del animal produjeron en el nervio auditivo corrientes de acción de frecuencias que correspondían a las de las ondas sonoras. Después de la amplificación estas corrientes de acción se oyeron en el receptor como sonidos, hasta donde el observador pudo determinarlo, idénticos al estímulo original. Las palabras fueron transmitidas con gran fidelidad ordenes simples, conteos, etc., se oyeron con facilidad. Realmente, en buenas condiciones, este sistema fue empleado como medio de

comunicación entre cuartos de operaciones y cuatros a prueba de ruidos. En vista de trabajos recientes con otros nervios sensoriales, estos resultados fueron inesperados. Las terminaciones nerviosas de la presión, el dolor y la visión han demostrado siempre que la frecuencia de los impulsos nerviosos está correlacionada con la intensidad de la estimulación. Aquí por lo contrario, hemos encontrado que la frecuencia del impulso está correlacionada con la frecuencia de estimulación.

Este presunto hallazgo de que el estímulo se transmite en forma de ondas a lo largo del nervio auditivo llamado efecto Weber –Bray exigía demasiadas cosas al nervio auditivo: ahora se sabe que no ocurre tal cosa.

La frecuencia superior de la descarga es limitada. Un nervio no emitirá una descarga a menos que el estímulo esté por encima de una intensidad mínima denominada umbral. Cuando se aplica continuamente el estímulo umbral, el nervio emite la descarga una vez. No se observan descargas posteriores durante el periodo refractario absoluto, (o tiempo de recuperación para cualquier estímulo de cualquier intensidad).

Weber y Bray decían que el nervio auditivo emitía una descarga a los 5000 Hz, pero se ha visto que otros nervios emiten una descarga a frecuencias no mayores de 1000 Hz. Weber y Bray resolvieron este problema imaginándose el principio de la salva de la descarga nerviosa. Según esta teoría, no todas las fibras del nervio auditivo emiten la descarga simultáneamente sino en salvas sucesivas; el primer grupo de fibras dispara y descansa, luego dispara y descansa un segundo grupo; después un tercero, y así sucesivamente hasta que el primer grupo, habiendo descansado durante el periodo refractario, dispara de nuevo y se repite una y otra vez la secuencia de descargas sucesivas. Weber y Bray compararon el principio de la ráfaga o salva a un tambor con dos baquetas. Cuando el tambor golpea con las dos baquetas

sincronizadamente, la frecuencia de sus redobles es limitada; sin embargo, cuando alterna sus golpes para producir andanadas o ráfagas, de tal modo que un brazo descansa mientras el otro descarga, se duplica la frecuencia de su redoble. El principio de la ráfaga no explica el efecto Weber – Bray (explicación conjetural de la microfonía coclear), pero puede explicar otros fenómenos de conducción nerviosa.

Dado a lo anterior se podría concluir entonces que las señales que se obtenían en la experiencia de weber y Bray, en realidad no provenían del nervio auditivo como pensaron, sino de la propia cóclea. Fue E.D. Adrián quien hizo este descubrimiento y estableció que no hubo dificultad para reproducir el efecto, pero es casi seguro de que las descargas nerviosas se generan en la cóclea y no se deben a impulsos nerviosos. Los efectos se obtienen con electrodos colocados tan lejos del nervio que los potenciales de acción usuales tendrían pocas posibilidades de alcanzarlos, y estos no son alterados por condiciones que estorban seriamente la conducción nerviosa. El efecto no se debe a algún tipo de microfonía en el oído interno. Estas ondas eléctricas que se originan en la cóclea se denominan microfonía coclear y se demuestra fácilmente.

Investigadores en psicoacústica estudiaron las microfonías cocleares y sus propiedades:

- a) Las microfonías cocleares se registran con un electrodo sensible que se coloca en la vecindad del oído y un electrodo indiferente en la parte posterior del cuello. Las microfonías máximas emergen con el electrodo de registro en la ventana redonda, la ventana oval, el conducto auditivo interno, la cubierta ósea de la cóclea y, por su puesto, el nervio auditivo.
- b) La forma de onda de la microfonía coclear en la ventana redonda es casi idéntica a la del estímulo sonoro.

- c) Las microfónías cocleares son generadas por mecanismos biofísicos (y no neurológicos) dentro de la cóclea. Las microfónías aparecen después de haber extraído la membrana timpánica y /o los huesillos cuando el sonido estimula la ventana oval por conducción ósea. Las microfónías aparecen también después de seccionar el nervio auditivo (dejando intacto el aporte sanguíneo), y continúan por varias horas después de la muerte. La energía microfónica es casi equivalente a la energía sonora que llega a la ventana oval, lo cual sugiere una transformación y no una descarga nerviosa de energía.
- d) Las microfónías cocleares no tienen latencia (el tiempo que transcurre entre la estimulación sonora y la aparición de la respuesta, tal como las fibras nerviosas) ni umbral (no requieren de un estímulo sonoro mínimo para emitir la respuesta, como las fibras nerviosas).
- e) Las microfónías cocleares tienen polaridad opuesta en las ventanas oval y redonda; los picos en la ventana redonda corresponden a los valles en la ventana oval. Por lo tanto, el transductor microfónico debe estar sobre o junto a la membrana basilar.
- f) La intensidad de la microfónía coclear es más o menos proporcional a la presión del estímulo sonoro. Weber y Lawrence demostraron esta relación para un tono puro de 1000 Hz.
- g) Las microfónías cocleares están relacionadas con las ondas viajeras basilares, son generadas desde la cóclea, como lo predijo el modelo de Bekesy.

2.3.3 Evaluación Subjetiva del Sonido y del Ruido

- Intensidad subjetiva de tonos puros (SONORIDAD). La escala de fonos permite principalmente, para los tonos puros, objetivar las diferencias de percepción de intensidad en relación con la frecuencia. Un tono puro de 60 fonos produce la misma impresión de intensidad cualquiera que sea su frecuencia. Sin embargo, esta escala no nos permite establecer en que proporción es más intenso un sonido que otro, aun de la misma frecuencia, según lo juzga el oído.

La generación voluntaria de los sonidos y la reducción de ruido están supeditadas a la impresión subjetiva que producen estas ondas, y las relaciones de intensidad juegan en esto un papel importante. Por lo anterior, es necesaria una escala que nos permita expresar en forma directa las intensidades relativas aparentes. Ignorando las propiedades del sistema auditivo esta escala parecería corresponder a relaciones reales de intensidad.

Evidentemente, la escala de fonos tiene propiedades similares a la escala de decibeles y no puede manejarse de otra forma. Una duplicación de la cantidad de fonos no corresponde a una duplicación de la intensidad subjetiva. empíricamente se ha comprobado que un incremento de 10 fonos corresponde a una duplicación de la sonoridad.

Con sólo esta evidencia se puede construir una escala de intensidades aparentes o sonoridades, fijamos además un punto de referencia o unidad. Dicha escala se basa en una unidad de intensidad subjetiva o sonoridad denominada SONO que corresponde a un nivel de sonoridad de 40 fonos. Así, a 50 fonos corresponderán 2 sonos, a 30 fonos corresponderán 0.5 sonos, etc.

- Tono y sonoridad. Existe, como ya se indicó antes, una cierta dependencia entre la sonoridad y el tono percibido. Cuando la intensidad física de un sonido

puro aumenta, el tono percibido puede aumentar o disminuir dependiendo de la frecuencia física. Se encuentra experimentalmente que para un aumento de la intensidad física: El tono percibido decrece para todas las frecuencias por debajo de 1,000 Hz, el tono resulta independiente de la intensidad física para frecuencias entre 1,000 Hz y 3,000 Hz y el tono percibido se eleva para frecuencias por arriba de 4,000 Hz. Esto sólo es válido para tonos puros ya que para sonidos complejos como la música los resultados son diferentes.

- Análisis en frecuencia. Frecuentemente la lectura de energía total de un sonido efectuada con un medidor de nivel, no es suficiente como es el caso de la lectura del SPL o cualquiera de las medidas en las escalas de ponderación A, B, C y D cuando tenemos dos sonidos producidos por diferentes fuentes acústicas, las cuales dan un mismo nivel de presión sonora en dB ya sea en una escala lineal o en su escala C, donde subjetivamente una de estas dos fuentes puede resultar más indeseable que la otra.

Este hecho se presenta cuando se mide el ruido producido por una sierra circular y el ruido producido por un ferrocarril con la escala de ponderación A del medidor de sonido. Así se observa que la lectura del ruido del ferrocarril resulta más baja, y se puede predecir en forma correcta que la mayor parte de su energía se encuentra en las bajas frecuencias para las cuales el oído es muy sensible. En el caso del ruido producido por una sierra circular, la energía estará concentrada en las altas frecuencias.

Sin embargo, el sonido debe analizarse con detalle desde el punto de vista de sus consideraciones mecánicas, como es el caso de la indeseabilidad, molestias o daños potenciales a la audibilidad. En tales casos se requiere llevar a cabo un examen de distribución de la intensidad en el espectro de frecuencias. El procedimiento de medición de la presión sonora en diferentes partes del espectro de frecuencias se conoce como “análisis de frecuencias”.

- Molestia auditiva. Haciendo referencia a la definición dada por Borsky: “ la molestia es un sentimiento de insatisfacción asociado a un medio ambiente o labor realizada, la cual afecta adversamente a un individuo” se puede considerar esta como un punto de vista analítico enfocando la atención a ese medio ambiente singular como es el ruido, el cual debe reconocerse en la vida real como un agente ambiental muy complejo que produce gran tensión (stress).

La respuesta a la molestia está determinada tanto por la exposición física como por las variables psicosociales, las cuales deben controlarse o medirse en estudios experimentales de la molestia producida por el ruido. Por lo tanto, la molestia puede incluir no solamente las características físicas del ruido, sino también variables psicosociales manifiestas en la actividad y las influencias ambientales del observador.

Se puede decir que la molestia esta determinada por los siguientes parámetros:

Molestia = Tiempo de exposición + respuesta psicológica + ruido percibido

Puesto que no existe un método objetivo para medir la molestia como tal, es posible obtener alguna indicación de la molestia preguntando a un número suficiente de personas sobre sus reacciones a este.

2.3.4 Curvas de ponderación. Respuesta relativa para los medidores de nivel sonoro

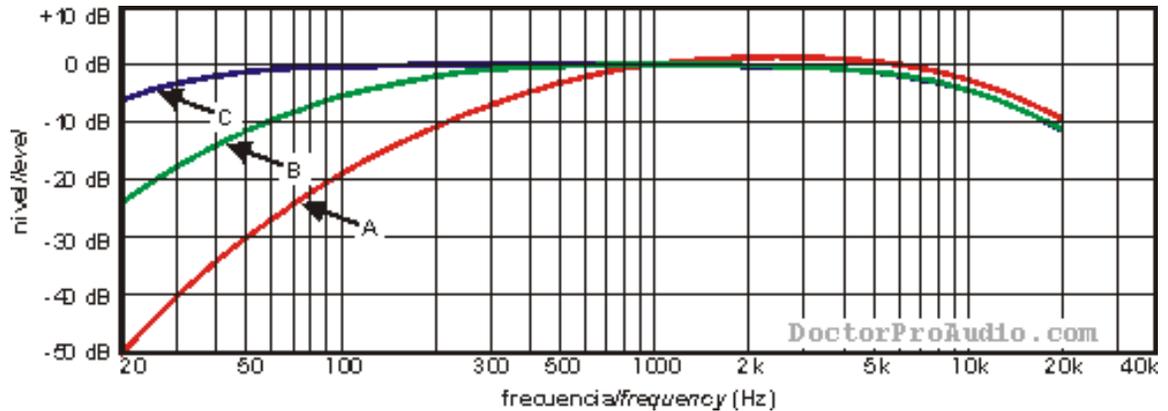


Figura 3. Redes de Ponderación.

Fuente: http://www.doctorproaudio.com/doctor/temas/ref_abc-weightings.htm

- Nivel A. El nivel de presión sonora con ponderación A o nivel A es el N.P.S. obtenido filtrando el ruido con una red de ponderación que reduce cuantitativamente los efectos del ruido de bajas frecuencias para lograr una mayor aproximación a la respuesta del oído humano.

El nivel A se mide en dB con un sonómetro normalizado que contenga la malla o red de ponderación A.

El nivel A es de uso internacional y tiene como propósito proveer una medida simple que se correlacione mejor con la fijación humana de la sonoridad o ruidosidad de muchos tipos de sonidos.

El nivel se emplea actualmente como un número simple para la valoración del ruido industrial, ruido de aviones y nivel de sonido de tráfico.

Debido a que el SPL total no se correlaciona bien con la fijación humana de la sonoridad de un ruido, la red de ponderación A se adiciona a los sonómetros para atenuar los ruidos de bajas frecuencias de acuerdo con los contornos de ISO - sonoridad.

El nivel A está dado por la respuesta subjetiva de personas a quienes molesta un determinado tipo de ruido, esta característica con respecto a redes no ponderadas de niveles de presión sonora en el pronóstico de la respuesta humana al ruido ha hecho de ésta una medida ampliamente usada.

El nivel A puede determinarse empleando un sonómetro que contenga la red de ponderación A, pero también puede calcularse mediante la aplicación de los valores de ponderación A respecto a octavas ó 1/3 de octava, medidas sobre las bandas de frecuencia y sumando las bandas o las bases de las presiones a la tabla referida (anexo 5), también como la suma de las energías.

- Nivel B. El nivel de presión sonora de ponderación B ó nivel B es el SPL el cuál ha sido filtrado o ponderado cuantitativamente para reducir el efecto de ruido de baja frecuencia.

El Nivel B se mide en dB con un sonómetro normalizado que contenga la red de ponderación.

Actualmente la ponderación B tiene uso restringido debido a la gran popularidad del nivel A para todos los niveles de sonido.

El nivel B puede determinarse empleando un sonómetro normalizado, pero también puede estimarse mediante la aplicación de los valores de ponderación dados en el anexo5, las medidas en bandas de octava, 1/2 y 1/3 de octava y sumado las bandas en base al cuadrado de la presión (o suma de las energías).

- Nivel C. El SPL con ponderación C o nivel C es el SPL, cuando ha sido filtrado para reducir el efecto de ruido de bajas frecuencias según la curva de ponderación C.

El nivel C se diseñó originalmente para efectuar medidas que se correlacionarán con la sonoridad de ruidos por arriba de 85 dB. Actualmente el nivel C y el nivel total de presión sonora SPL, son usados como sinónimos. Sin embargo el nivel C tiene algunos factores de ponderación sobre los finales de las altas y principios que de bajas frecuencias, pero aun así provee una aproximación para el nivel de presión absoluta de los sonidos más comunes.

El nivel C puede determinarse empleado un sonómetro normalizado según la curva de ponderación C de la figura 3, o bien puede estimarse cuantitativamente mediante la aplicación de valores de ponderación del anexo 5, a los valores de los niveles medidos en bandas de 1, 1/2 o 1/3 de octava. Normalmente se observa que la suma de las energías es casi igual a los valores obtenidos sin la red de ponderación C puesto que las diferencias de correlación son relativamente pequeñas.

- Nivel D. El nivel de presión sonora con ponderación D o simplemente D, es el nivel de presión sonora que ha sido filtrado reduciendo el efecto del ruido de baja frecuencia e incrementando el efecto del ruido de altas frecuencias.

El nivel D se mide en dB con un sonómetro normalizado según la curva de ponderación D ilustrado en la figura 3.

El nivel D es similar al nivel A en lo que respecta a la atenuación en bajas frecuencias de una manera aproximada de acuerdo a la respuesta del oído humano. Sin embargo, el nivel D se diseñó para relacionar a la ruidosidad

relativa en todo el espectro de banda, mientras que el nivel A fue diseñado para ser referido a la sonoridad.

La red de ponderación D da una respuesta en frecuencia inversa a la del contorno de 40 noys o igual al ruido percibido.

El nivel D puede determinarse empleando un sonómetro normalizado que contenga la red de ponderación D o bien considerando la ponderación D dada en el anexo 5, aplicada a los niveles de bandas de 1, $\frac{1}{2}$ ó $\frac{1}{3}$ de octava.

3. METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque del proyecto es empírico-analítico, cuyo interés es técnico, orientado a la interpretación y transformación del mundo material.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA

El tipo de investigación que se realiza es teórico-práctica, ya que se debe recopilar información de fuentes primarias y secundarias para poder diseñar el algoritmo de compensación de mediciones de presión sonora basado en las curvas isofónicas. La línea de investigación es la Acústica, pues el presente proyecto se basa en antecedentes teóricos basados en la audición humana.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

- Software Visual Fox Pro, para la implementación del algoritmo basado en las curvas Isofónicas.
- Sonómetro RION NA-27 para realizar mediciones en Nivel continuo Equivalente y Ponderación A.

3.4 HIPÓTESIS

Los resultados de Nivel de Presión Sonora obtenidos con las ponderaciones utilizadas actualmente (A, C y D) no arrojan valores confiables en cuanto a riesgos de pérdida auditiva y niveles de molestia subjetivos, mientras que el sistema que se implementará arrojará valores confiables en estos aspectos.

3.5 VARIABLES

3.5.1 Variables Independientes

- Curvas de Ponderación existentes y utilizadas actualmente que realizan compensaciones erradas en la mayoría de los casos de nivel y frecuencia.
- Curvas isofónicas o de igual sonoridad.

3.5.2 Variables Dependientes

- Realización de las pruebas subjetivas para obtener valores reales de riesgo de pérdida auditiva y molestia subjetiva.

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El resultado final de este trabajo es un algoritmo elaborado en el programa Visual Fox Pro.

El programa consta de las siguientes ventanas:

4.1 VENTANA DE BIENVENIDA AL SISTEMA

En la ventana de bienvenida aparece el nombre del sistema y el de los autores del trabajo. Para ingresar a la siguiente ventana es necesario ubicar el cursor sobre la frase “Haga click aquí para continuar” y ejecutar la orden.



Figura 4 Ventana de bienvenida Sistema SAF

4.2 VENTANA DE INGRESO AL SISTEMA

Para que el usuario pueda acceder al programa completo, debe insertar en los campos vacíos un nombre de usuario y una clave, impuestos con el fin de proporcionar seguridad en cuanto a la divulgación indebida del programa. Después de ingresar el nombre de usuario y la contraseña, se debe pulsar la tecla “ENTER” para que aparezca el mensaje de bienvenida y se pueda pasar a la siguiente ventana. En este cuadro existe la opción de “Salir”, por si el usuario desea abandonar la sesión.

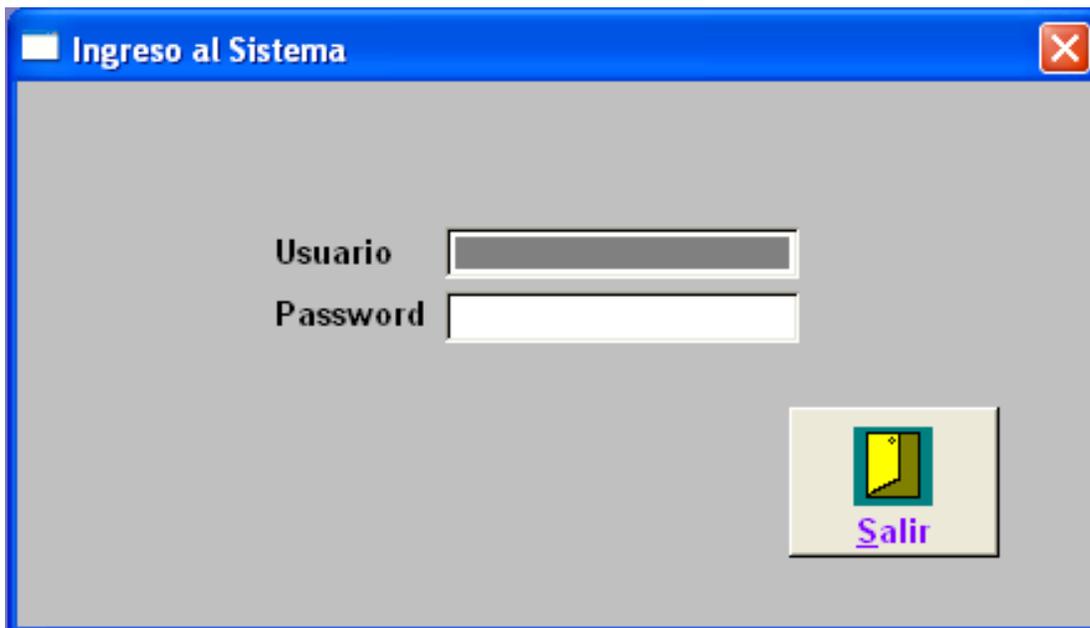


Figura 5 Ventana de ingreso. Sistema SAF

4.3 VENTANA DE SELECCIÓN

En esta ventana aparecen tres botones de selección:

Ingreso de datos y compensación. Al hacer click sobre este botón, aparece la ventana en la que se ingresan los valores en decibeles lineales, se muestran los valores de sonoridad obtenidos mediante el método de Stevens (Mark VII) y se muestran los valores obtenidos después de realizar la compensación, que asemeja la medición a la percepción humana (Sistema SAF).

Tabla comparativa. Al hacer click sobre este otro, aparece una ventana que contiene una tabla comparativa entre los niveles lineales, la ponderación A y los valores obtenidos con el sistema diseñado. Adicionalmente, se presentan los niveles totales (equivalentes) resultantes de la suma de cada columna. Con esto se observa una clara diferencia numérica en los tres casos (Nivel lineal, ponderación A y sistema SAF)

Salir. Si escoge este botón, se cierra la ventana de trabajo del programa.

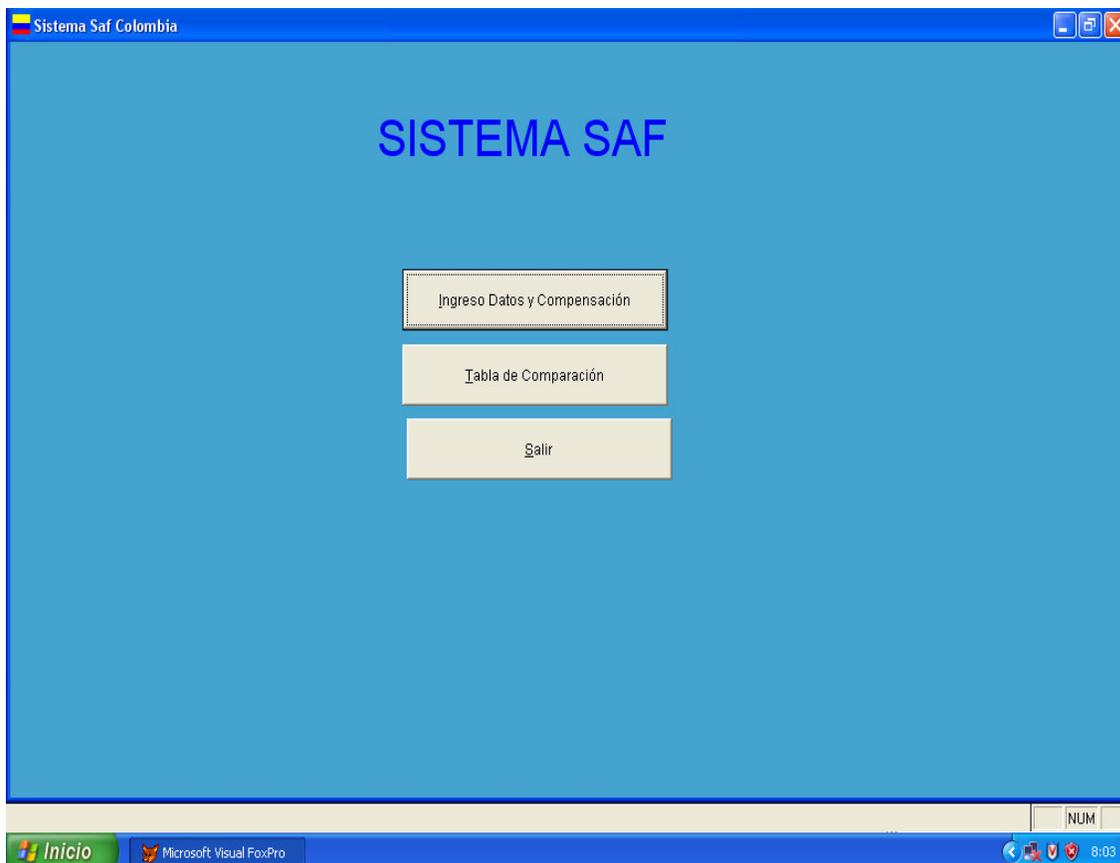


Figura 6 Ventana de selección Sistema SAF

4.4 VENTANA DE INGRESO DE DATOS Y COMPENSACIÓN

En esta ventana aparece, en la parte de arriba, un cuadro en el que se visualizan las bandas de frecuencia útiles en el proyecto (31.5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz y 8000 Hz). Debajo de estos valores se encuentra una fila

de pequeñas cajas en blanco, en las que el usuario deberá ingresar los valores en decibelios lineales por banda de frecuencia que desea compensar. El rango de los valores está entre 20 y 125, debido a que los valores de nivel que presenta Stevens en su trabajo (Mark VII), están especificados en el mismo rango. Para obtener los resultados de la compensación, el usuario debe hacer click en el botón “Ejecutar” y automáticamente aparecerán los resultados del índice de sonoridad por banda de frecuencia y total, el valor máximo de sonoridad, el nivel compuesto de sonoridad y el valor en fones (los anteriores basados en Mark VII), y los valores obtenidos en el sistema diseñado (Sistema SAF). Para obtener los mismos resultados con diferentes valores en niveles lineales, el usuario debe hacer click en el botón “Otro” y automáticamente aparecen las casillas en blanco. Para salir de la ventana de ingreso de datos y compensación, se hace click en el botón “Terminar”.

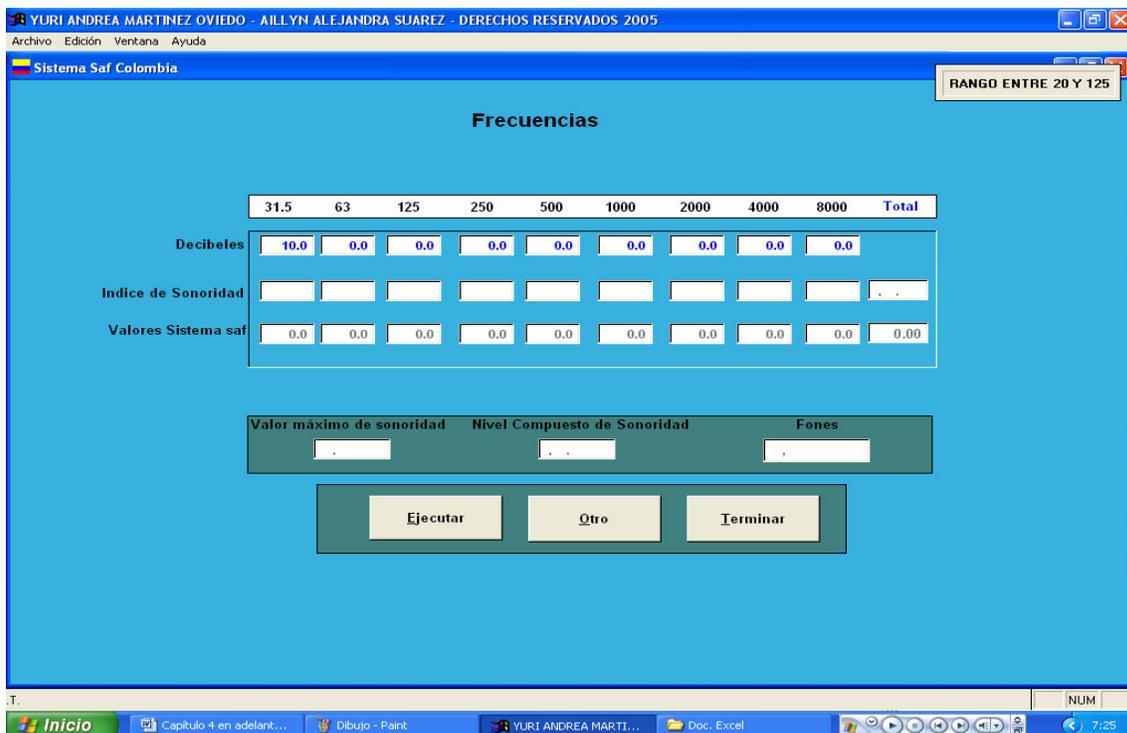


Figura 7 Ventana de ingreso de datos y compensación Sistema SAF

4.5 VENTANA DE TABLA COMPARATIVA

En esta ventana, aparece una tabla que realiza la comparación de los valores ingresados previamente en la ventana de ingreso de datos y compensación, con los valores que resultan haciendo la compensación con ponderación A y con los valores en nivel lineal (los datos aparecen automáticamente). Para visualizar los resultados totales, es decir la sumatoria de cada una de las columnas (valores flat, valores en ponderación A y valores sistema SAF), el usuario debe hacer click en el botón “Totales”.

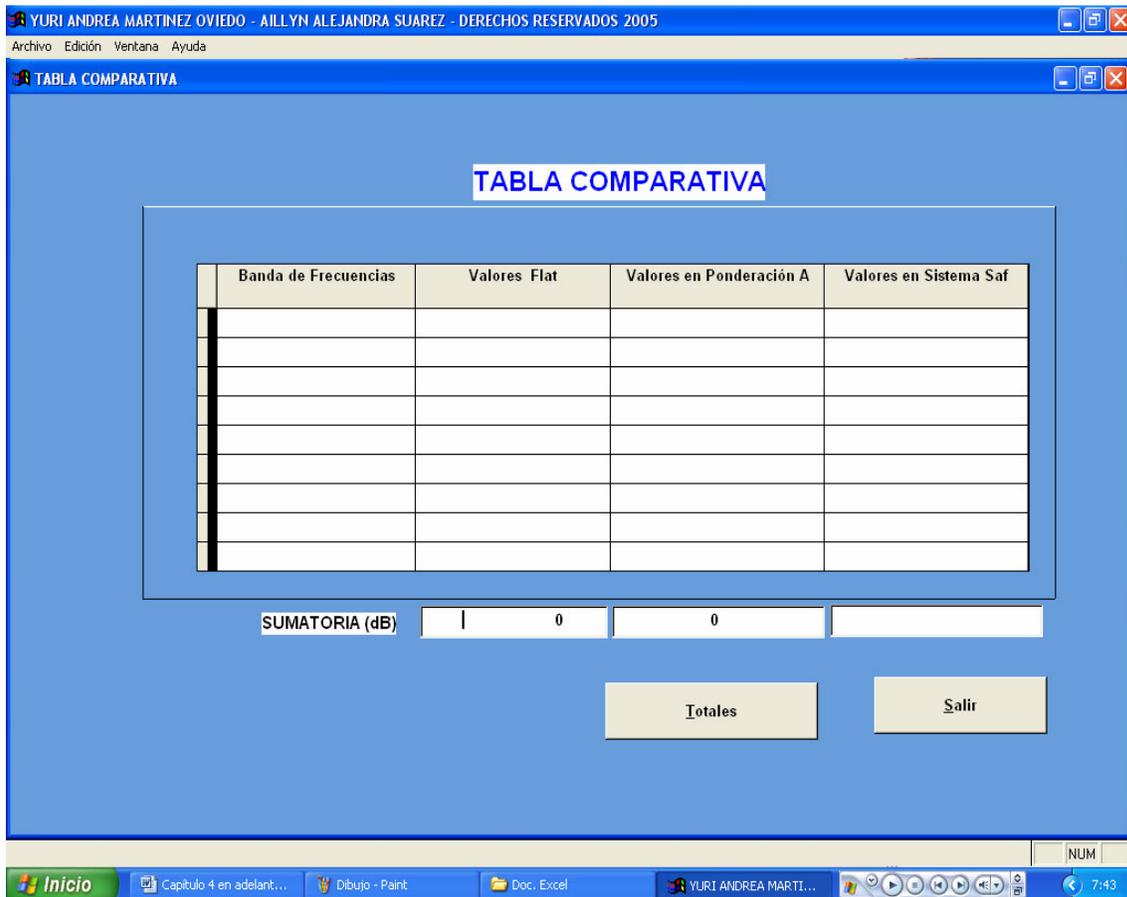


Figura 8 Ventana de tabla comparativa Sistema SAF

4.6 EJEMPLO DE CÁLCULO

Una vez identificadas las ventanas del sistema SAF, se demostrará su funcionamiento a través de un ejemplo práctico, donde se deben calcular por medio de este sistema, los siguientes valores en decibeles lineales:

Banda de frecuencia (Hz)	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Valores lineales (dB flat)	23	50	56	98	46	49	52	56	60

Inicialmente, se ingresan los valores en las casillas de la ventana de “Ingreso de Datos y Compensación” y a continuación se hace click en “Ejecutar”.

The screenshot shows the 'Sistema Saf Colombia' application window. The main area is titled 'Frecuencias' and contains a table with the following data:

	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Total
Decibeles	23.0	50.0	56.0	98.0	46.0	49.0	52.0	56.0	60.0	
Indice de Sonoridad	0.00	0.62	1.82	38.00	1.75	2.53	3.60	5.50	8.30	62.12
Valores Sistema saf	5.0	41.5	54.0	100.3	49.0	49.0	57.0	67.1	54.3	477.35

Below the table, there are three input fields for summary values:

Valor máximo de sonoridad	Nivel Compuesto de Sonoridad	Fones
38.00	45.23	95

At the bottom of the window, there are three buttons: 'Ejecutar', 'Otro', and 'Terminar'.

Figura 9 Ventana de ingreso de datos y compensación Sistema SAF

Los resultados son los siguientes:

Índices de sonoridad:

31.5 Hz: 0

63 Hz: 0.62

125 Hz: 1.82

250 Hz: 38

500 Hz: 1.75

1000 Hz: 2.53

2000 Hz: 3.60

4000 Hz: 5.5

8000 Hz: 8.3

Total: 62.12

Valor máximo de sonoridad: 38

Nivel compuesto de sonoridad: 45.23

Nivel en fones: 95

Valores sistema SAF:

31.5 Hz: 5

63 Hz: 41.5

125 Hz: 54

250 Hz: 100.3

500 Hz: 49

1000 Hz: 49

2000 Hz: 57

4000 Hz: 67.1

8000 Hz: 54.3

Total: 477 (suma aritmética tradicional)

Para visualizar la comparación de los valores, se ingresa a la ventana “Tabla Comparativa” y se hace click en el botón “Totales”, para obtener la suma en decibeles de cada columna.

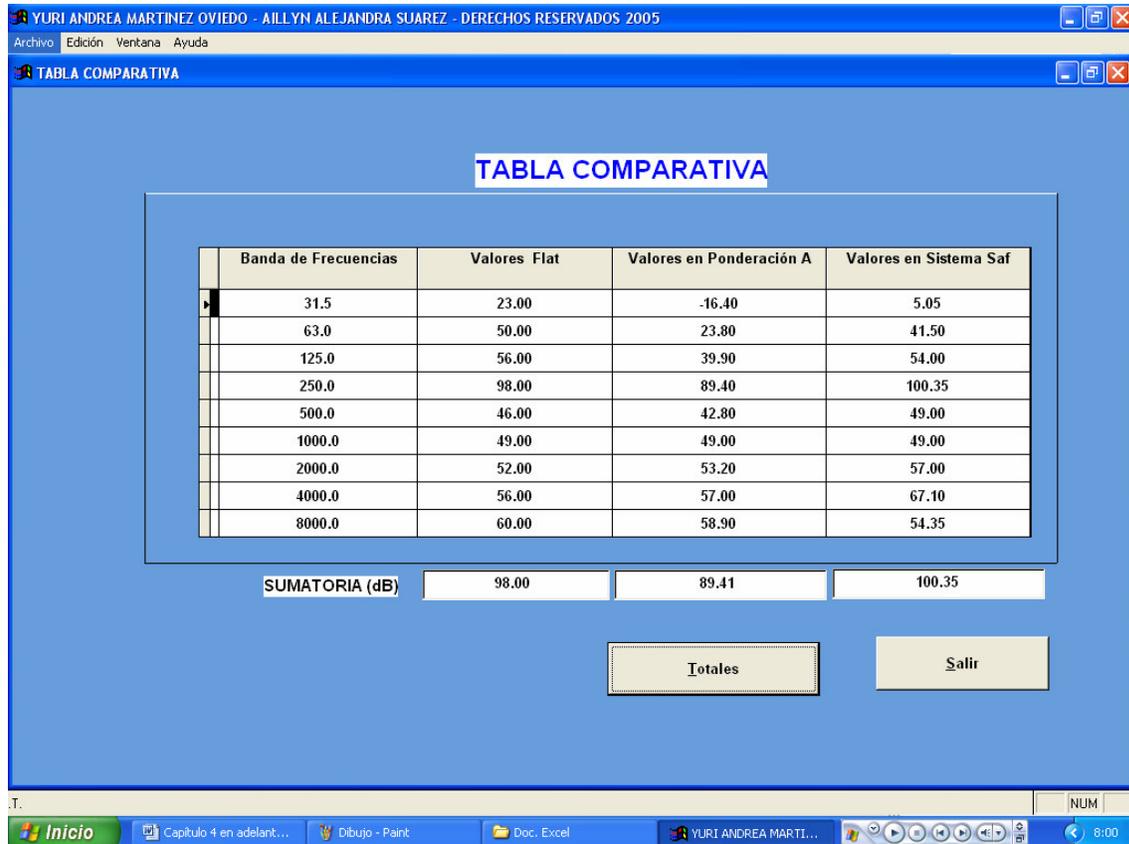


Figura 10 Ventana de tabla comparativa Sistema SAF

Los resultados obtenidos son:

Banda de frecuencia (Hz)	Valores Flat (dB flat)	Valores en ponderación A (dB A)	Valores en sistema SAF (dB SAF)
31.5	23	-16.4	5.05
63	50	23.8	41.5
125	56	39.9	54
250	98	89.4	100.35
500	46	42.8	49
1000	49	49	49
2000	52	53.2	57
4000	56	57	67.1
8000	60	58.9	54.35
TOTALES	98	84.41	100.35

Tabla 4. Resultados ejemplo de cálculo sistema SAF

Se puede observar, de acuerdo con los resultados obtenidos en el ejemplo anterior, la gran diferencia que existe entre la ponderación A y el sistema diseñado (aproximadamente 16 decibeles), que acústicamente hablando son muy representativos. El sistema diseñado presenta la compensación correcta de acuerdo a las curvas isofónicas. La ponderación compensa de forma incorrecta las mediciones de Nivel de Presión Sonora.

Existe una diferencia representativa entre la ponderación A (red de compensación más utilizada) y el sistema diseñado (SAF). La ponderación A realiza una compensación igual para todos los valores frecuencia sin tener en cuenta el Nivel de Presión Sonora. El sistema diseñado realiza la compensación correcta para todos los casos de nivel y frecuencia posibles en la audición humana, por esto los resultados pueden ser mayores o menores que los obtenidos con ponderación A, dependiendo del caso de nivel y frecuencia específico.

Cabe anotar que las personas deben cuidar su sistema auditivo, pues aunque existen normas internacionales de protección auditiva y de niveles sonoros peligrosos para la salud, no se cumplen a cabalidad.

4.7 DETERMINACION DE NIVELES DE MOLESTIA Y RIESGO DE PÉRDIDA AUDITIVA

Si se hace referencia a la definición dada por Borsky, el cual expresa que: La molestia es un sentimiento de insatisfacción asociado a un medio ambiente o labor realizada, la cual afecta adversamente a un individuo; se puede considerar esta como un punto de vista analítico enfocando la atención a ese medio ambiente tan singular como es el ruido, el cual debe reconocerse en la vida real como un agente ambiental muy complejo que produce gran tensión (stress).

La respuesta a la molestia está determinada tanto por la exposición física como por las variables psicosociales, las cuales deben controlarse o medirse en estudios experimentales de la molestia producida por el ruido. Por lo tanto, la molestia puede incluir no solamente las características físicas del ruido, sino también variables psicosociales manifiestas en la actitud y en las influencias ambientales del observador.

Puesto que no existe un método objetivo para medir la molestia como tal, es posible obtener alguna indicación de la molestia preguntando a un número de personas sobre sus reacciones a este. En este caso se hace una asociación de la molestia auditiva con falta de inteligibilidad. Aplicando el siguiente tipo de prueba:

Se emite la señal de audio con una lista de palabras normalizadas a 65 dB por medio de unos auriculares. Posteriormente se emiten ruidos (blanco, rosa, tránsito y maquinaria) a partir de 60 dB y se va aumentando el nivel del ruido progresivamente (5 dB con cada lista de palabras) hasta 120dB. La persona debe escribir en un papel cada lista de palabras tal y como las perciba auditivamente. De acuerdo al número de palabras mal escritas, no entendidas o no escritas, se hace el cálculo del nivel en el cual el ruido empieza a ser molesto auditivamente. Se toma como criterio de molestia el nivel en el cual hay un porcentaje de inteligibilidad menor al 80%.

Número de pruebas aplicadas: 30

Población: Personas con condiciones otológicamente normales de 25 a 35 años

Muestra: 30 personas con condiciones otológicamente normales de 25 a 35 años de la ciudad de Bogotá.

Lugar: Sala de ensayos musicales. Tratamiento acústico de absorción. Sala paralelepípeda con dimensiones: 5.80m x 4.60m x 2.5 m

Fecha: del 18 de diciembre al 10 de enero de 2006

Instrumental Utilizado:

- Computador con tarjeta integrada de sonido
- Audífonos AKG K55

- Software SpectrLAB
- Decibelímetro
- Lista de palabras
- Grabadora periodística

Calibración del instrumental:

Conexión cable de línea de la salida de línea a la entrada de línea de la tarjeta de sonido del computador. Con el software SpectrLAB opción F9 en modo real time y visualizando el espectro. Calibrador en el micrófono. Nivel del calibrador en la casilla y opción measure, posteriormente grabación de la calibración para referencia.

Condiciones de medición: Lugar seco. Temperatura aprox. 20°C. Número de personas presentes en la medición: 3

Ruidos generados:

Blanco. Fuente: SpectrLAB

Rosa. Fuente: SpectrLAB

Tráfico: Fuente: Grabación magnética de grabadora periodística realizada en la Avenida carrera 30 con calle 80 de la ciudad de Bogotá..

Maquinaria: Fuente: Grabación magnética de grabadora periodística realizada a las maquinarias utilizadas en la construcción de transmilenio de la Avenida Suba en la ciudad de Bogotá.

Lista palabras utilizadas:

Lista 1:	Parba	Pique	Porta
	Vena	Cesgo	Mina
Bastos	Mano	Dicho	Tope
Alas	Capri	Mole	Peso
Dicho	Pose	Jorge	
Mano	Sara	Turno	
Popa	Mitra	Una	Lista 5:
Sepo	Chile	Pote	
Tantos	Este	Seco	Sello
Cepo	Lata	Lupa	Loza
Verde	Mero		Conga
Trote	Hule	Lista 4:	Silo
Alas	Rabo		Tere
Conga	Lila	Peso	Lides
Parba	Farco	Paro	Soda
Chaco		Silla	Lana
Novia		Dejo	Choque
Lupa		Vara	Bello
Blando	Lista 3:	Dolo	Cerdo
Paro		Pueblo	Tasa
Pinos	Base	Dique	Bleque
Aire	Tino	Letras	Ula
	Alas	Queso	Dedos
Lista 2:	Verde	Lidia	Lloran
	Lares	Toba	Aire
Persia	Pilla	Pleno	Porte
Codo	Puesto	Tasca	Niza
Palos	Mary	Velos	Barre
Tienen	Ente	Norte	
Sosa	Nuncio	Juego	Lista 6:

	Cirio	Deca	Hipo
Bosque	Hasta	Bloque	Redes
Gales	Cepo	Bastos	Hunda
Cubo	Duque	Verso	Celta
Mide	Pinos	Dora	
Ropa	Cuando	Merma	
Yema	Senda	Conde	
Ciro	Gasa	Celos	
Rizo	Lleno	Coca	
Delta	Redes		
Cola	Palo		
Porche	Coque		
Cuadro	Porta	Lista 9:	
Pome	Lindo		
China	Novia	Preso	
Trote	Tela	Fobia	
Muda		Blando	
Lego	Lista 8:	Canje	
Misa		Moca	
Nene	Vera	Niquel	
Daños	Sonia	Cuenca	
	Popa	Desde	
	Monte	Sano	
	Quieta	Tanques	
Lista 7:	Paje	Pana	
	Cidra	Nota	
Hiato	Bodas	Mesa	
Ura	Claro	Tieso	
Chapo	Vientre	Cima	
Tresa	Alo	Era	

Resultados obtenidos

Ruido Blanco:

El nivel de molestia calculado es de 85 dB.

Número total de palabras: 600 (Lista 6 x 30 personas que hicieron la prueba)

Palabras bien escritas: 476

Palabras mal escritas: 124

Inteligibilidad de la palabra para un nivel de ruido blanco de 85 dB: 79,3%

Nivel es sistema SAF: 80.4 dBSAF

Relación Señal Ruido: 20 dB

Ruido Rosa:

El nivel de molestia calculado es de 100 dB.

Número total de palabras: 600 (Lista 9 x 30 personas que hicieron la prueba)

Palabras bien escritas: 485

Palabras mal escritas: 115

Inteligibilidad de la palabra para un nivel de ruido rosa de 100 dB: 80.8%

Nivel es sistema SAF: 93.8 dBSAF

Relación Señal Ruido: 35 dB

Ruido de Tránsito:

El nivel de molestia calculado es de 90 dB.

Número total de palabras: 600 (Lista 7 x 30 personas que hicieron la prueba)

Palabras bien escritas: 470

Palabras mal escritas: 130

Inteligibilidad de la palabra para un nivel de ruido de tránsito de 90 dB: 78.3%

Nivel es sistema SAF: 87.3 dB SAF

Relación Señal Ruido: 25 dB

Ruido de Maquinaria:

El nivel de molestia calculado es de 85 dB.

Número total de palabras: 486

Palabras bien escritas: 476

Palabras mal escritas: 124

Inteligibilidad de la palabra para un nivel de ruido de maquinaria de 85 dB: 81%

Nivel es sistema SAF: 83.8 dB SAF

Relación Señal Ruido: 20 dB

5. DESARROLLO INGENIERIL

PRIMER METODO PROPUESTO INTERPOLACION POLINOMIAL POR SEGMENTOS

Curva de cero fones:

X	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
y	56	35.5	21.5	11.5	5.5	4	0	-4.5	14

NOTA: La x representa la frecuencia y la Y el SPL

Se forman ocho intervalos:

{31.5,63}, {63,125}, {125,250}, {250,500}, {500,1000}, {1000,2000}, {2000,4000},
{4000,8000}

Se desarrolla el siguiente SPLINE

$$\begin{array}{lll} S(x) & a_1x^2 + b_1x + c_1 & \text{Si } x \in \{31.5,63\} \\ & a_2x^2 + b_2x + c_2 & \text{si } x \in \{63,125\} \\ & a_3x^2 + b_3x + c_3 & \text{si } x \in \{125,250\} \\ & a_4x^2 + b_4x + c_4 & \text{si } x \in \{250,500\} \\ & a_5x^2 + b_5x + c_5 & \text{si } x \in \{500,1000\} \\ & a_6x^2 + b_6x + c_6 & \text{si } x \in \{1000,2000\} \\ & a_7x^2 + b_7x + c_7 & \text{si } x \in \{2000,4000\} \\ & a_8x^2 + b_8x + c_8 & \text{si } x \in \{4000,8000\} \end{array}$$

Se debe cumplir que $S(31.5) = 56, \dots, S(8000) = 14$

Se forman las siguientes ecuaciones:

$$S(31.5) = 56 \quad (31.5)^2 a_1 + 31.5b_1 + c_1 = 56$$

$$S(63) = 35.5 \quad (63)^2 a_1 + 63b_1 + c_1 = 35.5$$

$$(63)^2 a_2 + 63b_2 + c_2 = 35.5$$

$$S(125) = 21.5 \quad (125)^2 a_2 + 125b_2 + c_2 = 21.5$$

$$(125)^2 a_3 + 125b_3 + c_3 = 21.5$$

$$S(250) = 11.5 \quad (250)^2 a_3 + 250b_3 + c_3 = 11.5$$

$$(250)^2 a_4 + 250b_4 + c_4 = 11.5$$

$$S(500) = 5.5 \quad (500)^2 a_4 + 500b_4 + c_4 = 5.5$$

$$(500)^2 a_5 + 500b_5 + c_5 = 5.5$$

$$S(1000) = 4 \quad (1000)^2 a_5 + 1000b_5 + c_5 = 4$$

$$(1000)^2 a_6 + 1000b_6 + c_6 = 4$$

$$S(2000) = 0 \quad (2000)^2 a_6 + 2000b_6 + c_6 = 0$$

$$(2000)^2 a_7 + 2000b_7 + c_7 = 0$$

$$S(4000) = -4.5 \quad (4000)^2 a_7 + 4000b_7 + c_7 = -4.5$$

$$(4000)^2 a_8 + 4000b_8 + c_8 = -4.5$$

$$S(8000) = 14 \quad (8000)^2 a_8 + 8000b_8 + c_8 = 14$$

Hay 16 ecuaciones y 24 incógnitas

Se necesita hacer la derivada del SPLINE para obtener más ecuaciones. Derivada de orden $K-1=1$, es decir, la primera derivada continua:

$$S'(x) \quad \begin{array}{ll} 2a_1x + b_1 & \text{si } x \in \{31.5, 63\} \\ 2a_2x + b_2 & \text{si } x \in \{63, 125\} \end{array}$$

$2a_3x + b_3$	si $x \in$	$\{125,250\}$
$2a_4x + b_4$	si $x \in$	$\{250,500\}$
$2a_5x + b_5$	si $x \in$	$\{500,1000\}$
$2a_6x + b_6$	si $x \in$	$\{1000,2000\}$
$2a_7x + b_7$	si $x \in$	$\{2000,4000\}$
$2a_8x + b_8$	si $x \in$	$\{4000,8000\}$

La derivada está formada por segmentos de rectas. Se podría presentar discontinuidad en los cambios de intervalo. Las posibles discontinuidades son $x=63$, $x=125$, $x=250$, $x=500$, $x=1000$, $x=2000$, $x=4000$

Para que $S'(x)$ sea continua se debe cumplir que:

$$2a_1(63) + b_1 = 2a_2(63) + b_2$$

$$2a_2(125) + b_2 = 2a_3(125) + b_3$$

$$2a_3(250) + b_3 = 2a_4(250) + b_4$$

$$2a_4(500) + b_4 = 2a_5(500) + b_5$$

$$2a_5(1000) + b_5 = 2a_6(1000) + b_6$$

$$2a_6(2000) + b_6 = 2a_7(2000) + b_7$$

$$2a_7(4000) + b_7 = 2a_8(4000) + b_8$$

Igualando a cero:

$$126a_1 + b_1 - 126a_2 - b_2 = 0$$

$$250a_2 + b_2 - 250a_3 - b_3 = 0$$

$$500a_3 + b_3 - 500a_4 - b_4 = 0$$

$$1000a_4 + b_4 - 1000a_5 - b_5 = 0$$

$$2000a_5 + b_5 - 2000a_6 - b_6 = 0$$

$$4000a_6 + b_6 - 4000a_7 - b_7 = 0$$

$$8000a_7 + b_7 - 8000a_8 - b_8 = 0$$

Ahora se tienen 23 ecuaciones con 23 incógnitas, esto da un grado de libertad para elegir una de las incógnitas, por conveniencia $a_1 = 0$.

Así se tienen 23 ecuaciones y 23 incógnitas. Se plantea la siguiente matriz de 23 x 23

31,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b1	56		
63	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c1	35,5	
0	0	3969	63	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a2	35,5	
0	0	15625	125	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b2	21,5	
0	0	0	0	0	15625	125	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c2	21,5	
0	0	0	0	0	62500	250	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a3	11,5	
0	0	0	0	0	0	0	0	62500	250	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b3	11,5	
0	0	0	0	0	0	0	0	250000	500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c3	5,5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	250000	500	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a4	5,5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1E+06	1000	1	0	0	0	0	0	0	b4	4	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c4	4	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000000	1000	1	0	0	0	0	0	a5	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4000000	2000	1	0	0	0	0	0	b5	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4000000	2000	1	0	0	c5	-4,5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a6	-4,5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16000000	4000	1	b6	14
1	0	-126	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c6	0	
0	0	250	1	0	-250	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a7	0	
0	0	0	0	0	500	1	0	-500	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	b7	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	1000	1	0	-1000	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	c7	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	1	0	-2000	-1	0	0	0	0	0	0	0	a8	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4000	1	0	-4000	-1	0	0	0	b8	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8000	1	0	-8000	-1	c8	0	

La matriz se intentó resolver mediante los métodos de Gauss Jordan y Choleski y el sistema no es soluble por ninguno de los dos métodos.

El método anterior se debe repetir para las 130 curvas isofónicas obteniendo 130 matrices de 23 x 23.

NO SE SELECCIONO ESTE METODO POR LAS SIGUIENTES RAZONES:

- El método sería indispensable en el caso de trabajar con tercios de octava, pues sería necesario interpolar para saber el valor exacto del SPL por cada tercio de octava en cada una de las curvas isofónicas. El trabajo se limitó a trabajar por bandas de octava de a cuerdo al trabajo de sonoridad de Stevens. Previamente se tenían los valores de SPL por banda de octava para cada una de las 130 curvas isofónicas.
- El método plantea unas matrices demasiado grandes. Es complicado que el lenguaje de programación escogido (Visual Fox Pro) haga el cálculo para cada una de las curvas isofónicas.
- Como en el caso de los cero fones, algunas de las matrices planteadas no tienen solución. Con esto faltarían datos para que el programa funcione correctamente.
- Faltarían datos para hacer la interpolación de las curvas.
- Es un procedimiento bastante largo como para ser repetido 130 veces en un programa que no lo requiere. Mediante un método matemático más sencillo se puede desarrollar exitosamente.

Por lo anterior se decidió plantear como solución para el problema el diseño de un algoritmo basado en las curvas isofónicas y el trabajo de sonoridad de Stevens (Mark VII).

Se decidió realizar el algoritmo en el lenguaje de programación de Visual Fox Pro con aprobación del tutor de fondo por los siguientes motivos:

- Visual Fox Pro ofrece una plataforma agradable para que el usuario utilice el programa.
- Visual Fox Pro tiene todas las herramientas matemáticas necesarias para la realización del programa.
- MatLAB resulta un lenguaje de programación complicado para este tipo de programa pues es necesario dar un gran número de comandos para operaciones sencillas. Visual Fox Pro resulta más sencillo en este aspecto.
- Fue más sencillo conseguir asesoría de una persona en Visual Fox Pro que en MatLAB

El programa diseñado tiene del siguiente orden:

Fase 1

- ✓ Ingreso de los valores lineales a compensar
- ✓ Cálculo del índice de sonoridad por banda de octava
- ✓ Cálculo del índice de sonoridad total
- ✓ Cálculo del nivel compuesto de sonoridad en Sones
- ✓ Conversión de Sones a Fones

Fase 2

- ✓ Interpolación de las 13 curvas isofónicas existentes, con el fin de obtener 130 curvas y de este modo conseguir exactitud al realizar la compensación, teniendo en cuenta que los niveles compuestos de sonoridad en fones no siempre son múltiplos de 10.
- ✓ Asociación de los valores que se ingresan (valores en decibelios lineales) con la curva isofónica correspondiente, de acuerdo al nivel compuesto de sonoridad en fones.
- ✓ Búsqueda de los valores correctos de compensación, por medio de la inversión de las curvas isofónicas.

- ✓ Realización de la compensación correcta, de acuerdo a cada caso particular de nivel y frecuencia.
- ✓ Comparación de los resultados obtenidos con la ponderación A.

5.1 DIAGRAMA DE BLOQUE DEL DESARROLLO DEL ALGORITMO

Fase 1

Valores en dB
flat por banda
de frecuencia

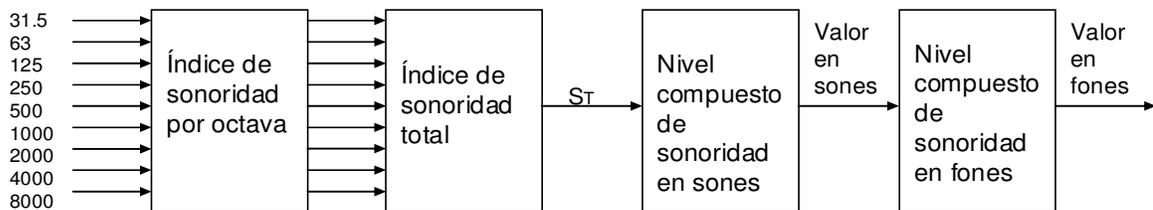


Figura 10. Diagrama de bloque primera fase sistema SAF

Fase 2

Después de hacer teórica y manualmente la inversión de las curvas y calcular los valores correctos de compensación para cada caso particular de nivel y frecuencia, se diseña la segunda fase del algoritmo así:

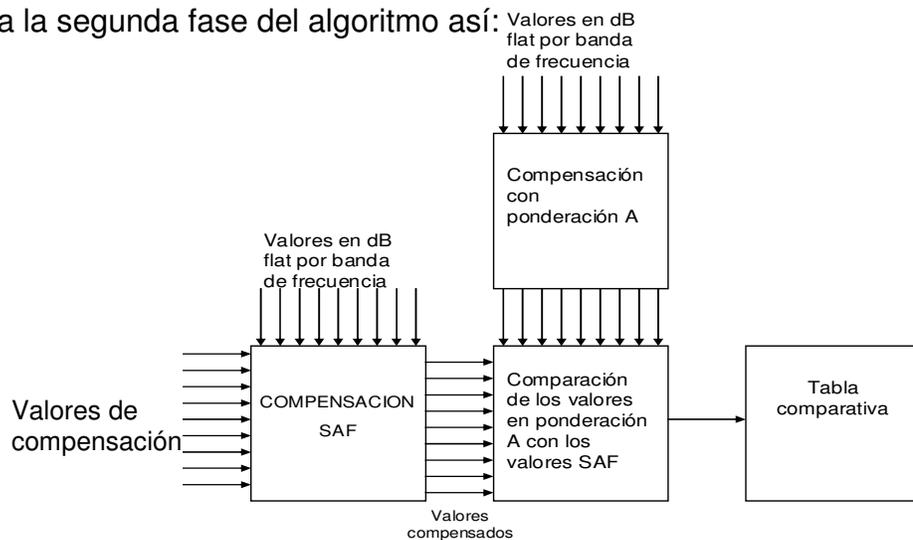


Figura 11. Diagrama de bloque segunda fase Sistema SAF

5.2 EXPLICACIÓN DE CADA UNO DE LOS PASOS DE LA FASE 1

- ✓ Ingreso de Los valores lineales a compensar

En esta sección del algoritmo, se ingresan los valores de Nivel de Presión Sonora lineales por banda de octava a compensar, provenientes de un medidor de nivel sonoro. El programa está diseñado para que el usuario los ingrese manualmente.

- ✓ Cálculo del índice de sonoridad por banda de octava

En este paso, comienza a funcionar el trabajo de Stevens (Mark VII). El nivel de sonoridad para cada banda se busca en las tablas "Band level conversion to loudness Index", (Anexo 4) diseñadas por Stevens de la siguiente manera: Se toma el Nivel de presión sonora de la primera banda de octava y se busca su valor en la primera columna (Band level dB). Se busca la columna de 13.5 Hz (primera banda de octava) y se coloca el valor que coincida horizontalmente con el número anteriormente ubicado. Se repite el procedimiento anterior para las demás bandas de frecuencia.

- ✓ Cálculo del índice de sonoridad total

Es la suma de cada uno de los índices de sonoridad por octava.

- ✓ Cálculo del nivel compuesto de sonoridad en Sones (L).

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$L = 0,7 S_{\max} + 0,3 \sum S_i$$

Ecuación 8. Cálculo del nivel compuesto de sonoridad en Phones

donde

S_{\max} = índice de sonoridad de la banda de octava más sonora

S_i = índice de sonoridad de la octava i

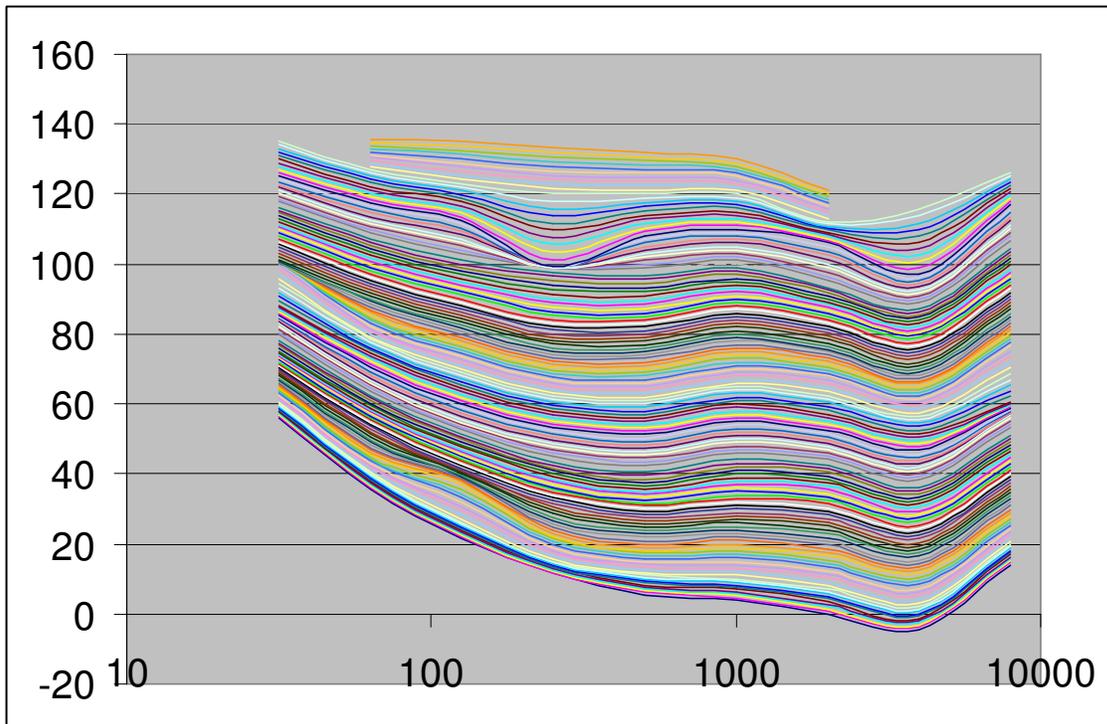
✓ Conversión de Sones a Fones

Se Ubica en la casilla “Loudness Sones” el resultado anterior y se busca en la siguiente casilla “Loudness Level Phones” el valor que coincida horizontalmente con el que se ubicó en la casilla anterior. En este paso se completa el procedimiento del Mark VII.

5.3 EXPLICACIÓN DE CADA UNO DE LOS PASOS DE LA FASE 2

✓ Interpolación de las 13 curvas isofónicas existentes

Las curvas isofónicas que se utilizan en el proyecto son 13 y van de diez en diez; es por esto que en caso de que los Fones que resultaran del anterior proceso no fueran múltiplos de diez, no se sabría que curva isofónica escoger (la superior o la inferior). Por lo tanto se decidió (como lo más acertado) hacer la interpolación de las curvas para obtener como resultado 130 curvas isofónicas. Después de la interpolación, las curvas se graficaron mediante un ajuste por segmentos. El resultado de la interpolación es el siguiente:



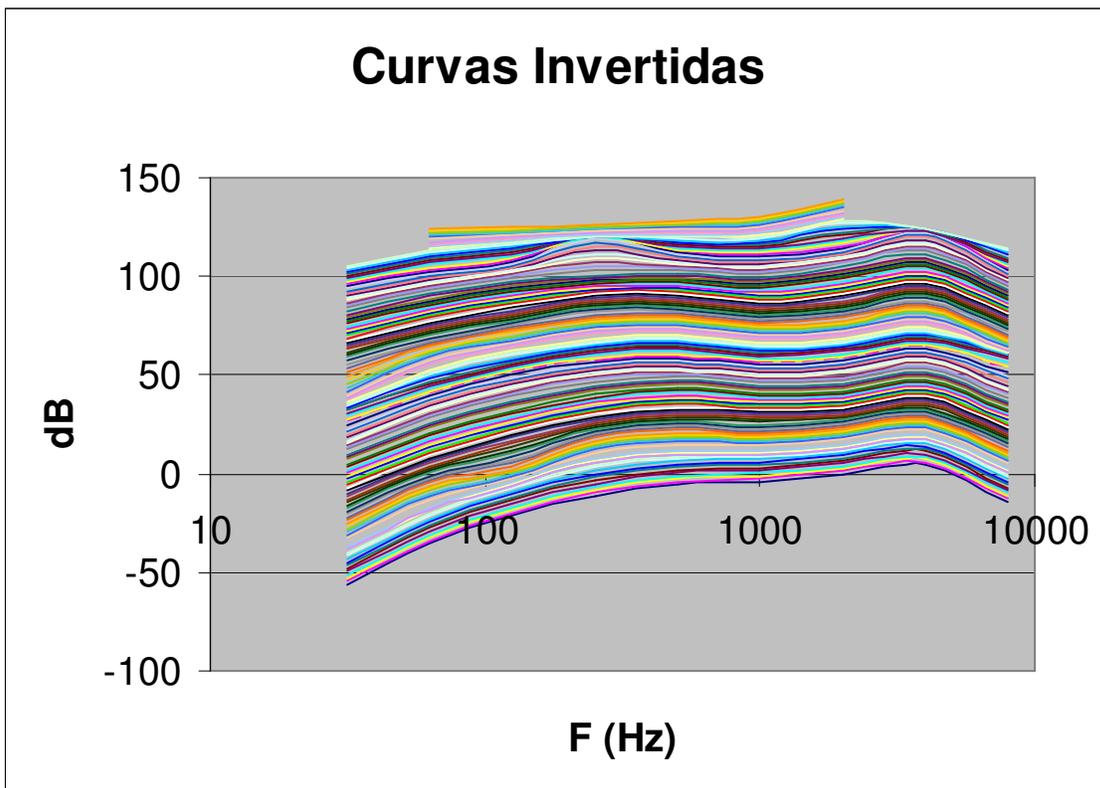
Gráfica 10. Interpolación de las curvas isofónicas

- ✓ Asociación de los valores que se ingresan (valores en decibeles lineales) con la curva isofónica correspondiente, de acuerdo al nivel compuesto de sonoridad en fones

Teniendo el resultado de sonoridad en Fones, se busca la curva isofónica correspondiente a dicho nivel de sonoridad y se asocia a los valores iniciales de nivel de presión sonora lineales.

- ✓ Búsqueda de los valores correctos de compensación, por medio de la inversión de las curvas isofónicas

Al invertir o espejar las curvas isofónicas, se obtiene la transferencia del oído humano. Por lo anterior, se pueden superponer a las curvas espejadas los valores iniciales de Nivel de Presión Sonora lineales y así buscar el número de decibeles que se deben sumar o restar para realizar la compensación correcta. El resultado de la inversión de las curvas es el siguiente:



Gráfica 11. Inversión de la interpolación de las curvas isofónicas.

- ✓ Realización de la compensación correcta, de acuerdo a cada caso particular de nivel y frecuencia

En este paso, se realiza la compensación (suma y resta de decibeles) a los valores iniciales de Nivel de Presión Sonora por banda de octava, de acuerdo a la tabla de valores que se deben compensar por banda de frecuencia diseñada por los autores del proyecto (anexo 2).

- ✓ Comparación de los resultados obtenidos con la ponderación A

En esta parte, del algoritmo realiza aparte el cálculo de los valores numéricos que resultarían de hacer la compensación con la ponderación A, mediante la tabla de ponderaciones (anexo 5) y se compara mediante una tabla con los resultados del sistema diseñado.

Lo anterior se sustenta en la necesidad de tener datos de mediciones de Nivel de Presión Sonora, que en realidad se adapten a la audición humana, puesto que las curvas de ponderación existentes no son verídicas en este aspecto, ya que no tiene en cuenta que el oído humano no está expuesto siempre al mismo nivel sonoro, ni tiene una percepción uniforme a todas las frecuencias audibles.

CONCLUSIONES

- Aunque es común el uso de las redes de ponderación (A, B y C), no suministran resultados precisos de Nivel de Presión Sonora de acuerdo a la audición humana, puesto que utilizan rangos limitados de nivel de presión sonora.
- Las normas acústicas relacionadas a ruido y sonoridad no cumplen los parámetros necesarios para ser eficientes, pues emplean la ponderación A y ésta no realiza una compensación correcta para todos los casos de nivel y frecuencia posibles en la audición humana.
- El sistema de compensación diseñado (SAF) arroja valores confiables de Nivel de Presión sonora de acuerdo a la audición humana, ya que toma todos los casos de nivel de presión sonora y frecuencia posibles en la audición humana.
- Para determinar los niveles de riesgo de pérdida auditiva y molestia auditiva, es necesario realizar pruebas subjetivas a una población significativa de individuos utilizando el modelo propuesto. El presente trabajo se limitó al diseño del desarrollo matemático de la compensación correcta, al diseño del modelo de prueba subjetiva y algunos ejemplos de su aplicación.

RECOMENDACIONES

- Continuar con la investigación realizando pruebas subjetivas a una población considerable de personas para determinar los niveles reales de riesgo de pérdida auditiva y molestia auditiva.
- Adoptar como sistema de compensación para mediciones de Nivel de presión sonora el Sistema propuesto (SAF).

BIBLIOGRAFIA

VERA GUERRERO, M. Nieves, Efectos Psicofisiológicos del Ruido Ambiental, Editorial Universidad de Granada, España ,1990, 450 p.

IRAM, NORMA 4066 Curvas de Igual Nivel de Sonoridad, Buenos Aires, Argentina, agosto de 2004. 18 p.

GIMENEZ DE PAZ, Juan C. Ruidos y Vibraciones, Control y Efectos, Primera parte, Pag. 17 – 25

PÉREZ MIÑANA, José. Compendio práctico de acústica física del sonido, fuentes sonoras, acústica gráfica (...). Barcelona : Labor, 1969

LAWRENCE E. KINSLER, Austin R. Frey y ALAN B. COPPENS, James V. Sanders. Fundamentos de acústica, México, Editorial Limusa, 1988

MATRAS, Jean Jaques. El sonido, Editorial Orbis, Francia, 1986

MIYARA, Federico. Acústica y sistemas de sonido. UNR Editora, Rosario, Argentina, agosto de 1999

RECUERO LÓPEZ, Manuel. Acústica, Ec. Universitaria Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones. Madrid 1983.

HARRIS, C. M. Handbook of Noise Control. McGraw-Hill.

CYRIL M y HARRIS. Manual de medidas acústicas y control del ruido. McGraw Hill, 1998

CONCEPTOS FÍSICOS DE LAS ONDAS SONORAS www.cofis.es/pdf/fys/fys11_02.pdf, consultado el 2 de junio de 2005, Pablo Laforga Fernández. Director-consultor de Ahuza Medio Ambiente S.L.

CONTORNOS DE IGUAL SONORIDAD

http://www.doctorproaudio.com/doctor/temas/ref_fletcher.htm, Consultado el 4 de junio de 2005, Fletcher-Munson

PONDERACIONES A, B Y C / A, B AND C WEIGHTINGS

http://www.doctorproaudio.com/doctor/temas/ref_abc-weightings.htm, Consultado el 4 de junio de 2005

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla. Puntos Curvas Isofónicas

CURVA (PHONES)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	56	35,5	21,5	11,5	5,5	4	0	-4,5	14
1	56,4	35,95	21,95	11,85	6,05	4,6	0,7	-3,85	14,6
2	56,8	36,4	22,4	12,2	6,6	5,2	1,4	-3,2	15,2
3	57,2	36,85	22,85	12,55	7,15	5,8	2,1	-2,55	15,8
4	57,6	37,3	23,3	12,9	7,7	6,4	2,8	-1,9	16,4
5	58	37,75	23,75	13,25	8,25	7	3,5	-1,25	17
6	58,4	38,2	24,2	13,6	8,8	7,6	4,2	-0,6	17,6
7	58,8	38,65	24,65	13,95	9,35	8,2	4,9	0,05	18,2
8	59,2	39,1	25,1	14,3	9,9	8,8	5,6	0,7	18,8
9	59,6	39,55	25,55	14,65	10,45	9,4	6,3	1,35	19,4
10	60	40	26	15	11	10	7	2	20
11	60,5	40,6	27,2	15,8	11,8	11	8,05	3,05	20,9
12	61	41,2	28,4	16,6	12,6	12	9,1	4,1	21,8
13	61,5	41,8	29,6	17,4	13,4	13	10,15	5,15	22,7
14	62	42,4	30,8	18,2	14,2	14	11,2	6,2	23,6
15	62,5	43	32	19	15	15	12,25	7,25	24,5
16	63	43,6	33,2	19,8	15,8	16	13,3	8,3	25,4
17	63,5	44,2	34,4	20,6	16,6	17	14,35	9,35	26,3
18	64	44,8	35,6	21,4	17,4	18	15,4	10,4	27,2
19	64,5	45,4	36,8	22,2	18,2	19	16,45	11,45	28,1
20	65	46	38	23	19	20	17,5	12,5	29
21	65,5	46,76	38,36	23,94	19,95	21	18,58	13,49	29,95
22	66	47,52	38,72	24,88	20,9	22	19,66	14,48	30,9
23	66,5	48,28	39,08	25,82	21,85	23	20,74	15,47	31,85
24	67	49,04	39,44	26,76	22,8	24	21,82	16,46	32,8
25	67,5	49,8	39,8	27,7	23,75	25	22,9	17,45	33,75
26	68	50,56	40,16	28,64	24,7	26	23,98	18,44	34,7
27	68,5	51,32	40,52	29,58	25,65	27	25,06	19,43	35,65
28	69	52,08	40,88	30,52	26,6	28	26,14	20,42	36,6
29	69,5	52,84	41,24	31,46	27,55	29	27,22	21,41	37,55
30	70	53,6	41,6	32,4	28,5	30	28,3	22,4	38,5
31	70,5	54,19	42,29	33,16	29,3	31	29,32	23,41	39,4
32	71	54,78	42,98	33,92	30,1	32	30,34	24,42	40,3
33	71,5	55,37	43,67	34,68	30,9	33	31,36	25,43	41,2
34	72	55,96	44,36	35,44	31,7	34	32,38	26,44	42,1
35	72,5	56,55	45,05	36,2	32,5	35	33,4	27,45	43
36	73	57,14	45,74	36,96	33,3	36	34,42	28,46	43,9

37	73,5	57,73	46,43	37,72	34,1	37	35,44	29,47	44,8
38	74	58,32	47,12	38,48	34,9	38	36,46	30,48	45,7
39	74,5	58,91	47,81	39,24	35,7	39	37,48	31,49	46,6
40	75	59,5	48,5	40	36,5	40	38,5	32,5	47,5
41	75,8	60,22	49,2	40,86	37,5	41	39,45	33,45	48,43
42	76,6	60,94	49,9	41,72	38,5	42	40,4	34,4	49,36
43	77,4	61,66	50,6	42,58	39,5	43	41,35	35,35	50,29
44	78,2	62,38	51,3	43,44	40,5	44	42,3	36,3	51,22
45	79	63,1	52	44,3	41,5	45	43,25	37,25	52,15
46	79,8	63,82	52,7	45,16	42,5	46	44,2	38,2	53,08
47	80,6	64,54	53,4	46,02	43,5	47	45,15	39,15	54,01
48	81,4	65,26	54,1	46,88	44,5	48	46,1	40,1	54,94
49	82,2	65,98	54,8	47,74	45,5	49	47,05	41,05	55,87
50	83	66,7	55,5	48,6	46,5	50	48	42	56,8
51	83,5	67,48	56,4	49,54	47,45	51	48,9	42,95	57,17
52	84	68,26	57,3	50,48	48,4	52	49,8	43,9	57,54
53	84,5	69,04	58,2	51,42	49,35	53	50,7	44,85	57,91
54	85	69,82	59,1	52,36	50,3	54	51,6	45,8	58,28
55	85,5	70,6	60	53,3	51,25	55	52,5	46,75	58,65
56	86	71,38	60,9	54,24	52,2	56	53,4	47,7	59,02
57	86,5	72,16	61,8	55,18	53,15	57	54,3	48,65	59,39
58	87	72,94	62,7	56,12	54,1	58	55,2	49,6	59,76
59	87,5	73,72	63,6	57,06	55,05	59	56,1	50,55	60,13
60	88	74,5	64,5	58	56	60	57	51,5	60,5
61	89,3	75,28	65,4	58,89	57	61	58,1	52,5	62,13
62	90,6	76,06	66,3	59,78	58	62	59,2	53,5	63,76
63	91,9	76,84	67,2	60,67	59	63	60,3	54,5	65,39
64	93,2	77,62	68,1	61,56	60	64	61,4	55,5	67,02
65	94,5	78,4	69	62,45	61	65	62,5	56,5	68,65
66	95,8	79,18	69,9	63,34	62	66	63,6	57,5	70,28
67	97,1	79,96	70,8	64,23	63	67	64,7	58,5	71,91
68	98,4	80,74	71,7	65,12	64	68	65,8	59,5	73,54
69	99,7	81,52	72,6	66,01	65	69	66,9	60,5	75,17
70	101	82,3	73,5	66,9	66	70	68	61,5	76,8
71	100,95	83,07	74,4	67,81	67	71	68,85	62,35	77,72
72	100,9	83,84	75,3	68,72	68	72	69,7	63,2	78,64
73	100,85	84,61	76,2	69,63	69	73	70,55	64,05	79,56
74	100,8	85,38	77,1	70,54	70	74	71,4	64,9	80,48
75	100,75	86,15	78	71,45	71	75	72,25	65,75	81,4
76	100,7	86,92	78,9	72,36	72	76	73,1	66,6	82,32
77	100,65	87,69	79,8	73,27	73	77	73,95	67,45	83,24
78	100,6	88,46	80,7	74,18	74	78	74,8	68,3	84,16
79	100,55	89,23	81,6	75,09	75	79	75,65	69,15	85,08
80	100,5	90	82,5	76	76	80	76,5	70	86

81	101,34	90,9	83,45	77,03	77	81	77,45	70,98	86,98
82	102,18	91,8	84,4	78,06	78	82	78,4	71,96	87,96
83	103,02	92,7	85,35	79,09	79	83	79,35	72,94	88,94
84	103,86	93,6	86,3	80,12	80	84	80,3	73,92	89,92
85	104,7	94,5	87,25	81,15	81	85	81,25	74,9	90,9
86	105,54	95,4	88,2	82,18	82	86	82,2	75,88	91,88
87	106,38	96,3	89,15	83,21	83	87	83,15	76,86	92,86
88	107,22	97,2	90,1	84,24	84	88	84,1	77,84	93,84
89	108,06	98,1	91,05	85,27	85	89	85,05	78,82	94,82
90	108,9	99	92	86,3	86	90	86	79,8	95,8
91	109,71	99,9	93	87,57	87,2	91	86,8	80,62	96,77
92	110,52	100,8	94	88,84	88,4	92	87,6	81,44	97,74
93	111,33	101,7	95	90,11	89,6	93	88,4	82,26	98,71
94	112,14	102,6	96	91,38	90,8	94	89,2	83,08	99,68
95	112,95	103,5	97	92,65	92	95	90	83,9	100,65
96	113,76	104,4	98	93,92	93,2	96	90,8	84,72	101,62
97	114,57	105,3	99	95,19	94,4	97	91,6	85,54	102,59
98	115,38	106,2	100	96,46	95,6	98	92,4	86,36	103,56
99	116,19	107,1	101	97,73	96,8	99	93,2	87,18	104,53
100	117	108	102	99	98	100	94	88	105,5
101	117,8	108,9	103,1	99,03	99	101	95,2	88,9	106,65
102	118,6	109,9	104,1	99,06	100	102	96,4	89,8	107,8
103	119,4	110,8	105,2	99,09	101	103	97,6	90,7	108,95
104	120,2	111,8	106,2	99,12	102	104	98,8	91,6	110,1
105	121	112,7	107,3	99,15	103	105	100	92,5	111,25
106	121,8	113,6	108,3	99,18	104	106	101,2	93,4	112,4
107	122,6	114,6	109,4	99,21	105	107	102,4	94,3	113,55
108	123,4	115,5	110,4	99,24	106	108	103,6	95,2	114,7
109	124,2	116,5	111,5	99,27	107	109	104,8	96,1	115,85
110	125	117,4	112,5	99,3	108	110	106	97	117
111	126	118,4	113,6	101,37	109,2	111	106,6	98,85	117,9
112	127	119,3	114,6	103,44	110,4	112	107,2	100,7	118,8
113	128	120,3	115,7	105,51	111,6	113	107,8	102,55	119,7
114	129	121,2	116,7	107,58	112,8	114	108,4	104,4	120,6
115	130	122,2	117,8	109,65	114	115	109	106,25	121,5
116	131	123,2	118,8	111,72	115,2	116	109,6	108,1	122,4
117	132	124,1	119,9	113,79	116,4	117	110,2	109,95	123,3
118	133	125,1	120,9	115,86	117,6	118	110,8	111,8	124,2
119	134	126	122	117,93	118,8	119	111,4	113,65	125,1
120	135	127	123	120	120	120	112	115,5	126
121		127,9	124,2	121,35	121,2	121	112,9	115,32	
122		128,7	125,4	122,7	122,4	122	113,8	115,14	
123		129,6	126,6	124,05	123,6	123	114,7	114,96	
124		130,4	127,8	125,4	124,8	124	115,6	114,78	

125		131,3	129	126,75	126	125	116,5	114,6	
126		132,1	130,2	128,1	127,2	126	117,4	114,42	
127		133	131,4	129,45	128,4	127	118,3	114,24	
128		133,8	132,6	130,8	129,6	128	119,2	114,06	
129		134,7	133,8	132,15	130,8	129	120,1	113,88	
130		135,5	135	133,5	132	130	121	113,7	

ANEXO 2

Tabla. Valores de compensación en decibeles que se deben sumar a los Niveles de Presión Sonora lineales para cada caso particular.

CURVA (PHONES)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	-56	-35,5	-21,5	-11,5	-5,5	-4	0	4,5	-14
1	-55,4	-34,95	-20,95	-10,85	-5,05	-3,6	0,3	4,85	-13,6
2	-54,8	-34,4	-20,4	-10,2	-4,6	-3,2	0,6	5,2	-13,2
3	-54,2	-33,85	-19,85	-9,55	-4,15	-2,8	0,9	5,55	-12,8
4	-53,6	-33,3	-19,3	-8,9	-3,7	-2,4	1,2	5,9	-12,4
5	-53	-32,75	-18,75	-8,25	-3,25	-2	1,5	6,25	-12
6	-52,4	-32,2	-18,2	-7,6	-2,8	-1,6	1,8	6,6	-11,6
7	-51,8	-31,65	-17,65	-6,95	-2,35	-1,2	2,1	6,95	-11,2
8	-51,2	-31,1	-17,1	-6,3	-1,9	-0,8	2,4	7,3	-10,8
9	-50,6	-30,55	-16,55	-5,65	-1,45	-0,4	2,7	7,65	-10,4
10	-50	-30	-16	-5	-1	0	3	8	-10
11	-49,5	-29,6	-16,2	-4,8	-0,8	0	2,95	7,95	-9,9
12	-49	-29,2	-16,4	-4,6	-0,6	0	2,9	7,9	-9,8
13	-48,5	-28,8	-16,6	-4,4	-0,4	0	2,85	7,85	-9,7
14	-48	-28,4	-16,8	-4,2	-0,2	0	2,8	7,8	-9,6
15	-47,5	-28	-17	-4	0	0	2,75	7,75	-9,5
16	-47	-27,6	-17,2	-3,8	0,2	0	2,7	7,7	-9,4
17	-46,5	-27,2	-17,4	-3,6	0,4	0	2,65	7,65	-9,3
18	-46	-26,8	-17,6	-3,4	0,6	0	2,6	7,6	-9,2
19	-45,5	-26,4	-17,8	-3,2	0,8	0	2,55	7,55	-9,1
20	-45	-26	-18	-3	1	0	2,5	7,5	-9
21	-44,5	-25,76	-17,36	-2,94	1,05	0	2,42	7,51	-8,95
22	-44	-25,52	-16,72	-2,88	1,1	0	2,34	7,52	-8,9
23	-43,5	-25,28	-16,08	-2,82	1,15	0	2,26	7,53	-8,85
24	-43	-25,04	-15,44	-2,76	1,2	0	2,18	7,54	-8,8
25	-42,5	-24,8	-14,8	-2,7	1,25	0	2,1	7,55	-8,75
26	-42	-24,56	-14,16	-2,64	1,3	0	2,02	7,56	-8,7
27	-41,5	-24,32	-13,52	-2,58	1,35	0	1,94	7,57	-8,65
28	-41	-24,08	-12,88	-2,52	1,4	0	1,86	7,58	-8,6
29	-40,5	-23,84	-12,24	-2,46	1,45	0	1,78	7,59	-8,55
30	-40	-23,6	-11,6	-2,4	1,5	0	1,7	7,6	-8,5
31	-39,5	-23,19	-11,29	-2,16	1,7	0	1,68	7,59	-8,4
32	-39	-22,78	-10,98	-1,92	1,9	0	1,66	7,58	-8,3
33	-38,5	-22,37	-10,67	-1,68	2,1	0	1,64	7,57	-8,2
34	-38	-21,96	-10,36	-1,44	2,3	0	1,62	7,56	-8,1
35	-37,5	-21,55	-10,05	-1,2	2,5	0	1,6	7,55	-8
36	-37	-21,14	-9,74	-0,96	2,7	0	1,58	7,54	-7,9
37	-36,5	-20,73	-9,43	-0,72	2,9	0	1,56	7,53	-7,8
38	-36	-20,32	-9,12	-0,48	3,1	0	1,54	7,52	-7,7
39	-35,5	-19,91	-8,81	-0,24	3,3	0	1,52	7,51	-7,6

40	-35	-19,5	-8,5	0	3,5	0	1,5	7,5	-7,5
41	-34,8	-19,22	-8,2	0,14	3,5	0	1,55	7,55	-7,43
42	-34,6	-18,94	-7,9	0,28	3,5	0	1,6	7,6	-7,36
43	-34,4	-18,66	-7,6	0,42	3,5	0	1,65	7,65	-7,29
44	-34,2	-18,38	-7,3	0,56	3,5	0	1,7	7,7	-7,22
45	-34	-18,1	-7	0,7	3,5	0	1,75	7,75	-7,15
46	-33,8	-17,82	-6,7	0,84	3,5	0	1,8	7,8	-7,08
47	-33,6	-17,54	-6,4	0,98	3,5	0	1,85	7,85	-7,01
48	-33,4	-17,26	-6,1	1,12	3,5	0	1,9	7,9	-6,94
49	-33,2	-16,98	-5,8	1,26	3,5	0	1,95	7,95	-6,87
50	-33	-16,7	-5,5	1,4	3,5	0	2	8	-6,8
51	-32,5	-16,48	-5,4	1,46	3,55	0	2,1	8,05	-6,17
52	-32	-16,26	-5,3	1,52	3,6	0	2,2	8,1	-5,54
53	-31,5	-16,04	-5,2	1,58	3,65	0	2,3	8,15	-4,91
54	-31	-15,82	-5,1	1,64	3,7	0	2,4	8,2	-4,28
55	-30,5	-15,6	-5	1,7	3,75	0	2,5	8,25	-3,65
56	-30	-15,38	-4,9	1,76	3,8	0	2,6	8,3	-3,02
57	-29,5	-15,16	-4,8	1,82	3,85	0	2,7	8,35	-2,39
58	-29	-14,94	-4,7	1,88	3,9	0	2,8	8,4	-1,76
59	-28,5	-14,72	-4,6	1,94	3,95	0	2,9	8,45	-1,13
60	-28	-14,5	-4,5	2	4	0	3	8,5	-0,5
61	-28,3	-14,28	-4,4	2,11	4	0	2,9	8,5	-1,13
62	-28,6	-14,06	-4,3	2,22	4	0	2,8	8,5	-1,76
63	-28,9	-13,84	-4,2	2,33	4	0	2,7	8,5	-2,39
64	-29,2	-13,62	-4,1	2,44	4	0	2,6	8,5	-3,02
65	-29,5	-13,4	-4	2,55	4	0	2,5	8,5	-3,65
66	-29,8	-13,18	-3,9	2,66	4	0	2,4	8,5	-4,28
67	-30,1	-12,96	-3,8	2,77	4	0	2,3	8,5	-4,91
68	-30,4	-12,74	-3,7	2,88	4	0	2,2	8,5	-5,54
69	-30,7	-12,52	-3,6	2,99	4	0	2,1	8,5	-6,17
70	-31	-12,3	-3,5	3,1	4	0	2	8,5	-6,8
71	-29,95	-12,07	-3,4	3,19	4	0	2,15	8,65	-6,72
72	-28,9	-11,84	-3,3	3,28	4	0	2,3	8,8	-6,64
73	-27,85	-11,61	-3,2	3,37	4	0	2,45	8,95	-6,56
74	-26,8	-11,38	-3,1	3,46	4	0	2,6	9,1	-6,48
75	-25,75	-11,15	-3	3,55	4	0	2,75	9,25	-6,4
76	-24,7	-10,92	-2,9	3,64	4	0	2,9	9,4	-6,32
77	-23,65	-10,69	-2,8	3,73	4	0	3,05	9,55	-6,24
78	-22,6	-10,46	-2,7	3,82	4	0	3,2	9,7	-6,16
79	-21,55	-10,23	-2,6	3,91	4	0	3,35	9,85	-6,08
80	-20,5	-10	-2,5	4	4	0	3,5	10	-6
81	-20,34	-9,9	-2,45	3,97	4	0	3,55	10,02	-5,98
82	-20,18	-9,8	-2,4	3,94	4	0	3,6	10,04	-5,96
83	-20,02	-9,7	-2,35	3,91	4	0	3,65	10,06	-5,94
84	-19,86	-9,6	-2,3	3,88	4	0	3,7	10,08	-5,92
85	-19,7	-9,5	-2,25	3,85	4	0	3,75	10,1	-5,9

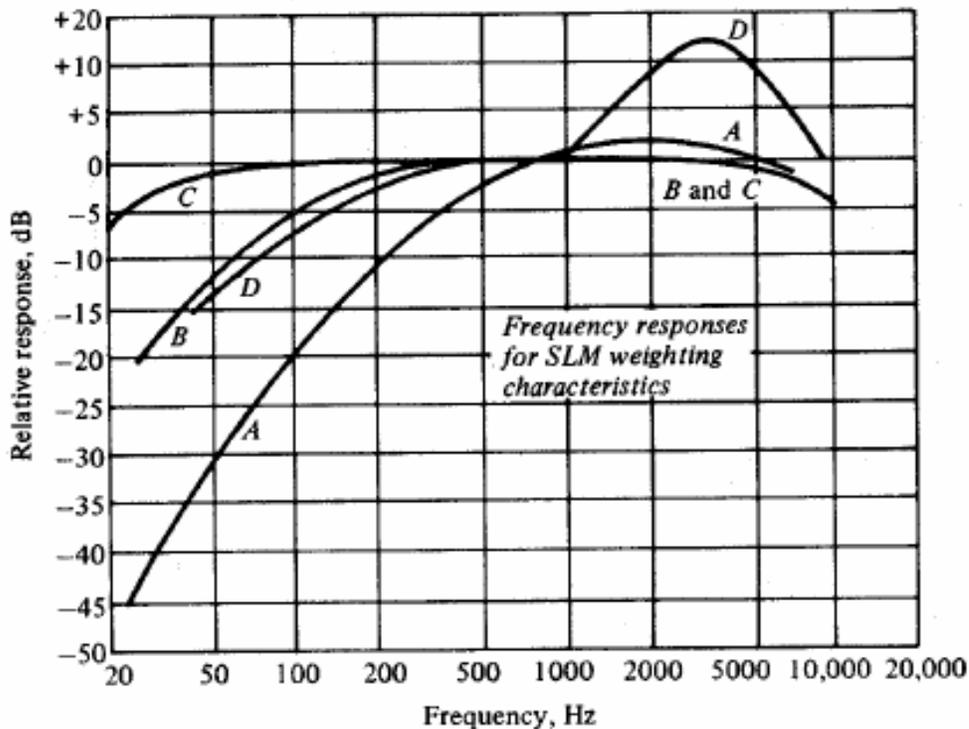
86	-19,54	-9,4	-2,2	3,82	4	0	3,8	10,12	-5,88
87	-19,38	-9,3	-2,15	3,79	4	0	3,85	10,14	-5,86
88	-19,22	-9,2	-2,1	3,76	4	0	3,9	10,16	-5,84
89	-19,06	-9,1	-2,05	3,73	4	0	3,95	10,18	-5,82
90	-18,9	-9	-2	3,7	4	0	4	10,2	-5,8
91	-18,71	-8,9	-2	3,43	3,8	0	4,2	10,38	-5,77
92	-18,52	-8,8	-2	3,16	3,6	0	4,4	10,56	-5,74
93	-18,33	-8,7	-2	2,89	3,4	0	4,6	10,74	-5,71
94	-18,14	-8,6	-2	2,62	3,2	0	4,8	10,92	-5,68
95	-17,95	-8,5	-2	2,35	3	0	5	11,1	-5,65
96	-17,76	-8,4	-2	2,08	2,8	0	5,2	11,28	-5,62
97	-17,57	-8,3	-2	1,81	2,6	0	5,4	11,46	-5,59
98	-17,38	-8,2	-2	1,54	2,4	0	5,6	11,64	-5,56
99	-17,19	-8,1	-2	1,27	2,2	0	5,8	11,82	-5,53
100	-17	-8	-2	1	2	0	6	12	-5,5
101	-16,8	-7,94	-2,05	1,97	2	0	5,8	12,1	-5,65
102	-16,6	-7,88	-2,1	2,94	2	0	5,6	12,2	-5,8
103	-16,4	-7,82	-2,15	3,91	2	0	5,4	12,3	-5,95
104	-16,2	-7,76	-2,2	4,88	2	0	5,2	12,4	-6,1
105	-16	-7,7	-2,25	5,85	2	0	5	12,5	-6,25
106	-15,8	-7,64	-2,3	6,82	2	0	4,8	12,6	-6,4
107	-15,6	-7,58	-2,35	7,79	2	0	4,6	12,7	-6,55
108	-15,4	-7,52	-2,4	8,76	2	0	4,4	12,8	-6,7
109	-15,2	-7,46	-2,45	9,73	2	0	4,2	12,9	-6,85
110	-15	-7,4	-2,5	10,7	2	0	4	13	-7
111	-15	-7,36	-2,55	9,63	1,8	0	4,4	12,15	-6,9
112	-15	-7,32	-2,6	8,56	1,6	0	4,8	11,3	-6,8
113	-15	-7,28	-2,65	7,49	1,4	0	5,2	10,45	-6,7
114	-15	-7,24	-2,7	6,42	1,2	0	5,6	9,6	-6,6
115	-15	-7,2	-2,75	5,35	1	0	6	8,75	-6,5
116	-15	-7,16	-2,8	4,28	0,8	0	6,4	7,9	-6,4
117	-15	-7,12	-2,85	3,21	0,6	0	6,8	7,05	-6,3
118	-15	-7,08	-2,9	2,14	0,4	0	7,2	6,2	-6,2
119	-15	-7,04	-2,95	1,07	0,2	0	7,6	5,35	-6,1
120	-15	-7	-3	0	0	0	8	4,5	-6
121		-6,85	-3,2	-0,35	-0,2	0	8,1	5,68	
122		-6,7	-3,4	-0,7	-0,4	0	8,2	6,86	
123		-6,55	-3,6	-1,05	-0,6	0	8,3	8,04	
124		-6,4	-3,8	-1,4	-0,8	0	8,4	9,22	
125		-6,25	-4	-1,75	-1	0	8,5	10,4	
126		-6,1	-4,2	-2,1	-1,2	0	8,6	11,58	
127		-5,95	-4,4	-2,45	-1,4	0	8,7	12,76	
128		-5,8	-4,6	-2,8	-1,6	0	8,8	13,94	
129		-5,65	-4,8	-3,15	-1,8	0	8,9	15,12	
130		-5,5	-5	-3,5	-2	0	9	16,3	

ANEXO 3

Traducción del paper de Stevens

Las unidades de ponderación incluidas en los SLM, proveen una respuesta del instrumento que trata de aproximar la forma en que el oído responde a la sonoridad de un tono puro.

Estas curvas se encuentran directamente derivadas de los contornos de igual sonoridad de Fletcher y Munson.



Las curvas de ponderación responden a:

A.- Aproximación de 40 fones (curva de énfasis de bajas frecuencias)

B – Aproximación de 70 fones.

C – Aproximación de 100 fones, lineal (generalmente plana)

D – Desarrollada para ruido aeronáutico de sobrevuelos. Penaliza las frecuencias altas)

La mas común es la A., dado que:

- A. Se correlaciona bastante bien con los daños auditivos.
- B. Se implementa fácilmente en una unidad de filtro.
- C. Se mide fácilmente y el nivel global es un número.
- D. Se usa en la mayoría de las regulaciones.

Dada la simplicidad de la curva A, las personas tienden a olvidarse de sus limitaciones y a aplicarlas en situaciones para las que no fue trazada.

Dichas limitaciones comprenden:

1. Dado que fue derivada de la curva de 40 fones, es solo válida para niveles de sonido bajos y moderados (40 a 60 fones) y para tonos puros simples.
2. Para sonidos de mayor nivel de sonoridad, son mas apropiadas las curvas B o C, aunque nunca se usen.
3. No es una buena medición de la sonoridad o la molestia, para sonidos complejos consistentes en tonos puros múltiples y / o ruido de banda ancha.
4. Dos sonidos con el mismo nivel compensado A, pueden tener gran diferencia de grado de molestia.
5. No suministra indicación del contenido en frecuencia de un ruido complejo por lo que no es útil al momento de identificar o separar fuentes de ruido o para diseñar medidas de control de ruido.

Sonoridad y molestia

Se trata de valores que no son generalmente obtenibles en SLM básicos, dado que requieren cálculos adicionales o promediaciones, pero que proveen mucha mas información que un valor de SPL global, con o sin ponderaciones.

Nivel de sonoridad (Stevens – Mark VI)

Esta medición provee un valor cuantitativo de la sonoridad global, así como la contribución relativa a ella de cada banda de octava.

Es útil para fines de comparación y otorga información importante para el costo efectivo de los tratamientos de control de ruido.

Fue derivada de datos empíricos con espectro casi plano, sin tonos puros y campo difuso.

El nivel de sonoridad de cada banda se determina de las tablas adjuntas.

El nivel compuesto de sonoridad L para todas las bandas de octavas será:

$$L = 0,7 S_{\max} + 0,3 \sum S_i$$

S_{\max} = índice de sonoridad de la banda de octava mas sonora

S_i = índice de sonoridad de la octava i

Centro de octava →	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Nivel de octava – dB lineal	76	73	70	75	80	74	65	65	66
Índice de sonoridad de octava S_i	3,2	3,7	5	8,3	13,5	11,1	7,8	9,3	11,8
Categoría	9	8	7	5	1	3	6	4	2

Usando la tabla:

$$S_{\text{total}} = \sum S_i = 73,7$$

$$S_{\max} = 13,5$$

$$L = 0,7 \times 13,5 + 0,3 \times 73,7 = 31,56 \text{ sones}$$

Nivel de sonoridad = 89,8 fones (utilizando las columnas 11 y 12)

ANEXO 4

Tabla. Conversión a niveles de sonoridad.

Band level conversion to loudness Index

Table 2-1 Band-level conversion to loudness index

Band level, dB	Band loudness index									Loudness, sones	Loudness level, phons
	131.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
20						.18	.30	.45	.61	.25	20
21						.22	.35	.50	.67	.27	21
22					.07	.26	.40	.55	.73	.29	22
23					.12	.30	.45	.61	.80	.31	23
24					.16	.35	.50	.67	.87	.33	24
25					.21	.40	.55	.73	.94	.35	25
26					.26	.45	.61	.80	1.02	.38	26
27					.31	.50	.67	.87	1.10	.41	27
28				.07	.37	.55	.73	.94	1.18	.44	28
29				.12	.43	.61	.80	1.02	1.27	.47	29
30				.16	.49	.67	.87	1.10	1.35	.50	30
31				.21	.55	.73	.94	1.18	1.44	.54	31
32				.26	.61	.80	1.02	1.27	1.54	.57	32
33				.31	.67	.87	1.10	1.35	1.64	.62	33
34			.07	.37	.73	.94	1.18	1.44	1.75	.66	34
35			.12	.43	.80	1.02	1.27	1.54	1.87	.71	35
36			.16	.49	.87	1.10	1.35	1.64	1.99	.76	36
37			.21	.55	.94	1.18	1.44	1.75	2.11	.81	37
38			.26	.62	1.02	1.27	1.54	1.87	2.24	.87	38
39			.31	.69	1.10	1.35	1.64	1.99	2.38	.93	39
40		.07	.37	.77	1.18	1.44	1.75	2.11	2.53	1.00	40
41		.12	.43	.85	1.27	1.54	1.87	2.24	2.68	1.07	41
42		.16	.49	.94	1.35	1.64	1.99	2.38	2.84	1.15	42
43		.21	.55	1.04	1.44	1.75	2.11	2.53	3.0	1.23	43
44		.26	.62	1.13	1.54	1.87	2.24	2.68	3.2	1.32	44
45		.31	.69	1.23	1.64	1.99	2.38	2.84	3.4	1.41	45
46	.07	.37	.77	1.33	1.75	2.11	2.53	3.0	3.6	1.52	46
47	.12	.43	.85	1.44	1.87	2.24	2.68	3.2	3.8	1.62	47
48	.16	.49	.94	1.56	1.99	2.38	2.84	3.4	4.1	1.74	48
49	.21	.55	1.04	1.69	2.11	2.53	3.0	3.6	4.3	1.87	49
50	.26	.62	1.13	1.82	2.24	2.68	3.2	3.8	4.6	2.00	50
51	.31	.69	1.23	1.96	2.38	2.84	3.4	4.1	4.9	2.14	51
52	.37	.77	1.33	2.11	2.53	3.0	3.6	4.3	5.2	2.30	52
53	.43	.85	1.44	2.24	2.68	3.2	3.8	4.6	5.5	2.46	53
54	.49	.94	1.56	2.38	2.84	3.4	4.1	4.9	5.8	2.64	54
55	.55	1.04	1.69	2.53	3.0	3.6	4.3	5.2	6.2	2.83	55
56	.62	1.13	1.82	2.68	3.2	3.8	4.6	5.5	6.6	3.03	56
57	.69	1.23	1.96	2.84	3.4	4.1	4.9	5.8	7.0	3.25	57
58	.77	1.33	2.11	3.0	3.6	4.3	5.2	6.2	7.4	3.48	58
59	.85	1.44	2.27	3.2	3.8	4.6	5.5	6.6	7.8	3.73	59
60	.94	1.56	2.44	3.4	4.1	4.9	5.8	7.0	8.3	4.00	60
61	1.04	1.69	2.62	3.6	4.3	5.2	6.2	7.4	8.8	4.29	61
62	1.13	1.82	2.81	3.8	4.6	5.5	6.6	7.8	9.3	4.59	62
63	1.23	1.96	3.0	4.1	4.9	5.8	7.0	8.3	9.9	4.92	63
64	1.33	2.11	3.2	4.3	5.2	6.2	7.4	8.8	10.5	5.28	64
65	1.44	2.27	3.5	4.6	5.5	6.6	7.8	9.3	11.1	5.66	65
66	1.56	2.44	3.7	4.9	5.8	7.0	8.3	9.9	11.8	6.06	66
67	1.69	2.62	4.0	5.2	6.2	7.4	8.8	10.5	12.6	6.50	67
68	1.82	2.81	4.3	5.5	6.6	7.8	9.3	11.1	13.5	6.96	68
69	1.96	3.0	4.7	5.8	7.0	8.3	9.9	11.8	14.4	7.46	69
70	2.11	3.2	5.0	6.2	7.4	8.8	10.5	12.6	15.3	8.00	70
71	2.27	3.5	5.4	6.6	7.8	9.3	11.1	13.5	16.4	8.6	71
72	2.44	3.7	5.8	7.0	8.3	9.9	11.8	14.4	17.5	9.2	72
73	2.62	4.0	6.2	7.4	8.8	10.5	12.6	15.3	18.7	9.8	73
74	2.81	4.3	6.6	7.8	9.3	11.1	13.5	16.4	20.0	10.6	74

Table 2-1 (Continued)

Band level, dB	Band loudness index									Loudness, sones	Loudness level, phons
	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
75	3.0	4.7	7.0	8.3	9.9	11.8	14.4	17.5	21.4	11.3	75
76	3.2	5.0	7.4	8.8	10.5	12.6	15.3	18.7	23.0	12.1	76
77	3.5	5.4	7.8	9.3	11.1	13.5	16.4	20.0	24.7	13.0	77
78	3.7	5.8	8.3	9.9	11.8	14.4	17.5	21.4	26.5	13.9	78
79	4.0	6.2	8.8	10.5	12.6	15.3	18.7	23.0	28.5	14.9	79
80	4.3	6.7	9.3	11.1	13.5	16.4	20.0	24.7	30.5	16.0	80
81	4.7	7.2	9.9	11.8	14.4	17.5	21.4	26.5	32.9	17.1	81
82	5.0	7.7	10.5	12.6	15.3	18.7	23.0	28.5	35.3	18.4	82
83	5.4	8.2	11.1	13.5	16.4	20.0	24.7	30.5	38.	19.7	83
84	5.8	8.8	11.8	14.4	17.5	21.4	26.5	32.9	41.	21.1	84
85	6.2	9.4	12.6	15.3	18.7	23.0	28.5	35.3	44.	22.6	85
86	6.7	10.1	13.5	16.4	20.0	24.7	30.5	38.	48.	24.3	86
87	7.2	10.9	14.4	17.5	21.4	26.5	32.9	41.	52.	26.0	87
88	7.7	11.7	15.3	18.7	23.0	28.5	35.3	44.	56.	27.9	88
89	8.2	12.6	16.4	20.0	24.7	30.5	38.	48.	61.	29.9	89
90	8.8	13.6	17.5	21.4	26.5	32.9	41.	52.	66.	32.0	90
91	9.4	14.8	18.7	23.0	28.5	35.3	44.	56.	71.	34.3	91
92	10.1	16.0	20.0	24.7	30.5	38.	48.	61.	77.	36.8	92
93	10.9	17.3	21.4	26.5	32.9	41.	52.	66.	83.	39.4	93
94	11.7	18.7	23.0	28.5	35.3	44.	56.	71.	90.	42.2	94
95	12.6	20.0	24.7	30.5	38.	48.	61.	77.	97.	45.3	95
96	13.6	21.4	26.5	32.9	41.	52.	66.	83.	105.	48.5	96
97	14.8	23.0	28.5	35.3	44.	56.	71.	90.	113.	52.0	97
98	16.0	24.7	30.5	38.	48.	61.	77.	97.	121.	55.7	98
99	17.3	26.5	32.9	41.	52.	66.	83.	105.	130.	59.7	99
100	18.7	28.5	35.3	44.	56.	71.	90.	113.	139.	64.0	100
101	20.3	30.5	38.	48.	61.	77.	97.	121.	149.	68.6	101
102	22.1	32.9	41.	52.	66.	83.	105.	130.	160.	73.5	102
103	24.0	35.3	44.	56.	71.	90.	113.	139.	171.	78.8	103
104	26.1	38.	48.	61.	77.	97.	121.	149.	184.	84.4	104
105	28.5	41.	52.	66.	83.	105.	130.	160.	197.	90.5	105
106	31.0	44.	56.	71.	90.	113.	139.	171.	211.	97.	106
107	33.9	48.	61.	77.	97.	121.	149.	184.	226.	104.	107
108	36.9	52.	66.	83.	105.	130.	160.	197.	242.	111.	108
109	40.3	56.	71.	90.	113.	139.	171.	211.	260.	119.	109
110	44.	61.	77.	97.	121.	149.	184.	226.	278.	128.	110
111	49.	66.	83.	105.	130.	160.	197.	242.	298.	137.	111
112	54.	71.	90.	113.	139.	171.	211.	260.	320.	147.	112
113	59.	77.	97.	121.	149.	184.	226.	278.	343.	158.	113
114	65.	83.	105.	130.	160.	197.	242.	298.	367.	169.	114
115	71.	90.	113.	139.	171.	211.	260.	320.		181.	115
116	77.	97.	121.	149.	184.	226.	278.	343.		194.	116
117	83.	105.	130.	160.	197.	242.	298.	367.		208.	117
118	90.	113.	139.	171.	211.	260.	320.			233.	118
119	97.	121.	149.	184.	226.	278.	343.			239.	119
120	105.	130.	160.	197.	242.	298.	367.			256.	120
121	113.	139.	171.	211.	260.	320.				274.	121
122	121.	149.	184.	226.	278.	343.				294.	122
123	130.	160.	197.	242.	298.	367.				315.	123
124	139.	171.	211.	260.	320.					338.	124
125	149.	184.	226.	278.	343.					362.	125

Source: A. P. G. Peterson and E. E. Gross, *Handbook of Noise Measurement*, 7th ed., General Radio Company, Concord, Mass., pp. 25-26. The method used here is that standardized in ANSI S 3.4 - 1968.

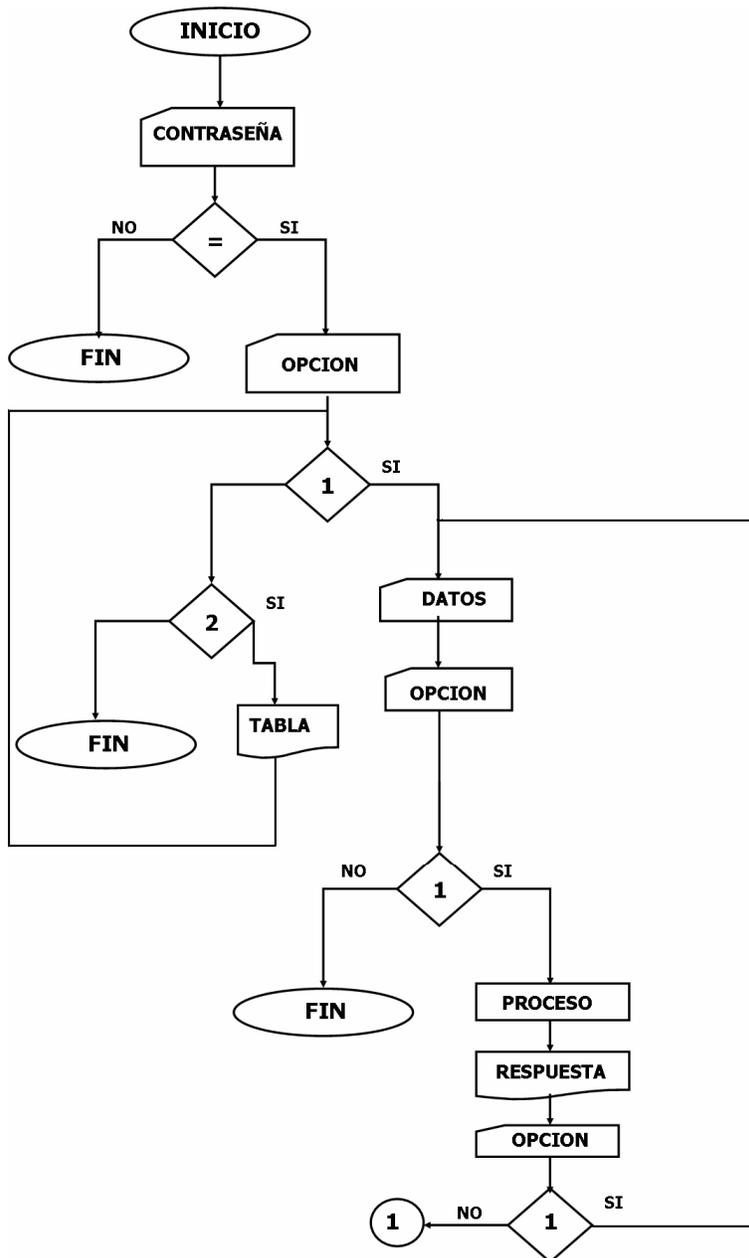
ANEXO 5

Tabla. Compensaciones de las ponderaciones

Frecuencia en Hz	Curva A	Curva B	Curva C	Curva D
10.0	-70.4	-38.2	-14.3	-26.5
12.5	-63.4	-33.2	-11.2	-24.5
16.0	-56.7	-28.5	-8.5	-22.5
20.0	-50.5	-24.2	-6.2	-20.5
25.0	-44.7	-20.4	-4.4	-18.5
31.5	-39.4	-17.1	-3.0	-16.5
40.0	-34.6	-14.2	-2.0	-14.5
50.0	-30.2	-11.6	-1.3	-12.5
63.0	-26.2	-9.3	-0.8	-11.0
80.0	-22.5	-7.4	-0.5	-9.0
100.0	-19.1	-5.6	-0.3	-7.5
125.0	-16.1	-4.2	-0.2	-6.0
160.0	-13.0	-3.0	-0.1	-4.5
200.0	-10.9	-2.0	0.0	-3.0
250.0	-8.6	-1.3	0.0	-2.0
315.0	-6.6	-0.8	0.0	-0.5
400.0	-4.8	-0.5	0.0	0.0
500.0	-3.2	-0.1	0.0	0.0

ANEXO 6

DIAGRAMA DE FLUJO SISTEMA SAF



ANEXO 7

MARK VII

Nivel percibido (PL) o Mark VII de Stevens (PLdB)

El nivel percibido es una evaluación de la sonoridad o ruidosidad de un ruido; calculada a partir de medidas acústicas efectuadas en bandas de octava o tercias de banda de octava.

El nivel percibido fue desarrollado como una medida de la sonoridad o ruidosidad del ruido, para proporcionar un compromiso entre el nivel de ruido percibido (PNdB) o nivel de ruidosidad y el nivel de sonoridad dado por el método Mark VI de Stevens.

El nivel percibido PL conocido también como Mark VII, es una revisión del nivel de sonoridad Mark VI de 1972; desarrollado por Stevens para ser incorporado a la investigación tanto de la sonoridad como de la ruidosidad. Los principales cambios en este método de evaluación son los siguientes:

- El ruido de referencia es el ruido producido por una banda de ruido aleatorio de 1/3 de octava cuya frecuencia central de banda es ahora de 3,150 Hz en lugar del tono de 1,000 Hz y con un nivel de banda de 32 dBSPL, al cual se asigna una magnitud percibida de un sono. Esta nueva referencia normalizada da como resultado una disminución en el nivel percibido PLdB de 8 PLdB, comparado con los valores de fonos dados para el método Mark VI.
- Debidos a las investigaciones efectuadas, los contornos de igual sonoridad y ruidosidad son modificados para incorporarles los nuevos datos de sonoridad y ruidosidad.
- Al ser duplicada la magnitud percibida en sonos (sonoridad - ruidosidad) se acompaña ahora de un incremento de la señal de 9 dB en lugar del incremento de 10 dB usado antes.

- El factor de enmascaramiento F, en el proceso de cálculo va a variar con el nivel, en lugar de permanecer constante.

Método de cálculo.

El procedimiento de cálculo para el nivel percibido supone que la señal de ruido se ha medido en bandas de octava, con lo cual los niveles en cada banda se convierten a valores percibidos en sonos y a continuación encontrado se convierte a nivel percibido calculado en PLdB por medio de la función de potencia que relaciona la magnitud percibida con la presión sonora.

Procedimiento de cálculo:

- De la gráfica de la lámina 3.2 o de la tabla 3.6 PL-I, convertir el nivel de presión sonora de cada banda a la magnitud percibida en sonos (sonoridad - ruidosidad).
- Empleando la magnitud máxima percibida S_M , encontrar el factor F a partir de la tabla si se utilizan bandas de octava en. El análisis se resta 4.9 dB al nivel de la banda más sonora. Se determina así el valor en sonos correspondiente, el cual será usado para obtener el factor F. se duplica este valor y se usa para F.
- La magnitud total percibida en sonos se determina mediante la siguiente regla:

$$S_T = S_M + F \sum_{i=1}^n S_i - S_M$$

3.5

En donde:

S_T

Sonoridad total del ruido en sonos.

S_M

Sonoridad de la banda más sonora o máxima magnitud percibida.

F

Factor que varia con el nivel de SM.

$\sum_{i=1}^n S_i$

Magnitud percibida de la banda de frecuencia.

n es igual a 24 para mediciones de 1/3 de octava o igual a 6 para mediciones de banda de octava.

□ La magnitud total percibida puede convertirse a nivel percibido PLdB encontrando la ST en sonos en la columna de la tabla 3.8 PL-III, y relacionando la columna de la extrema izquierda con la banda del nivel de presión en dB.

Para niveles ST por arriba de 20 dB, el nivel percibido puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$PL = 32 + 9 \log_2 S_T$$

3.6

Ejemplo de aplicación.

El espectro de ruido producido por un avión que sobre vuela el punto de medición analizado en bandas de 1/3 de octava, reporta los siguientes valores, dados en la tabla calcúlese el nivel percibido en PLdB.

Frecuencia central de la banda de 1/3 de	Nivel de banda en dB	Magnitud percibida en sonos
--	----------------------	-----------------------------

octava en Hz		
50	75	1.66
63	80	5.05
80	70	2.81
100	70	3.56
125	80	11.50
160	85	20.20
200	90	33.30
250	85	25.40
315	80	19.40
400	80	21.80
500	80	21.80
630	85	32.00
800	85	32.00
1000	80	21.80
1250	85	32.00
1600	89	50.80
2000	95	94.10
2500	110	348.00
2150	95	128.00
4000	85	59.30
5000	90	87.10
6300	80	40.30
8000	75	27.40

10000	70	13.70
Tabla 3.9 Datos del ejemplo de aplicación		

$$S_i = 1132.98 \quad 1133 \text{ sonos}$$

$$S_T = 348 + 0.227(1133 - 348)$$

$$S_T = 526.2 \text{ sonos}$$

$$PL = 32 + 9 \log_2 526.2$$

$$PL = 32 + 9 \cdot 3.32 \log_{10} 526.2$$

$$PL = 32 + 29.9 \log_{10} 526.2$$

$$PL = 113.3 PL_{dB}$$

Nota: el valor de F permanece constante (F=0.227) por arriba de 219 sonos.