



Universidad Austral de Chile  
Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Acústica

Profesor Patrocinante  
Jorge Cárdenas Mansilla  
Instituto de Acústica  
Universidad Austral de Chile

Profesor Informante  
Alfio Yori Fernández  
Instituto de Acústica  
Universidad Austral de Chile

Profesor Informante  
George Sommerhoff Hyde  
Instituto de Acústica  
Universidad Austral de Chile

# **Sistemas de Audio Distribuido de Voltaje Constante**

Tesis presentada para optar al  
grado de Licenciado en Acústica y al  
título profesional de Ingeniero Acústico.

FRANCISCO JOSE TOLEDO RODRIGUEZ  
VALDIVIA – CHILE  
2005

## INDICE

<b>1. RESUMEN</b>	4
<b>1.1 SUMMARY</b>	4
<b>2. INTRODUCCION</b>	5
<b>3. OBJETIVOS GENERALES</b>	7
<b>3.1 Objetivos específicos</b>	7
<b>4. REVISION BIBLIOGRAFICA</b>	8
<b>4.1 Pérdida en cables</b>	8
<b>4.2 Transformadores</b>	13
<b>4.3 Sistemas de Voltaje Constante</b>	17
4.3.1 Funcionamiento de un Sistema de Voltaje Constante	17
4.3.2 Amplificador de Voltaje Constante	19
4.3.3 Altavoces	21
4.3.4 Desventajas de otros sistemas de audio	23
4.3.5 Ventajas de un Sistema de Voltaje Constante	23
4.3.6 Desventajas de un Sistema de Voltaje Constante	24
4.3.7 Funcionamiento de un transformador con diferentes Voltajes	25
4.3.8 Funcionamiento de un transformador con diferentes cargas	27
<b>4.4 Inteligibilidad de la palabra</b>	29
4.4.1 Pérdida de articulación de las consonantes	30
4.4.2 Causas que pueden reducir la inteligibilidad	32

<b>4.5 Decaimiento del sonido</b>	35
4.5.1 Decaimiento en campo libre	35
4.5.2 Decaimiento en una sala	36
<b>4.6 Cubrimiento de un Sistema de Audio</b>	37
4.6.1 Recintos Cerrados	38
4.6.1.1 Montaje en el Cielo	38
4.6.1.2 Montaje en las paredes	44
4.6.2 Recintos Abiertos	45
4.6.2.1 Arreglo Centralizado	45
4.6.2.2 Arreglo Descentralizado	46
<b>5. DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUDIO DISTRIBUIDO</b>	48
<b>5.1 Localización de los altavoces</b>	49
<b>5.2 Ruido de fondo</b>	51
<b>5.3 Tiempo de reverberación</b>	51
<b>5.4 Altavoces</b>	52
5.4.1 Respuesta de frecuencia	52
5.4.2 Nivel de presión sonora requerida	52
5.4.3 Patrón direccional	55
5.4.4 Otros parámetros a tomar en cuenta	56
5.4.5 Distribución Altavoces	56

<b>5.5 Amplificador</b>	59
5.5.1 Potencia consumida por los altavoces	59
5.5.2 Potencia amplificador	61
<b>5.6 Opciones de presupuestos</b>	66
<b>5.7 Discusión de resultados</b>	67
<b>6. CONCLUSIONES</b>	68
<b>7. BIBLIOGRAFIA</b>	70
<b>8. ANEXOS</b>	73

# **1. RESUMEN**

En el presente trabajo de tesis, se ha recopilado información de diferentes fuentes para comprender mejor los diversos elementos que componen el diseño de un sistema de audio distribuido, dando a conocer el funcionamiento de uno de los sistemas de audio más utilizados por los diseñadores en el mundo para cubrir grandes extensiones: Los Sistemas de Voltaje Constante.

Este trabajo se complementa con la realización de un diseño práctico de un Sistema de Audio Distribuido de 70 V, el que actualmente está en funcionamiento en el campus Isla Teja de la Universidad Austral de Chile

## **1.1 Summary**

In this thesis project, there has been gathered information from different sources for a better comprehension of the different elements that constitutes the design of the Distributed Audio Systems. It gives to know the performance of one of the most used audio systems for the designers of the world to cover great extension areas: The Constant Voltage Systems

This work is complemented with a practical design of a distributed audio system of 70 V, that is actually operating in the Campus Isla Teja of the Universidad Austral de Chile.

## 2. INTRODUCCION

Aunque el Sistema de Voltaje Constante es el método más utilizados por los ingenieros para lograr sistemas de audio distribuido eficientes, es difícil encontrar un libro que explique su funcionamiento en forma extensa, encontrando en la mayoría de la literatura solo reseñas vagas, dejando gran cantidad de interrogantes sobre los sistemas de audio que utilizan este método. Por eso, en este trabajo se ha recopilado material de diferentes textos para comprender su funcionamiento.

Ochenta años atrás los ingenieros se podían encontrar con grandes complicaciones al momento de diseñar un Sistema de Audio Distribuido. El diseño de este sistema era complejo producto de la gran cantidad de altavoces que se conectan a la línea, lo que implicaba un tedioso trabajo al momento de calcular el valor de la impedancia de carga, de tal forma que ésta no adoptara un valor demasiado pequeño y dañara el amplificador de potencia. Además, muchas veces la línea de potencia tenía que recorrer grandes distancias desde el amplificador hasta el último altavoz, por lo que era necesario invertir mucho dinero en un buen cable de audio para evitar excesiva pérdida de potencia. La necesidad de minimizar costos, maximizar la eficiencia, y simplificar el diseño de complejos sistemas de audio dio como resultado los Sistemas Distribuidos de Voltaje Constante

Por los años 30 se comenzó a utilizar los Sistemas de Voltaje Constante, los que eliminan los problemas de exceso de pérdida de potencia en la línea y la complejidad de cálculo que implica la impedancia de carga. Estos sistemas tomaron de base para su desarrollo, el método que utilizan (hasta hoy en día) las grandes compañías de electricidad para trasladar energía entre lugares lejanos. Esto se logra aprovechando las propiedades que poseen los transformadores, de manera de usar sus características en beneficio de la distribución de potencia.

Los Sistemas Distribuidos de Voltaje Constante se utilizan para el refuerzo sonoro de lugares públicos, donde la necesidad de cubrir grandes extensiones de área no puede ser realizada por otros sistemas de audio en forma tan eficiente. Normalmente estos sistemas son instalados en Hipermercados, Centros Comerciales, Estadios y Aeropuertos. Es común que en estos lugares los sistemas de audio se utilicen para reproducir mensajes de voz y/o música ambiental.

Para satisfacer las exigencias que impone el mercado, un buen sistema de audio distribuido tiene que cumplir con ciertas características que el ingeniero debe considerar en el proceso de diseño: cubrir en forma uniforme la mayor cantidad de área del recinto, poseer un grado de inteligibilidad alto, no producir molestias y ser económico

Al momento del diseño, es importante que el ingeniero no solo considere las características que poseen los equipos de audio, sino que además tome en cuenta las propiedades acústicas del recinto donde se desea instalar el sistema. Hay que considerar, especialmente en la reproducción de la voz, que existen distintos parámetros de la acústica de locales que afectan en mayor o menor medida la inteligibilidad.

Hoy en día, en muchos lugares públicos existen sistemas de audio de mala calidad, los que se destacan por poseer una inteligibilidad pobre. Esto puede ser producto de una gran cantidad de factores, como son las características de los equipos utilizados y la acústica del recinto. Muchas veces los diseños se ven empobrecidos debido a la carencia de financiamiento, lo que se puede ver reflejado en la clase y/o cantidad de equipos adquiridos. Por eso es importante lograr un sistema equilibrado entre los diferentes componentes, de manera de maximizar los recursos y obtener un resultado óptimo.

### **3. OBJETIVOS GENERALES**

El principal objetivo de este trabajo es diseñar e instalar un Sistema de Audio Distribuido, utilizando el método de voltaje constante de 70 V.

#### **3.1 Objetivos Específicos**

- Describir los diversos elementos que componen los sistemas de audio distribuidos
- Crear un documento sobre uso y funcionamiento de Sistemas de Voltaje Constante
- Instalar un sistema de refuerzo sonoro, distribuido en distintos puntos del Campus Isla Teja de la Universidad Austral de Chile.
- Obtener un documento que sirva de apoyo para el diseño de sistemas de audio distribuido.

## 4. REVISION BIBLIOGRAFICA

### 4.1 Pérdida en cables

Una práctica común en sistemas de sonido es tratar de localizar los amplificadores de potencia lo más cercano a los altavoces como sea posible. Con esta medida se busca minimizar la pérdida de potencia que se produce en los cables de la línea, pero en algunas aplicaciones esto no es posible de realizar, por lo que el ingeniero debe considerar la pérdida que se produce a lo largo de la línea<sup>[1]</sup>.

Para comprender un poco mejor el origen de esta pérdida hay que considerar que todos los cables poseen resistencia, capacitancia e inductancia propia, afectando cada uno en mayor o menor medida a la disipación de energía, sin embargo en la práctica solo se toma en cuenta la resistencia al momento de calcular la pérdida. Los cables empleados como conductores eléctricos son fabricados de acuerdo a normas y especificaciones bien definidas, siendo en Estados Unidos creada la tabla A.W.G. (American Wire Gauge). En esta tabla de calibres se encuentra información de mucha utilidad para los diseñadores de sistemas de sonido. Por comodidad, se acostumbra en este sistema designar los conductores por medio de números; el mayor calibre comercial que se puede encontrar es el N° 0000. Le sigue el N° 000, el 00 y el N° 0; y luego continúa la sucesión comenzando por N° 1 y continuando hasta el N° 46. Hay que considerar, para que no exista confusión, que los números mayores representan secciones menores. Los diversos calibres utilizados han sido normados de manera que las secciones transversales sucesivas se diferencien en un factor de 1.26 aproximadamente<sup>[2]</sup>.

La resistencia de los conductores eléctricos depende de su temperatura, siendo ese el motivo por que se especifica la temperatura (20°C) en la Tabla 4.1. A medida que la temperatura aumenta, la resistencia de los conductores también aumenta<sup>[2]</sup>.

AWG N°	Diámetro (mm)	Sección (mm <sup>2</sup> )	Ohm por 300 m a 20° C
10	2,59	5,34	1
11	2,30	4,16	1,2
12	2,05	3,30	1,6
13	1,83	2,64	2
14	1,63	2,09	2,5
15	1,45	1,65	3
16	1,29	1,31	4
17	1,15	1,04	5
18	1,02	0,816	6,3
19	0,912	0,665	8
20	0,813	0,504	10

**Tabla 4.1: Resistencia alambre de cobre (American Wire Gauge)**

La tabla AWG es de gran importancia, ya que gracias a ella es posible conocer las características eléctricas de cada cable. Pero toda esta información es inútil si no se puede relacionar con la pérdida de potencia, por lo que es necesario encontrar una ecuación que relacione la pérdida en la línea con la impedancia del cable.

Para calcular la pérdida que se produce en una línea, se utilizará el siguiente circuito eléctrico, en el cual no existe pérdida en la línea:



**Fig. 4.1: Amplificador-carga**

La potencia disipada en la carga de la figura 4.1 es:

$$P_1 = \frac{V_0^2}{R_L} \quad (4.1)$$

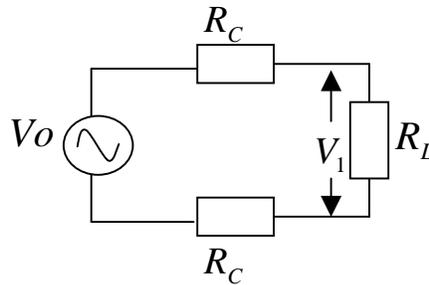
Donde:

$P_1$ : Potencia disipada en la carga (W)

$V_0$ : Voltaje Fuente = Voltaje en la carga (V)

$R_L$ : Impedancia de carga ( $\Omega$ )

Agregando al circuito anterior la resistencia del cable:



**Fig. 4.2: Amplificador-carga-línea**

La nueva potencia disipada en la carga es:

$$P_2 = \frac{V_0^2 \times R_L}{(R_L + 2R_C)^2} \quad (4.2)$$

Donde:

$P_2$ : Nueva potencia disipada en la carga (W)

$V_0$ : Voltaje fuente (V)

$R_C$ : Impedancia del cable ( $\Omega$ )

$R_L$ : Impedancia de carga ( $\Omega$ )

La pérdida debido al cable será:

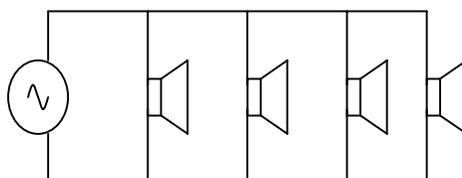
$$\begin{aligned} \text{Pérdida(dB)} &= 10 \log \left[ \frac{P_1}{P_2} \right] \\ \text{Pérdida(dB)} &= 20 \log \left[ \frac{R_L + 2R_C}{R_L} \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Es importante notar que hay dos fuentes de pérdida en la ecuación 4.3, una pérdida debida a la resistencia del cable mismo y otra debido al cambio que se produce en la impedancia de carga conectada al amplificador<sup>[1]</sup>. Hay que tomar en cuenta, que el funcionamiento de los amplificadores depende del valor de la carga que se les conecte.

Usando la ecuación 4.3, es posible ejemplificar mejor la cantidad de potencia que se puede perder en una línea de potencia por elegir un cable inadecuado.

**Ejemplo:**

Se instala un sistema de sonido que consta de un amplificador, 4 altavoces con una impedancia de 4 Ω cada uno y un cable de 75 m de largo. Se conectan los 4 altavoces al amplificador en paralelo en la línea como se muestra en el siguiente diagrama:



**Fig. 4.3: Altavoces conectados en paralelo**

Se escoge un cable AWG N°16 para conectar los altavoces al amplificador. Según la tabla 4.1 el cable posee una resistencia de 4 Ω por cada 300 metros. Como la línea recorre una distancia menor y la resistencia es proporcional a su largo, se determina el valor de la resistencia con 75 m como se muestra a continuación:

$$\frac{R_C}{75} = \frac{4}{300} \Rightarrow R_C = 1\Omega$$

Como los cuatro altavoces son conectados en paralelo, la impedancia de carga que se produce por la suma de ellos es:

$$\frac{1}{R_L} = \frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{1}{8} \Rightarrow R_L = 2\Omega$$

Determinado el valor de la impedancia de carga y del cable, es posible calcular la pérdida, reemplazando los valores obtenidos en la ecuación 4.3:

$$\text{Pérdida(dB)} = 20 \log \left[ \frac{2\Omega + 2 \times 1\Omega}{2\Omega} \right]$$

$$\text{Pérdida (dB)} = 6 \text{ dB}$$

Revisando el ejemplo, se puede observar que la pérdida de potencia que se produce es de 6 dB, lo que equivale a  $\frac{3}{4}$  de la potencia total del amplificador. Evidentemente este valor no es despreciable, por lo que se tiene que tomar en cuenta al momento del diseño.

Desde un punto más práctico en el caso de un sistema de sonido, se puede decir que la pérdida en la línea dependerá de:

- **Cantidad de altavoces que se conectan al amplificador:** A mayor cantidad de altavoces conectados en paralelo se tendrá una mayor pérdida de potencia. Esto se produce porque la impedancia de carga disminuye y por consiguiente la razón entre la impedancia del cable y de carga aumenta.
- **Cable A.W.G utilizado:** Como lo muestran las tablas de la American Wire Gauge, a mayor número A.W.G. mayor resistencia del cable. Es normal tratar de utilizar cables con la menor resistencia posible, pero la diferencia de valor comercial entre un calibre y otro es notoria cuando se usa en grandes cantidades.
- **Longitud de la línea:** La resistencia del cable aumenta con su longitud. Si se tiene una gran distancia entre el amplificador y el último altavoz de la línea, la resistencia de la línea será alta. Ese es el motivo por que se recomienda que los parlantes estén lo más cercano a los amplificadores. Además, la impedancia de carga total conectada al amplificador aumentará, por lo que entregará menor potencia.

## 4.2 Transformadores

Un transformador es un dispositivo que consta de una o más bobinas devanadas sobre un núcleo de material magnético. Los transformadores diseñados para audio difieren en algunas de sus características con los transformadores usados para alimentación. Un transformador de alimentación está diseñado para trabajar en una sola frecuencia o en un pequeño margen de frecuencias, en cambio los transformadores de audio deben trabajar en un gran margen de frecuencias (20 Hz a 20 KHz), e incluso muchos transformadores de audio se diseñan para trabajar en un margen de 20 Hz a 200 KHz. Estas características de frecuencia tan amplia requieren un diseño cuidadoso de las bobinas, su conexión y el material para impregnar devanados, así como el tipo de núcleo y el método de enchapado<sup>[3]</sup>.

En audio los transformadores se usan generalmente para transferir energía de un circuito a otro. Debido a que la mayoría de las veces estos difieren su impedancia, es necesario igualarla si se quiere obtener la máxima transferencia de energía. Por eso la relación de espiras del transformador debe ser tal que proporcione una adaptación de impedancia entre los circuitos (fuente y carga). Además la relación del número de espiras entre la bobina primaria y la secundaria permite determinar la relación de tensión y corriente.

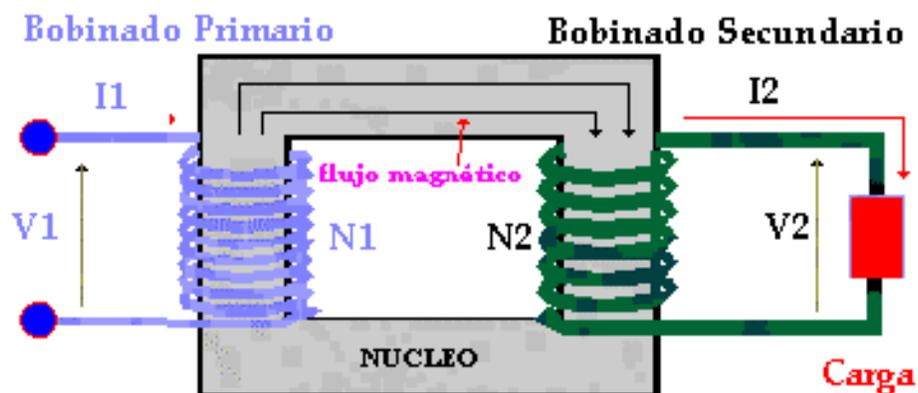


Fig. 4.4: Diagrama de un transformador ideal

Para presentar ciertos conceptos útiles se usará el transformador ideal, el cual se define como un transformador que (1) no tenga pérdida de potencia, (2) tenga un coeficiente de acoplamiento unitario, y (3) tenga una permeabilidad en el núcleo que sea muy grande<sup>[4]</sup>.

De estas suposiciones e idealizaciones, se pueden obtener las siguientes relaciones:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.4)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4.5)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (4.6)$$

Donde:

$V_1$ : Voltaje de entrada del transformador (V)

$V_2$ : Voltaje de salida del transformador (V)

$I_1$ : Corriente de entrada del amplificador (A)

$I_2$ : Corriente de salida del amplificador (A)

$N_1$ : Enbobinado del primario (Nº vueltas)

$N_2$ : Enbobinado del secundario (Nº vueltas)

Dividiendo la ecuación 4.4 por la 4.5:

$$\frac{V_1}{I_1} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \times \frac{V_2}{I_2} \quad (4.7)$$

La relación entre  $V_2/I_2$  es igual a  $Z_L$ , por lo tanto:

$$Z_S = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \times Z_L \quad (4.8)$$

De las ecuaciones anteriores, se observa que el funcionamiento del transformador depende de la relación de su número de espiras. Entonces existirán tres casos:

- $N_1 < N_2$ : El número de espiras en el primario es menor al número de espiras del secundario, entonces el voltaje aumenta y la corriente disminuye, lo que es llamado transformador elevador.
- $N_1 > N_2$ : El número de espiras en el primario es mayor al número de espiras del secundario, entonces el voltaje disminuye y la corriente aumenta, lo que es llamado transformador reductor.
- $N_1 = N_2$ : El número de espiras en el primario es igual al número de espiras del secundario, por lo tanto el voltaje y la corriente se mantienen constante en su salida.

Como se aprecia en la ecuación 4.8, los transformadores tienen la capacidad de igualar la impedancia entre dos circuitos electrónicos, lo que normalmente se utiliza para poder transferir el máximo de energía de un dispositivo a otro. En un transformador bien diseñado la relación de impedancia debe mantenerse a través del rango de frecuencias de interés.

Otra característica importante del transformador es su capacidad para aislar eléctricamente, ya que no deja circular corriente continua. Esto se debe a que el transformador funciona con la variación de flujo de la corriente, siendo la variación de esta en el primario la que da como resultado una corriente inducida en el secundario. Como la corriente continua se

caracteriza por no tener variación de flujo, entonces no existirá corriente inducida en el secundario.

La potencia que se presenta en los terminales de entrada de un transformador se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_1 = V_1 \times I_1 \quad (4.9)$$

Si se asocia la ecuación 4.9 con la ecuación 4.6, es posible notar que la potencia de entrada de un transformador (ideal) es igual a la que se presenta en su salida, independiente de sí el voltaje o la corriente cambian, la razón siempre se mantiene constante.

Tomando en cuenta que en la operación de un transformador real como en cualquier dispositivo o sistema físico pasivo se requiere más potencia en las terminales de entrada que las que se obtiene en las terminales de salida. La diferencia entre la potencia de salida y de entrada es lo que se llama Pérdida de Potencia. Esta Pérdida varía entre distintos transformadores, la cual puede ir de 0,5 dB en buenos transformadores a 3 dB en transformadores de mala calidad<sup>[5]</sup>.

Los transformadores utilizados en sistemas de audio pueden especificar de dos maneras la potencia que consumen. Puede ser especificada como la potencia que el transformador consume de la fuente o como la potencia que entrega el transformador en su salida. En el primer caso, la potencia que consume el transformador es la potencia señalada en sus especificaciones, pero la potencia que entrega en su salida es la indicada menos su pérdida por inserción. En el segundo caso, la potencia que tomará el transformador es la señalada en sus especificaciones más su pérdida por inserción, y la potencia que entregará en su salida es la que se indica en sus especificaciones.

### **4.3 Sistema de Voltaje Constante**

Es común que en lugares públicos se utilicen sistemas de sonido para reproducir música de fondo y/o mensajes de voz, de manera que cubran en forma uniforme áreas de gran extensión. Esto no puede ser realizado en forma eficiente por sistemas convencionales de audio, debido al gran costo que significa y a su complejidad al momento del diseño.

Los sistemas de voltaje constante fueron creados con el propósito de poder conectar altavoces a una gran distancia del amplificador y/o conectar una gran cantidad de altavoces a un solo amplificador. Fueron desarrollados para permitir un diseño e instalación fácil de cualquier sistema de sonido distribuido, siendo los más comunes los de 25 V, 70.7 V y 100 V. La gran mayoría de los sistemas de distribución fabricados en Estados Unidos hacen empleo de líneas de 70.7 V, en cambio en Europa son más comunes las líneas de 100 V<sup>[1]</sup>.

Los Sistemas de Voltaje Constante se comenzaron a dar a conocer a fines de 1920 y a comienzos de 1930, siendo tomado este sistema de distribución como estándar en Estados Unidos por la "American Radio Manufacturers Assosiation" recién en Julio de 1949<sup>[6]</sup>.

El valor de 70,7 V proviene originalmente del hecho de abaratar costos. En la década del 40 en Estados Unidos se especificaba que todo voltaje sobre los 100 V peak creaba un riesgo de choque eléctrico, por lo que las líneas de potencia debían ir al interior de conductos, encareciendo excesivamente la instalación de los sistemas de voltaje constante. Por ese motivo se empezó a utilizar 70,7 Vrms, ya que su valor peak de 100 V era el valor máximo que se podía usar sin la utilización de conductos<sup>[6]</sup>.

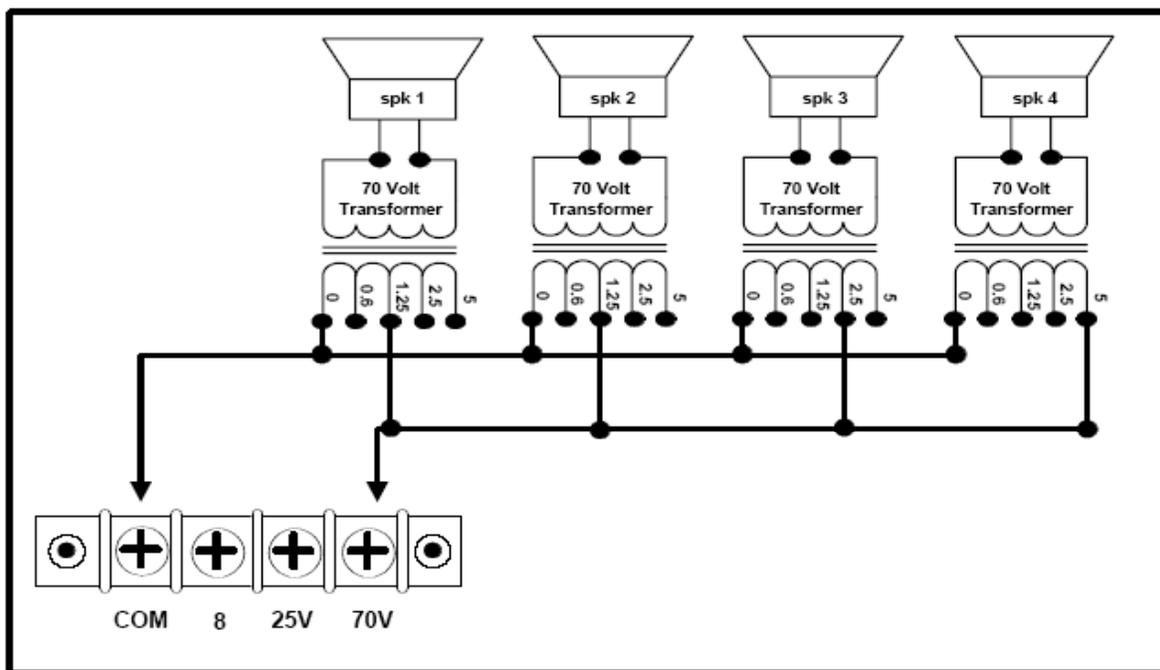
#### **4.3.1 Funcionamiento de un Sistema de Voltaje Constante**

Las empresas de energía eléctrica desarrollaron una excelente idea para disminuir la pérdida de potencia en las líneas de energía, la cual ha sido aplicada al audio. Cuando trasladan energía de un lugar a otro, atravesando cientos de kilómetros de cable, minimizan la pérdida de potencia - producto de la resistencia del cable - elevando el voltaje y

disminuyendo la corriente. Ellos resolvieron el mismo problema de distribución, pero entendiendo bien que lo que realmente querían distribuir era potencia y no voltaje<sup>[6]</sup>. Como el valor de la potencia no cambia con las variaciones de los valores del voltaje y la corriente, siempre que se mantenga su razón, se pueden variar sus valores sin producir cambios en el valor de la potencia. Por ejemplo, 100 W son siempre 100 W, si uno recibe 10 V y 10 A, en términos de potencia va a ser lo mismo recibir 100 V y 1 A.

La idea de las compañías eléctricas, fue utilizar un transformador elevador en la estación generadora y luego un transformador reductor en el lugar receptor de la energía. Esto reduce la pérdida de potencia, debido a que la pérdida se produce por la resistencia que presenta el conductor al paso de la corriente, aumentando la pérdida con el cuadrado de la corriente.

La misma solución fue aplicada al audio, con el nombre de **Sistema de Voltaje Constante**. En forma análoga a lo que hicieron las compañías eléctricas, en este sistema se le acopla un transformador elevador a la salida del amplificador (estación generadora) y un transformador reductor en la entrada de cada altavoz (estación reductora).



**Fig. 4.5: Diagrama de un Sistema de Voltaje Constante de 70 V**

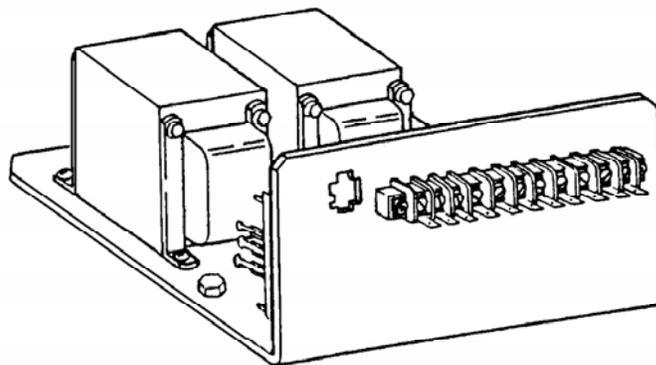
### 4.3.2 Amplificador de voltaje constante

Los amplificadores de voltaje constante no desarrollan siempre un voltaje constante en su salida como se podría pensar, por lo que el término “voltaje constante” puede ser confuso. Lo que en verdad sucede es que el amplificador desarrolla el voltaje indicado en sus especificaciones cuando entrega toda la potencia en su salida. Por ejemplo un amplificador de voltaje constante de 70.7 V funciona a ese voltaje cuando opera con todo su poder, por lo que el término más correcto podría ser “amplificador de alto voltaje”.

Se debe considerar, por ejemplo en el caso de un amplificador de 70.7 V, que el amplificador puede alcanzar un nivel máximo de 100 V peak en su salida, por lo que el término 70.7 V se refiere a un valor RMS (valor efectivo), pero es comúnmente llamado amplificador de 70 V.

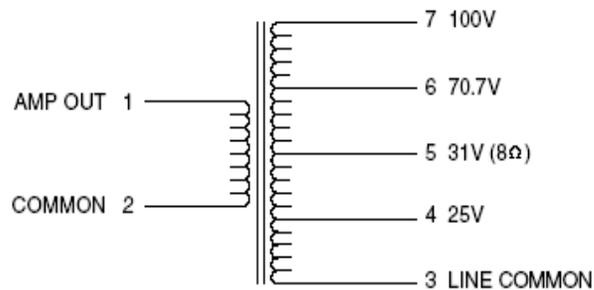
Los amplificadores de voltaje constante utilizan un transformador elevador acoplado a su salida. Gracias a esto se logra disminuir la corriente que circula en la línea, obteniendo como resultado una pérdida mucho menor.

Los amplificadores diseñados para funcionar en sistemas de voltaje constante cuentan con su propio transformador elevador acoplado internamente a la salida de potencia, por lo que no es necesario conectar un transformador externo al amplificador.



**Fig. 4.6: Transformador acoplado internamente a la salida de un amplificador**

En caso de utilizar un amplificador de potencia que no ha sido diseñado para funcionar en un sistema de voltaje constante, es necesario acoplarle un transformador elevador a su salida en forma externa. Los transformadores que se utilizan para esto, son transformadores que están especialmente diseñados para esta función, los que se caracterizan por tener varios terminales de salida, cada uno destinado para un voltaje constante diferente.



**Fig. 4.7: Diagrama de un transformador acoplado en la salida de un amplificador**

Normalmente en los amplificadores de voltaje constante se puede seleccionar el voltaje en el que se desea que trabajen. Los más comunes son 25 V, 70.7 V, 100 V, además de poseer una salida para conectar cargas de  $8\Omega$ . Esto se puede apreciar en la fig. 4.6 y 4.7, donde se muestran la salida de un amplificador con transformador acoplado internamente y otro en forma externa.

Se debe considerar, que el voltaje de salida será el mismo para amplificadores de voltajes iguales pero de potencias distintas. Esto quiere decir, que si se tiene diferentes amplificadores que entregan potencias distintas - por ejemplo uno de 500 W, otro de 100 W y uno de 10 W – pero diseñados para un mismo voltaje - por ejemplo 70 V - el voltaje máximo que presentará cada uno en su salida será 70 V.

### 4.3.3 Altavoces

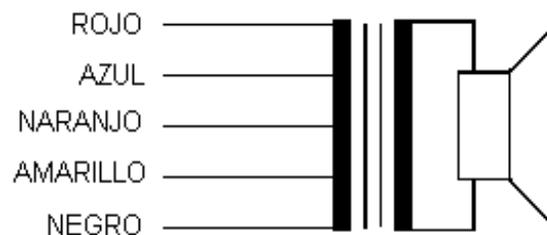
Hay que considerar que el voltaje que circula por la línea es alto, por lo que nunca se debe conectar altavoces directamente si no poseen un transformador acoplado a su entrada. Por eso en el mercado existen altavoces que poseen un transformador interno conectado a su entrada, pero en caso de conectar un altavoz normal a la línea de voltaje constante será necesario acoplarle un transformador apropiado en su entrada.



**Fig. 4.8: Altavoz con un transformador acoplado**

Los transformadores acoplados a los altavoces poseen varios terminales (o taps), cada uno de diferente color. Cada uno de los taps posee características propias en cuanto a la potencia que consumen y su impedancia.

Por ejemplo, en el caso de dos altavoces que están a la venta en el comercio.



**Fig. 4.9: Diagrama altavoz marca Penton**

Color Tap	CAD10T		CAD20T	
	Impedancia ( $\Omega$ )	Potencia Aceptada (W)	Impedancia ( $\Omega$ )	Potencia Aceptada (W)
Rojo	500	10 W	250	20 W
Azul	1 k	5 W	500	10 W
Naranja	2 k	2.5 W	1 k	5 W
Amarillo	4 k	1.25 W	2 k	2.5 W
Negro	-	Común	-	Común

**Tabla 4.2: Especificaciones altavoces Penton para 70.7 V**

Observando la tabla 4.2, se concluye que a medida que el transformador del altavoz consume más potencia, su impedancia disminuye. Esto se debe a que la relación entre las espiras del transformador cambia para cada tap de potencia.

Cada terminal del altavoz indica la máxima potencia que consumirá el transformador. En el caso del tap que acepta mayor potencia (de color rojo en este caso), indica además la máxima potencia con que puede trabajar el transformador.

Los taps de los transformadores son muy útiles, ya que permiten escoger la máxima potencia entregada a cada altavoz en forma independiente. De esta manera se pueden ajustar los niveles de presión sonora máximos de los altavoces conectados a una misma línea en forma individual.

#### **4.3.4 Desventajas de otros sistemas de audio**

Los sistemas de conexión directa tienen diversas desventajas respecto a un sistema de voltaje constante. Algunas de ellas son:

- Si el común de los cables del altavoz hace corto a tierra, la conexión directa puede producir un loop de tierra y producir zumbido.
- Usualmente solo unos pocos altavoces pueden ser conectados al amplificador sin bajar la impedancia de carga más de lo indicado en sus especificaciones.
- Cables muy grandes (AWG 12 o menor) son necesarios para no producir una pérdida alta.
- El cableado directo no puede ser usado efectivamente cuando los altavoces se encuentran localizados a una gran distancia del amplificador, producto de la pérdida que se produce en la línea.

#### **4.3.5 Ventajas de un Sistema de Voltaje Constante**

Los sistemas de voltaje constante tienen muchas ventajas respecto a los otros sistemas:

- La salida del amplificador está acoplada a un transformador, así que hay aislamiento entre la línea de altavoces y el amplificador. Esto es por que los transformadores no transmiten la corriente continua que se puede producir.
- Una gran cantidad de altavoces pueden ser conectados a un mismo amplificador sin sobrecargarlo.

- La potencia entregada a cada altavoz puede ser ajustada individualmente por medio de los taps que posee cada uno de los transformadores.
- Pueden ser usados cables pequeños entre el amplificador y los transformadores, ya que se produce menos pérdida en la línea.
- Altavoces con transformador pueden ser conectados a la línea de voltaje constante en cualquier punto entre el amplificador y el último altavoz, sin bajar la impedancia más de lo recomendado.

#### **4.3.6 Desventajas de sistemas de voltaje constante**

Los Sistemas de Voltaje Constante también poseen algunos inconvenientes:

- La respuesta frecuencia de los transformadores es limitada.
- Los transformadores usualmente absorben excesiva potencia en el extremo más bajo de su respuesta de frecuencia.
- Muchas veces es necesario montar transformadores externos, lo que implica que dos conexiones extras deben hacerse durante la instalación
- Los transformadores pueden ser conectados invertidos, cargando excesivamente el amplificador.
- Todos los transformadores tienen pérdida por inserción.

### **4.3.7 Funcionamiento de un transformador con diferentes voltajes**

Un transformador diseñado para un Sistema de Voltaje Constante específico, también pueden ser usado en sistemas que utilicen mayor o menor voltaje. Evidentemente no va a funcionar de la misma manera cómo funcionaría en el sistema para el que fue diseñado.

Muchos transformadores indican en sus especificaciones el funcionamiento que tendrán en los diferentes voltajes, pero hay otros tantos que no lo indican, por lo que se debe tomar en cuenta algunas correcciones y precauciones, las que se pueden calcular de manera muy sencilla (ver anexo 1).

- **Transformador para sistema de 25 V:**

- En un sistema de 70 V el transformador consumirá 8 veces la potencia indicada en sus especificaciones.
- En un sistema de 100 V el transformador consumirá 16 veces la potencia indicada en sus especificaciones.

- **Transformador para sistema de 70.7 V:**

- En un sistema de 25 V el transformador consumirá 1/8 de la potencia indicada en sus especificaciones
- En un sistema de 100 V el transformador consumirá 2 veces la potencia indicada en sus especificaciones.

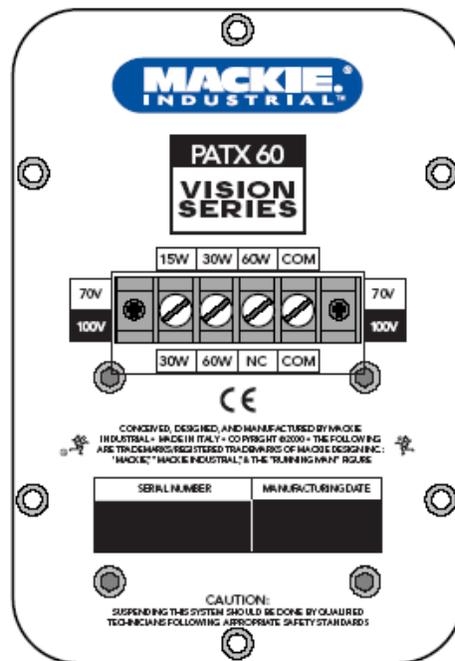
- **Transformador para sistema de 100 V:**

- En un sistema de 25 V el transformador consumirá 1/16 veces la potencia indicada en sus especificaciones.
- En un sistema de 70 V el transformador consumirá 1/2 veces la potencia indicada en sus especificaciones.

**PRECAUCION:**

- La potencia que consume el transformador de la línea no debe exceder por ningún motivo la potencia máxima indicada en el transformador.

Existen en el mercado, Transformadores que en sus especificaciones indican su funcionamiento para distintos sistemas de voltaje constante. Un ejemplo es el transformador Mackie PATX60, que muestra en sus especificaciones como se comporta en sistemas de 70V y 100V.



**Fig. 4.10: Transformador mackie PATX60**

### 4.3.8 Funcionamiento de un transformador con diferentes cargas

En muchos casos se debe acoplar un transformador externo a un altavoz común, por lo que se debe tomar en cuenta el valor de la impedancia del altavoz para determinar el funcionamiento que presentará el transformador. Los transformadores a veces no indican en sus especificaciones su funcionamiento con diferentes cargas, por lo que se debe determinar los cambios que sufrirá el transformador (ver anexo 2).

- **Transformador con un secundario de  $2\Omega$**

- i) Conectando un altavoz de  $2\ \Omega$  al secundario, el transformador consumirá la potencia indicada en sus especificaciones.
- ii) Conectando un altavoz de  $4\ \Omega$  al secundario, el transformador consumirá  $\frac{1}{2}$  de la potencia indicada en sus especificaciones.
- iii) Conectando un altavoz de  $8\ \Omega$  al secundario, el transformador consumirá  $\frac{1}{4}$  de la potencia indicada en sus especificaciones.

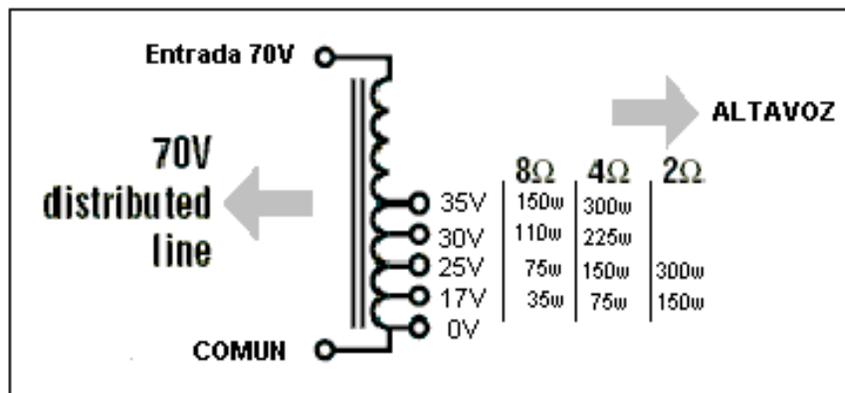
- **Transformador con un secundario de  $4\Omega$**

- i) Conectando un altavoz de  $2\ \Omega$  al secundario, el transformador consumirá 2 veces la potencia indicada en sus especificaciones.
- ii) Conectando un altavoz de  $4\ \Omega$  al secundario, el transformador consumirá la potencia indicada en sus especificaciones.
- iii) Conectando un altavoz de  $8\ \Omega$  al secundario, el transformador consumirá  $\frac{1}{2}$  de la potencia indicada en sus especificaciones.

- **Transformador con un secundario de 8 Ω**

- Conectando un altavoz de 2 Ω al secundario, el transformador consumirá 4 veces la potencia indicada en sus especificaciones.
- Conectando un altavoz de 4 Ω al secundario, el transformador consumirá 2 veces la potencia indicada en sus especificaciones.
- Conectando un altavoz de 8 Ω al secundario, el transformador consumirá la potencia indicada en sus especificaciones

La figura 4.11 muestra el diagrama del transformador marca QSC, modelo OT300a. Este diagrama indica el diferente funcionamiento que tendrá el transformador con distintas cargas.



**Fig. 4.11:Diagrama transformador QSC OT300a**

**PRECAUCION:**

- La potencia que consume el transformador de la línea de potencia no debe exceder por ningún motivo la potencia máxima indicada en el transformador.

## 4.4 Inteligibilidad de la palabra

La inteligibilidad de la palabra se puede definir como el grado con el cual las personas pueden descifrar el mensaje de un orador<sup>[8]</sup>, siendo uno de los parámetros que más se relaciona con el diseño de un sistema de audio, por lo que es importante ser capaz de predecirla antes de la implementación.

Hay que tomar en cuenta que existe una importante diferencia entre la música y la palabra. El cerebro tiene la capacidad de completar una buena porción de la información perdida cuando se escucha música, pues hay un alto grado de redundancia, en cambio el lenguaje hablado es muy rico en información continuamente cambiante, por lo que existe menos redundancia que en la música. Basta que un pequeño porcentaje de información se pierda o se distorsione para que el cerebro le resulte difícil descifrar el mensaje. Por eso los sistemas de audio destinados a la reproducción de la palabra están sujetos a requerimientos más rigurosos que aquellos destinados a reproducir música solamente<sup>[8]</sup>.

La pérdida de articulación de las consonantes de la palabra (%Alcons) es una de las formas de cuantificar la inteligibilidad más conocidas, la que expresa el valor de la pérdida como un porcentaje.

Victor Peutz investigó los distintos parámetros que afecta la inteligibilidad, llegando a la conclusión que ésta se ve afectada principalmente por el tiempo de reverberación, ruido de fondo y la distancia crítica, publicando los resultados de su investigación en el paper “Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room” en el año 1971 en el Journal Audio Engineering Society.

Se debe considerar, que la pérdida de inteligibilidad dependerá tanto de la capacidad de articulación del orador como de la capacidad de audición de los auditores. Por eso Peutz en su estudio clasificó los oyentes en buenos y malos, al igual que los oradores.

#### 4.4.1 Pérdida de articulación de las consonantes

La fórmula que presenta Peutz para calcular la pérdida de articulación de las consonantes como porcentaje es:

$$\%AL_{CONS} = \frac{656D_2^2 T_{60}^2}{VQM} \quad (4.10)$$

Donde:

$D_2$ : Distancia desde el altavoz al auditor más lejano (pies)

$T_{60}$ : Tiempo de reverberación (seg)

V: Volumen de la habitación (pies cúbicos)

Q: Directividad orador o altavoz

M: es la  $D_C$  modificada (normalmente toma el valor 1)

La inteligibilidad ha sido clasificada según el valor del porcentaje de Alcons. Según Peutz, los porcentajes límites para pasar de un estado a otro son:

- **%Alcons <10 %**  $\Rightarrow$  Inteligibilidad muy buena
- **10 % < %Alcons <15 %**  $\Rightarrow$  Inteligibilidad buena, pero si el mensaje es complicado y el orador o auditor no son buenos, la inteligibilidad será deficiente.
- **%Alcons > 15 %**  $\Rightarrow$  La inteligibilidad sólo será suficiente para buenos auditores con buenos altavoces y/o mensajes

Comparando el método de Peutz con datos conocidos de muchas instalaciones, un %Alcons de un 15 % es considerado como un valor límite para un trabajo práctico<sup>[9]</sup>.

Se puede apreciar que la ecuación que propuso Peutz no considera el ruido de fondo. Para corregir esto se puede usar el gráfico de la Fig. 4.14, el que muestra la Alcons en función del  $T_{60}$  y la relación señal ruido (S/N).

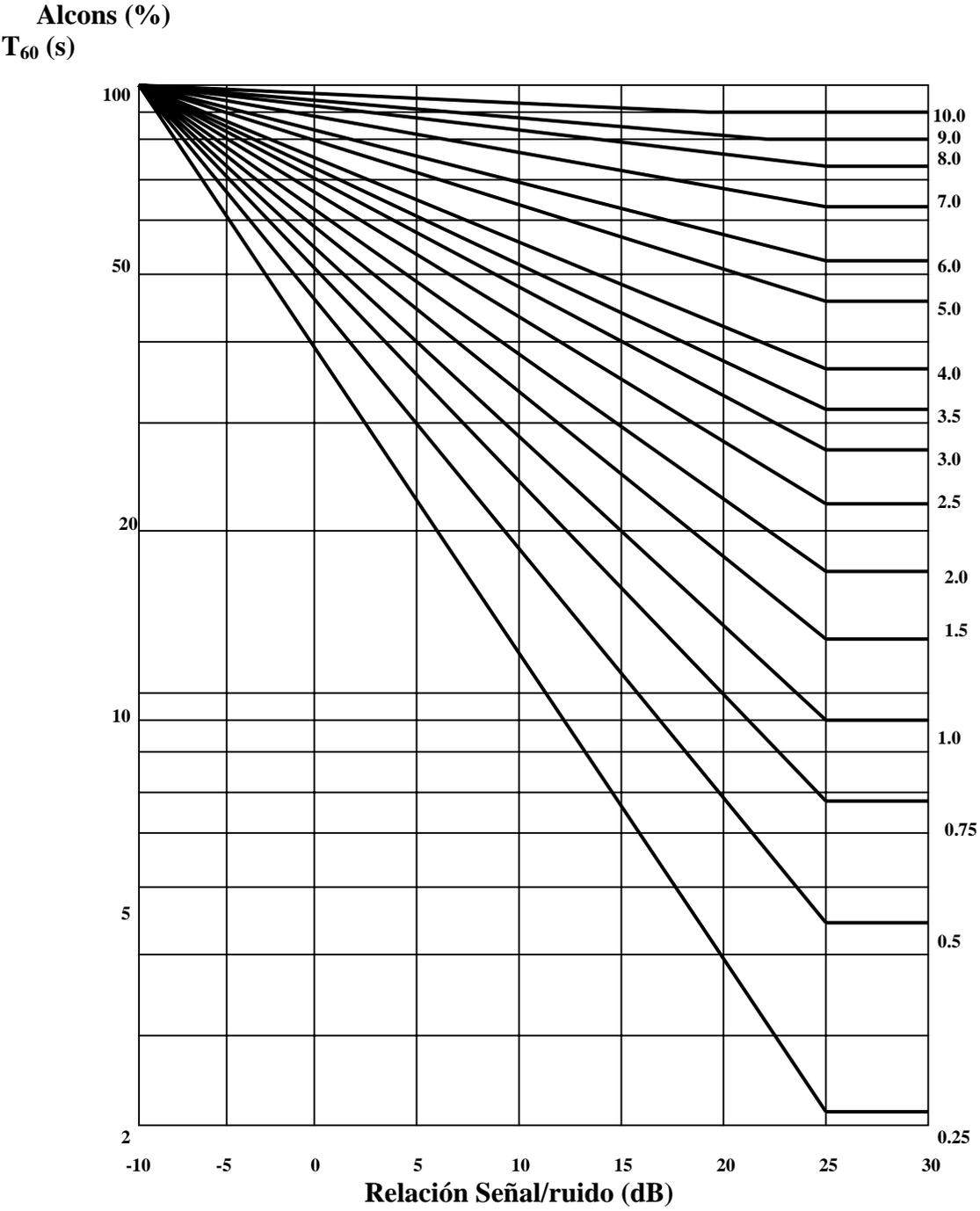


Fig. 4.12: Efecto de la Señal/ruido en la Alcons <sup>[9]</sup>

Como la inteligibilidad de la palabra depende directamente del tiempo de reverberación, la tabla 4.6 indica la inteligibilidad que se puede lograr con diferentes  $T_{60}$ , la que se muestra a continuación.

<b>Tiempo de Reverberación</b>	<b>Características</b>
< 1 Segundo	Se puede lograr una excelente inteligibilidad
1 - 1,2 Segundos	Se puede conseguir una inteligibilidad de Excelente a buena
1,2 – 1,5 Segundos	Una buena inteligibilidad se puede lograr, pero el tipo de altavoz y su localización son importantes
> 1,5 segundos	Requiere un diseño cuidadoso (en la selección de los altavoces y sus ubicaciones)
1,7 Segundos	Limite para lograr una buena inteligibilidad en espacios grandes con sistemas distribuidos (ej: aeropuertos, mall)

**Tabla 4.3: Inteligibilidad alcanzable con distintos  $T_{60}$  <sup>[10]</sup>**

#### **4.4.2 Causas que pueden reducir la inteligibilidad**

Don y Carolyn Davis en su libro “Sound System Engeenering”, indican las causas más comunes que disminuyen la inteligibilidad.

- Baja relación S/N.
- Reverberación excesiva.
- Reflexiones con mucho nivel.
- Altavoces desalineados.
- Ecuilización deficiente.
- Equipos de baja calidad.
- Distancia de la fuente.

➤ Ruido de fondo y relación S/N

Uno de los parámetros más influyentes en la inteligibilidad de la palabra es el nivel de ruido de fondo. Un nivel de ruido de fondo demasiado alto puede llegar a enmascarar la señal, por eso se recomienda que la relación S/N sea de 25 dB, pero para muchas aplicaciones donde esto no puede ser aplicado, una relación S/N entre 10 dB y 15 dB puede ser suficiente<sup>[1]</sup>.

➤ Excesivo  $T_{60}$

La pérdida de articulación de las consonantes se ve directamente influenciada por el tiempo de reverberación (o  $T_{60}$ ). Un ejemplo común donde se puede observar el negativo efecto de un excesivo tiempo de reverberación es el que se presenta en las iglesias, donde suele ser muy difícil descifrar los mensajes de los oradores.

➤ Inapropiado Q

El más frecuente error en el uso de patrones direccionales es utilizar en un espacio muy reverberante un Q bajo<sup>[9]</sup>. Si se observa la ecuación de Peutz, se aprecia que a medida que el valor de Q aumenta, la pérdida de articulación disminuye.

➤ Reflexiones y delay

Una mala ubicación y/o dirección de los altavoces puede producir reflexiones molestas e incluso eco. También la distancia entre los altavoces es muy importante, ya que una distancia excesiva entre ellos puede producir un delay entre las señales de los distintos altavoces. En muy pocos casos esto es tema del tratamiento acústico.

➤ Desalineamiento

El desalineamiento de los altavoces de dispositivos semejantes es probablemente la causa más común de la reducción de la inteligibilidad de la palabra en sistemas de sonido<sup>[9]</sup>. El desalineamiento causa lóbulos alterados que son radiados por los altavoces, los que pueden excitar las superficies de las paredes. Esto puede causar un incremento en el nivel del campo sonoro reverberante.

➤ Ecuilización deficiente

Un mal ajuste de niveles, normalmente asociado al mal uso de ecualizadores puede dar como resultado una reducción de la inteligibilidad debido a una distorsión prematura antes del amplificador de potencia<sup>[9]</sup>.

➤ Distancia a la fuente

El reducir la distancia que hay entre la fuente y el auditor puede ayudar en gran medida a resolver el problema de la baja inteligibilidad. Esto se debe a que la relación entre el sonido directo y el sonido reverberante aumenta. La inteligibilidad decrece con el incremento de la distancia entre el receptor y la fuente hasta una distancia crítica  $D_C$ , después de la cual la inteligibilidad se mantiene constante, independiente de la distancia entre la fuente y el receptor<sup>[11]</sup>.

## 4.5 Decaimiento del sonido

Al momento de diseñar un sistema de sonido, se debe considerar que el nivel que entrega un altavoz cambia con el incremento de la distancia. Esto es producto del decaimiento del sonido que se produce al recorrer una trayectoria. Este decaimiento no es igual en todas las situaciones, depende del ambiente acústico en que se trabaje, ya que las características varían en campo libre y en campo reverberante. A continuación se indica el comportamiento del sonido en los distintos ambientes acústicos.

### 4.5.1 Decaimiento en campo libre

En campo libre la técnica más conocida para calcular el decaimiento es la “ley de la raíz inversa”<sup>[9]</sup>. Esta ley dice que al duplicarse la distancia desde la fuente el sonido decae en 6 dB para una onda esférica. La fórmula con la cual se puede determinar el decaimiento para cualquier distancia es:

$$L_P = L_{ref} - 20 \log \frac{D_M}{D_{ref}} \quad (4.11)$$

Donde:

$L_P$ : NPS en el punto de medición (dB)

$L_{ref}$ : NPS en la distancia de referencia (dB)

$D_{ref}$ : Distancia de referencia

$D_M$ : Distancia de medición

Hay que tener en cuenta que esta ecuación solo es útil para una onda esférica, ya que el decaimiento para una onda cilíndrica de una fuente lineal infinita es de solo 3 dB al duplicar la distancia.

## 4.5.2 Decaimiento en una sala

El decaimiento que se presenta en una sala es totalmente distinto al que se produce en campo libre. En una sala se encuentra una gran cantidad de reflexiones, las cuales dificultan en gran medida el cálculo. Por eso la ecuación de Hopkins-Stryker es más compleja que la ecuación usada en campo libre, ya que toma en cuenta tanto el sonido directo, como el sonido reverberante<sup>[9]</sup>.

El nivel del sonido directo en cualquier punto puede ser calculado con:

$$L_D = L_W + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} + 0.2 \quad (4.12)$$

Donde:

$L_D$ : NPS del sonido directo (dB)

$L_W$ : Potencia de la fuente (W)

Q: Directividad de la fuente

r: Distancia desde la fuente (m)

El nivel del sonido reverberante será:

$$L_R = L_W + 10 \log \frac{4}{S\bar{a}} + 0.2 \quad (4.13)$$

Donde:

$L_R$ : NPS del sonido reverberante (dB)

$L_W$ : Potencia de la fuente (W)

S: Superficie total (m<sup>2</sup>)

$\bar{a}$ : Coeficiente de absorción media (sabine/m<sup>2</sup>)

Combinando las dos ecuaciones anteriores, finalmente se obtiene:

$$L_T = L_W + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{S\bar{a}} \right) + 0.2 \quad (4.14)$$

Donde:

$L_T$ : NPS total (dB)

$L_W$ : Potencia de la fuente (W)

Q: Directividad de la fuente

r: Distancia desde la fuente (m)

S: Superficie total de la sala (m<sup>2</sup>)

$\bar{a}$ : Coeficiente de absorción media (sabine/m<sup>2</sup>)

## 4.6 Cubrimiento de un sistema de audio

Cuando se diseña un sistema de audio distribuido, uno de los objetivos es conseguir un cubrimiento uniforme de todas las zonas de interés. Para eso se debe calcular la cantidad de aparatos que se utilizarán y la disposición que deberán tener, siendo necesario conocer las características del recinto y de los altavoces.

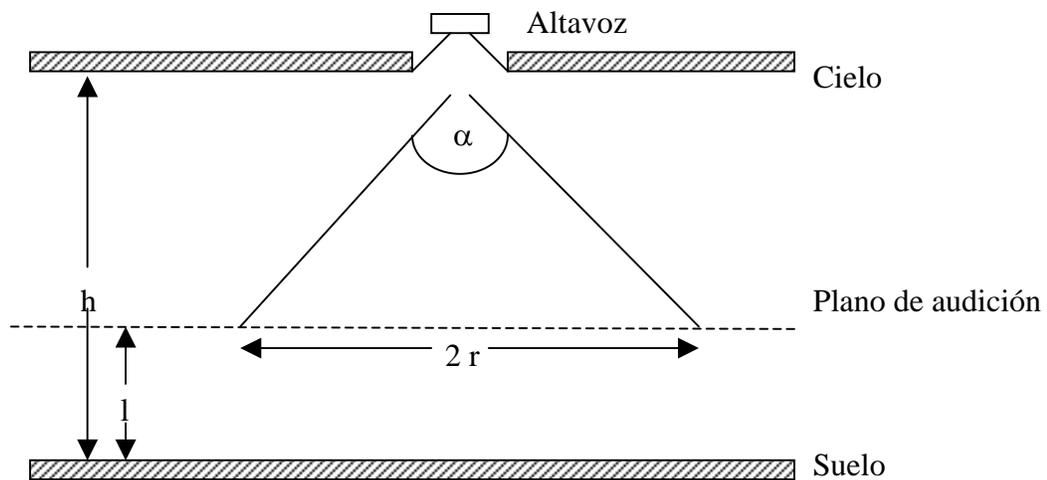
Hay dos casos distintos que se pueden encontrar, el primero es el que se produce al interior de una recinto cerrado, donde se debe tomar en cuenta las características acústicas del local y el segundo es en recintos abiertos, caso en el que se debe considerar principalmente el ruido de fondo.

## 4.6.1 Recintos cerrados

### 4.6.1.1 Montaje en el cielo

Cuando se quiere cubrir el interior de un recinto con una altura entre 2,5 y 6 m (máximo 8 m) y una extensión considerable, se puede realizar el montaje de los altavoces en el cielo, de tal forma que su radiación sea en dirección hacia abajo. Hay que tener cuidado de no producir posibles ecos producto del tipo de superficie, por lo que se recomienda que ojalá el cielo y/o suelo sea de un material absorbente.

Para efectos de análisis, se considerará que los altavoces poseen un patrón de radiación cónica<sup>[9]</sup>:



**Fig. 4.13: Geometría de un altavoz**

De la figura se tiene que:

$$r = (h - l) \tan \frac{\alpha}{2} \quad (4.15)$$

Donde:

$h$ : Altura del cielo (m)

$l$ : Altura del plano de audición (m)

$\alpha$ : Angulo de cubrimiento ( $^{\circ}$ )

$r$ : Radio del cono (en plano de audición)

Para calcular el valor de  $\alpha$ , se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\alpha = 2 \operatorname{Arcsin} \sqrt{\sin \frac{180^\circ}{Q}} \quad (4.16)$$

Donde:

$\alpha$ : Ángulo de cubrimiento (°)

Q: Patrón direccional

Es importante determinar la cantidad de altavoces necesarios para lograr un cubrimiento uniforme de un área determinada, de tal forma que cada altavoz esté separado equidistante de cada uno de los vecinos más cercanos. Se puede considerar el cubrimiento como un polígono regular con un altavoz en el centro y en cada uno de sus vértices. Hay dos polígonos que satisfacen de forma apropiada esto, el cuadrado y el hexágono<sup>[9]</sup>.

- **Espaciamiento cuadrado:**

Cuando se utiliza un espaciamiento cuadrado, el número de altavoces necesarios para cubrir un área  $A_C$  es:

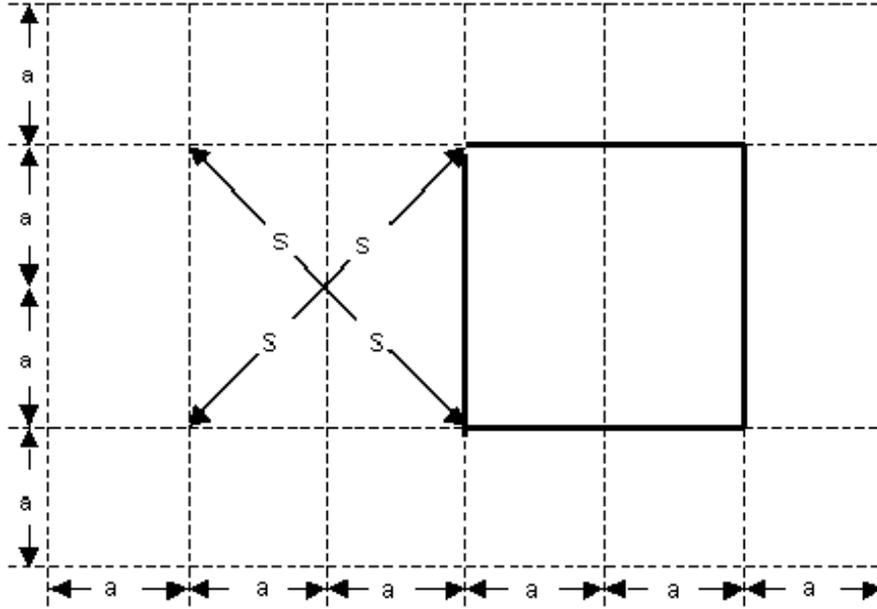
$$N_R = \frac{A_C}{S^2} \quad (4.17)$$

Donde:

$A_C$ : Área cubierta (m<sup>2</sup>)

S: distancia entre los altavoces (m)

$N_R$ : Número de altavoces



**Fig. 4.14: Espaciamiento cuadrado**

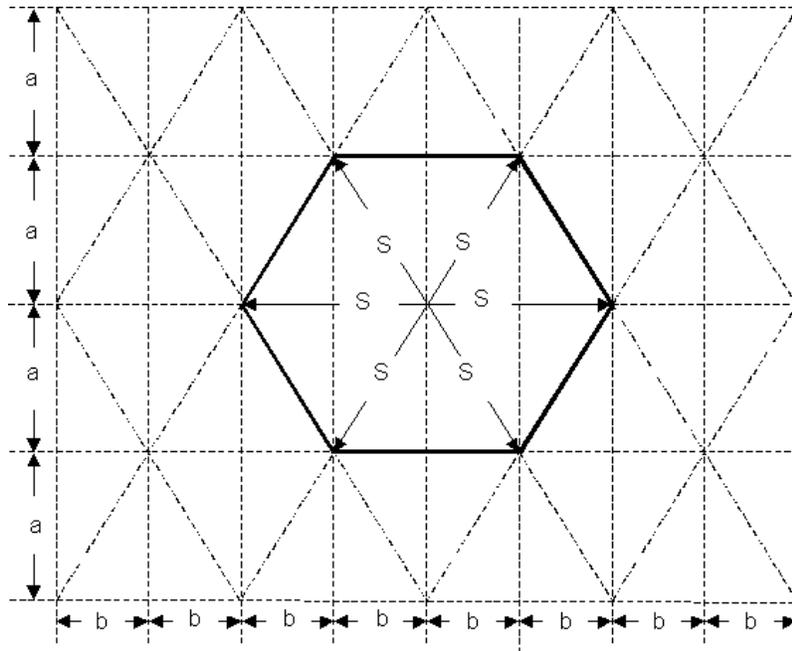
De la figura anterior se tiene que:

$$a = \frac{S}{\sqrt{2}} \quad (4.18)$$

- **Espaciamiento Hexagonal:**

Para un espaciamiento hexagonal, el número de altavoces necesarios para cubrir un área  $A_C$  es:

$$N_H = \frac{2 \times A_C}{\sqrt{3} \times S^2} \quad (4.19)$$

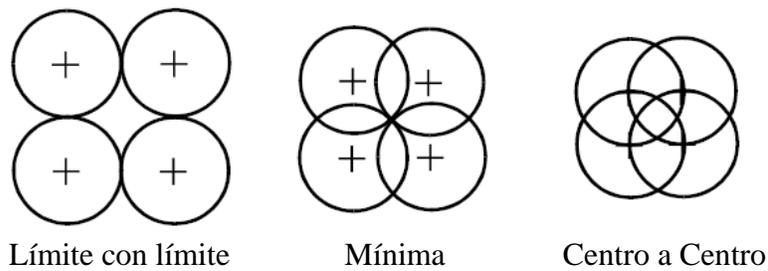


**Fig. 4.15: Espaciamiento Hexagonal**

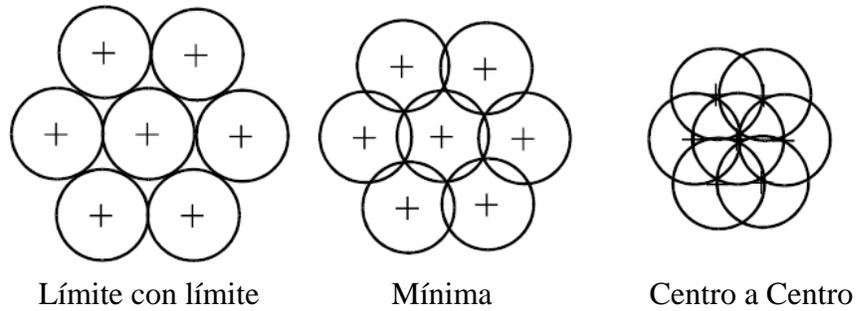
De la figura anterior se tiene:

$$a = \frac{S\sqrt{3}}{2} \qquad b = \frac{S}{2} \qquad (4.20)$$

Existen distintos criterios para la superposición de los patrones direccionales de los altavoces, siendo los más comunes:



**Fig. 4.16: Diagramas de patrones cuadrados**



**Fig. 4.17: Diagramas de patrones hexagonales**

- **Superposición centro a centro**

En esta caso la distancia entre los altavoces es:

$$S = r \tag{4.21}$$

i) Patrón cuadrado:

$$N = \frac{A_c}{\left[ (h-l) \tan \frac{\alpha}{2} \right]^2} \tag{4.22}$$

ii) Patrón Hexagonal:

$$N = \frac{2A_c}{\sqrt{3} \left[ (h-l) \tan \frac{\alpha}{2} \right]^2} \tag{4.23}$$

- **Superposición mínima**

i) Patrón cuadrado:

Se tiene las siguientes ecuaciones:

$$s = \sqrt{2} \times r \tag{4.24}$$

$$N = \frac{A_C}{2 \left[ (h-l) \tan \frac{\alpha}{2} \right]^2} \quad (4.25)$$

ii) Patrón hexagonal:

Las fórmulas usadas son:

$$S = \sqrt{3} \times r \quad (4.26)$$

$$N = \frac{2 A_C}{3\sqrt{3} \left[ (h-l) \tan \frac{\alpha}{2} \right]^2} \quad (4.27)$$

- **Superposición límite con límite:**

En este caso la distancia entre los altavoces debe ser:

$$S = 2 r \quad (4.28)$$

i) Patrón cuadrado:

$$N = \frac{A_C}{4 \left[ (h-l) \tan \frac{\alpha}{2} \right]^2} \quad (4.29)$$

ii) Patrón hexagonal:

$$N = \frac{2 A_C}{2\sqrt{3} \left[ (h-l) \tan \frac{\alpha}{2} \right]^2} \quad (4.30)$$

Cuando el cielo del recinto es demasiado alto (más de 6 m), se recomienda que los altavoces sean suspendidos a menor altura por medio de soportes desde el cielo y radiando en dirección hacia abajo, de manera de disminuir su altura. Para el cálculo del número de altavoces y su distribución se puede aplicar los mismos principios que para el caso de los altavoces montados en el cielo<sup>[12]</sup>.

#### **4.6.1.2 Montaje en las paredes**

En las ocasiones en que la instalación de los altavoces en el cielo no es posible de realizar, se debe aplicar esta solución.

La radiación del altavoz se realiza en forma horizontal o ligeramente inclinada en un pequeño ángulo hacia a bajo. La ventaja que posee esta clase de instalación, es que gracias a las características direccionales es posible escoger un espaciamiento más ancho del parlante. Además se debe preferir este tipo de montaje cuando el riesgo de producir eco entre el cielo y el suelo es demasiado alto y no puede ser eliminado de otra manera<sup>[12]</sup>.

Los altavoces deben ser instalados sobre el nivel de la cabeza de una persona de pie, de manera de evitar el enmascaramiento por la audiencia y la irradiación directa en el área cercana al altavoz (menor a 1m). La altura preferible para instalar los altavoces es entre los 2 y 3 m. Si la altura es más alta y no se puede evitar, los altavoces se deben inclinar acorde con la altura. Además la distancia entre altavoces vecinos no debe exceder los 17 m, es decir, un delay entre los frentes de onda de los altavoces menor a 50 ms.

Haas estableció que el oído siempre localiza primero la señal de la fuente cuya onda sonora llega en primer lugar. Esto se mantiene si la señal secundaria posee un nivel de 10 dB más alto y llega dentro de los 30 ms. Solo con diferencias de tiempos mayores a 40 ms el oído comienza a notar la separación de las reflexiones, pero todavía continúa localizando en el primer evento. Con tiempo mayor 50 ms ya se comienza a percibir eco<sup>[12]</sup>.

## **4.6.2 Recintos abiertos**

Cuando se desea cubrir exteriores o zonas muy abiertas, es necesario utilizar otras clases de arreglos de altavoces, los que se caracterizan por cubrir grandes áreas en forma económica y con una adecuada razón señal/ruido (por lo menos 10 dB). Aquí, muchas veces es posible encontrar que no hay cielos o paredes donde montar los altavoces, por lo que se deben diseñar otros tipos de arreglos de altavoces.

En muchas ocasiones el sonido debe recorrer una gran distancia desde el altavoz hasta el último auditor, por lo que se debe tener el cuidado de no exponer a niveles de sonido demasiado altos a los auditores más cercanos a los altavoces. Una forma práctica de evitar esto es montando los altavoces a una mayor altura.

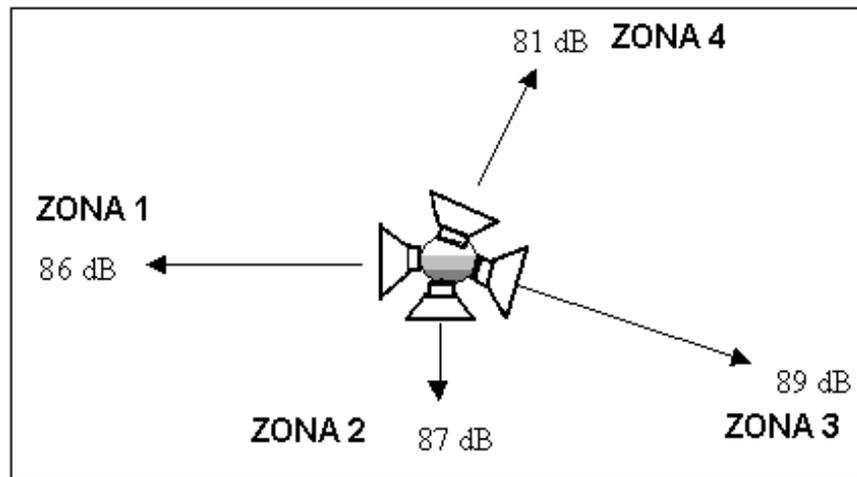
Cuando se trabaja con sistemas al aire libre, es común encontrar atenuaciones producto de las dependencias climáticas como el viento, gradiente de temperatura y humedad, las que afectan al sonido cuando se desea cubrir grandes distancias. Como la mayoría de los sistemas se utilizan principalmente para la transmisión de la voz, una pequeña caída sobre los 10 KHz es tolerable<sup>[12]</sup>.

En recintos abiertos se puede encontrar dos tipos de arreglos:

### **4.6.2.1 Arreglo centralizado**

Esta solución se usa normalmente para el cubrimiento de recintos pequeños (tal como recintos deportivos). Comúnmente los altavoces son instalados en una posición central elevada, apuntando en las distintas direcciones que se desea cubrir.

Hay que tener el cuidado de no generar niveles de sonido demasiado altos en la zona cercana al altavoz, ya que se debe evitar entregar un NPS excesivo a los oyentes. Con esto no se debe creer que los niveles que entregan los altavoces se deben disminuir, basta con lograr una distancia considerable entre los altavoces y los oyentes, lo que en la mayoría de los casos se soluciona montando los altavoces a una gran altura.

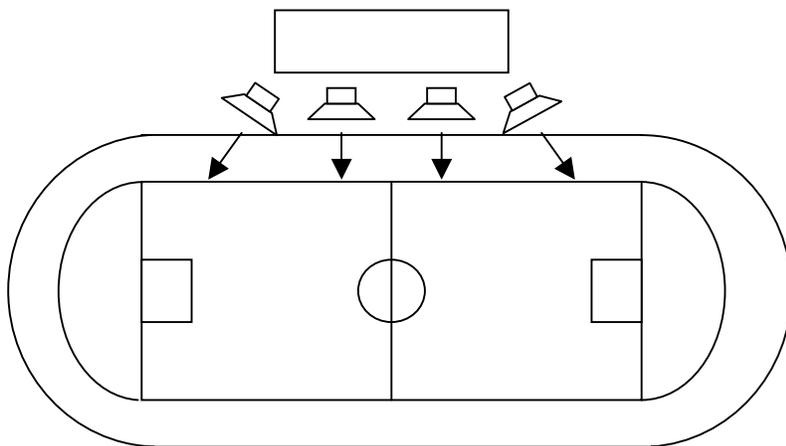


**Fig. 4.18:Arreglo centralizado típico**

Para obtener una buena inteligibilidad, el rango de frecuencias entre 250 Hz y 2.5 KHz debe ser transmitida con suficiente intensidad<sup>[12]</sup>. Debido al incremento de la directividad de los altavoces en las frecuencias más altas, hay que tener cuidado con el comportamiento de estas frecuencias en zonas alejadas del altavoz.

#### **4.6.2.2 Arreglo descentralizado**

Esta clase de instalación normalmente se emplea cuando se debe cubrir grandes y extensas áreas en forma uniforme, siendo el arreglo centralizado insuficiente para cumplir satisfactoriamente esto. Normalmente esta clase de arreglo se aplica en calles, industrias, estadios, como se muestra en la figura 4.19.



**Fig. 4.19: Sistema descentralizado típico**

Al momento del diseño, hay que tomar la decisión de cual será el máximo espaciamiento entre los altavoces. Por economía, se recomienda que el espaciamiento sea lo más ancho que lo permita la inteligibilidad, de tal forma de utilizar la menor cantidad de altavoces sin producir posibles ecos o audiciones dobles. Hay que considerar que con un espaciamiento entre los altavoces menor a 17 m es poco probable la generación de ecos, ya que la diferencia en llegar al auditor entre los frentes de ondas del altavoz más cercano y su vecino no será superior a 50 ms. En cambio, cuando el espaciamiento entre un altavoz y otro excede los 17 m, el primer frente de onda debe exceder en 10 dB al resto los frentes de onda. Bajo esas condiciones el frente de onda del altavoz más cercano enmascarara a los demás altavoces, eliminando el riesgo de producir ecos<sup>[12]</sup>.

Para utilizar un mayor espaciamiento sin la necesidad de utilizar sistemas de delay, se recomienda que los altavoces adyacentes tengan las mismas características direccionales y el mismo ángulo de radiación<sup>[12]</sup>.

## **5. DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUDIO DISTRIBUIDO**

Se debe diseñar un sistema de audio distribuido en la Universidad Austral como parte de un proyecto universitario. Este consiste en la instalación de una Radio estudiantil, que cuenta con el financiamiento del MINEDUC a través de un proyecto del Fondo de Desarrollo Institucional (FDI).

El proyecto está compuesto de dos partes: La primera consiste en la instalación de la radio con su respectiva antena de transmisión y la segunda en la instalación de un sistema de audio distribuido en el campus Teja y próximamente en el Campus Miraflores, siendo esta segunda parte donde centraremos nuestro interés.

Como el Campus Teja posee una extensa área, es deseable cubrir la mayor cantidad de zonas con el sistema de audio, obligando a que el recorrido de la línea de potencia sea muy extenso y a utilizar una gran cantidad de altavoces conectados a la misma línea. Tomando en cuenta esos dos factores, la mejor opción es utilizar el método de los Sistemas de Voltaje Constante.

Los Sistemas Distribuidos de Voltaje Constante - comparado con cualquier otro sistema de audio – son los que entrega mayores facilidades al momento del diseño y de la implementación. Permiten conectar una gran cantidad de altavoces al amplificador sin tener que disminuir el valor de la impedancia de carga más de lo recomendado. Por otra parte, permiten que la línea de potencia recorra una gran longitud sin que se produzca una pérdida de potencia tan considerable.

Como se trata de un proyecto práctico, se deberá considerar que una de las mayores limitantes en el proceso de diseño será la parte económica, por lo que se buscará maximizar los recursos de forma tal, que el gasto sea equilibrado entre los distintos componentes.

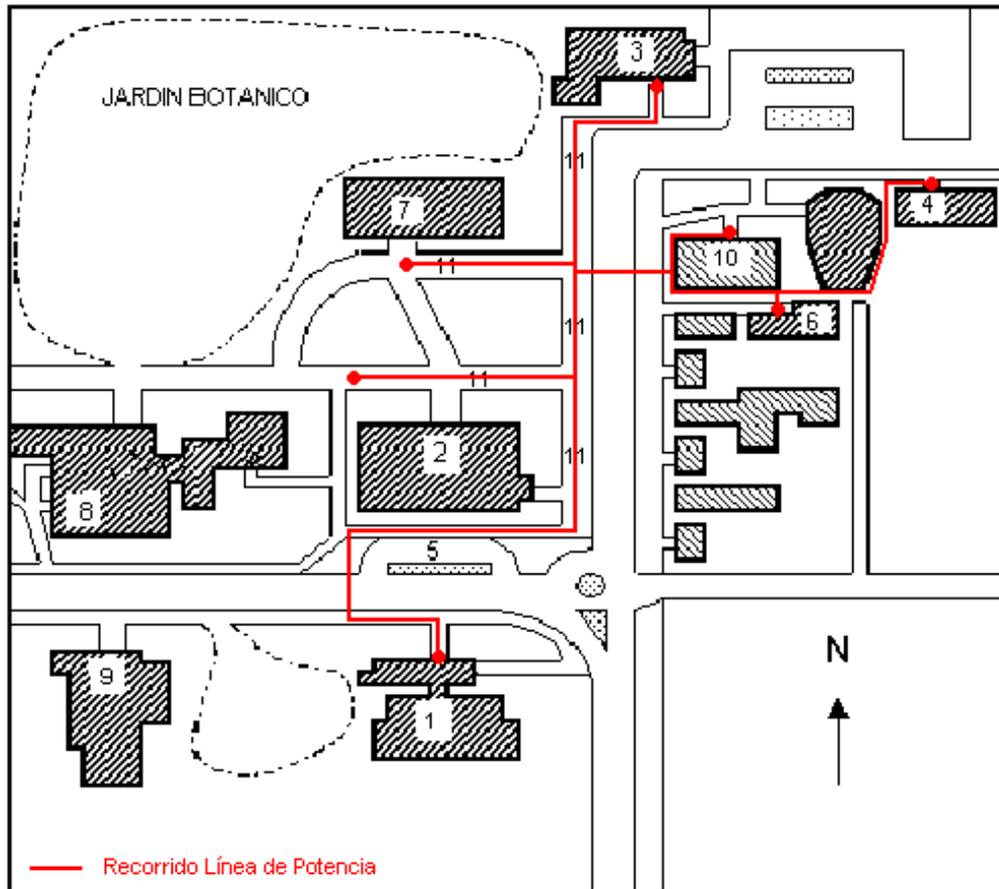
## 5.1 Localización de los altavoces

Debido a la gran extensión de área que posee el campus Teja de la Universidad Austral se diseñara un arreglo descentralizado de altavoces.

Los lugares elegidos para ubicar cada uno de los altavoces, serán dependencias de la Universidad altamente concurridas por los estudiantes durante todo el día, especialmente en los periodos que se realizan los cambios de clases. Además, la distancia entre los distintos lugar no debe ser demasiado extensa para evitar complicaciones en la implementación y disminuir gastos en cable, por lo que solo se considerará el sector oriente del campus Teja. De los distintos puntos de la Universidad analizados, se decido finalmente por los siguientes:

- D.A.E
- FEUACH
- Biblioteca
- Edificio Ciencias
- Paradero de Micros
- Pabellón Docente
- Edificio Nahmías
- Decanatura de Cs. Jurídicas
- Pasillo techado principal

La instalación de cada uno de los altavoces en los lugares seleccionados estará sujeta a disponibilidad técnica. El montaje en ciertas ubicaciones (Feuach y Ed. Nahmías) implica una complejidad mayor en la implementación, debido principalmente a que la línea de potencia tendrá que atravesar en forma aérea la avenida principal del Campus, complicando en exceso la instalación



**Fig. 5.1: Plano campus Isla Teja**

- 1) Edificio Nahmías
- 2) Biblioteca
- 3) D.A.E
- 4) Pabellón Docente
- 5) Paradero Micros
- 6) Federación de Estudiantes
- 7) Edificio de Ciencias (Dr. Emilio Pugin)
- 8) Casino
- 9) Gimnasio
- 10) Ed. de Cs. Jurídicas
- 11) Pasillo Techado

## 5.2 Ruido de fondo

Se midió el ruido de fondo en cada uno de los lugares donde se montarán los altavoces. Se utilizó un sonómetro integrador tipo II marca Quest, modelo 2900, previamente calibrado. El sonómetro fue usando en modo lento (slow) y en forma lineal (sin ninguna ponderación).

Se realizaron mediciones dos días diferentes por intervalo de 5 minutos en cada uno de los lugares que se deseaba cubrir con los altavoces, obteniendo el siguiente promedio.

Ubicación	Lmáx (dB)	Lmín (dB)	L5 (dB)	L10 (dB)	L90 (dB)	L95 (dB)
Paradero micros	92,6	73,7	88,5	87,5	77,5	76,2
Ed. Nahmías	89,1	57,2	77,2	74,6	61,7	60,2
Frontis Biblioteca	75,9	58,7	68,3	67,4	61,8	61,4
D.A.E	87	62	71,6	70,5	64,2	63,7
Ed. Ciencias	87,1	64,2	67,7	67,4	65,3	65,1
FEUACH	87	61,4	77,2	75,7	63,7	63
Pabellón docente	89	57,6	78,4	76,5	62,9	61,5
Ed. Cs. Jurídicas	86,4	65,5	80,8	79	68,3	67
Pasillo Techado	93	67,1	82,2	80	69,6	68,9

Tabla 5.1: Ruido de fondo

## 5.3 Tiempo de reverberación

Considerando que el tiempo de reverberación en cada uno de los lugares donde se montarán los altavoces es pequeño (debido a lo abierto de los recintos), su efecto no se considerará en el diseño, por lo tanto la pérdida de inteligibilidad dependerá fundamentalmente del ruido de fondo de cada lugar.

## **5.4 Altavoces**

El diseño considera obtener una buena inteligibilidad de la palabra con el sistema de audio, donde el funcionamiento de los altavoces cumplirá un papel fundamental. Los altavoces se seleccionarán de acuerdo a las siguientes consideraciones técnicas.

### **5.4.1 Respuesta de frecuencia**

La respuesta de frecuencia de los altavoces deberá ser suficiente para lograr una buena inteligibilidad en cada uno de los lugares escogidos. Se considera una respuesta de frecuencia entre los 200 Hz y los 4 KHz como requerimiento mínimo para obtener una inteligibilidad buena en el caso de la voz<sup>[12]</sup>.

### **5.4.2 Nivel de presión sonora**

Se considera una relación señal/ruido de 15 dB para obtener una inteligibilidad satisfactoria y no generar niveles de presión sonora excesivos en áreas cercanas a los altavoces. En lugares con alto nivel de ruido de fondo, hasta una relación señal/ruido de 10 dB es considerada aceptable para lograr una buena inteligibilidad<sup>[1]</sup>.

A continuación, la tabla 5.2 indica el NPS que deberán recibir los oyentes a una distancia determinada de cada altavoz, para obtener una relación señal/ruido de 15 dB.

Teniendo en cuenta el decaimiento del sonido que se produce por la distancia recorrida, el nivel de presión sonora que deberá generar cada uno de los altavoces a 1 m de distancia será mayor que los niveles deseados en el receptor que ilustra la tabla 5.2.

<b>LUGAR</b>	<b>Ruido de fondo L<sub>90</sub> (dB)</b>	<b>Distancia aprox. Altavoz-Receptor (m)</b>	<b>NPS Deseado en el receptor (dB)</b>
<b>Paradero micros</b>	77,5	2	92,5
<b>Ed. Nahmías</b>	61,7	4	76,7
<b>Biblioteca</b>	61,8	2	76,8
<b>D.A.E</b>	64,2	4,5	79,2
<b>Ed. Ciencias</b>	65,3	3,5	80,3
<b>FEUACH</b>	63,7	2	78,7
<b>Pabellón docente</b>	62,9	3	77,9
<b>Ed. Cs. Jurídicas</b>	68,3	3	83,3
<b>Pasillo principal</b>	69,6	2	84,6

**Tabla 5.2: NPS deseados en el receptor**

Considerando los lugares donde se instalarán los altavoces semejantes a campo libre, se reemplazará en la ecuación 4.11 los valores de  $d$  (distancia altavoz - receptor) y  $L_P$  (NPS deseado en el receptor) indicados en la tabla 5.2, para determinar el NPS que deberá generar cada altavoz a 1 m de distancia. Se utilizará 1 m como referencia, ya que las especificaciones de los altavoces indican el NPS que son capaces de generar a esa distancia cuando consumen 1 W de potencia.

Despejando  $L_{REF}$  de la ecuación 4.13:

$$L_{REF} = L_P + 20 \log \left( \frac{d}{d_{REF}} \right)$$

Donde:

$L_P$ : NPS en el receptor (dB)

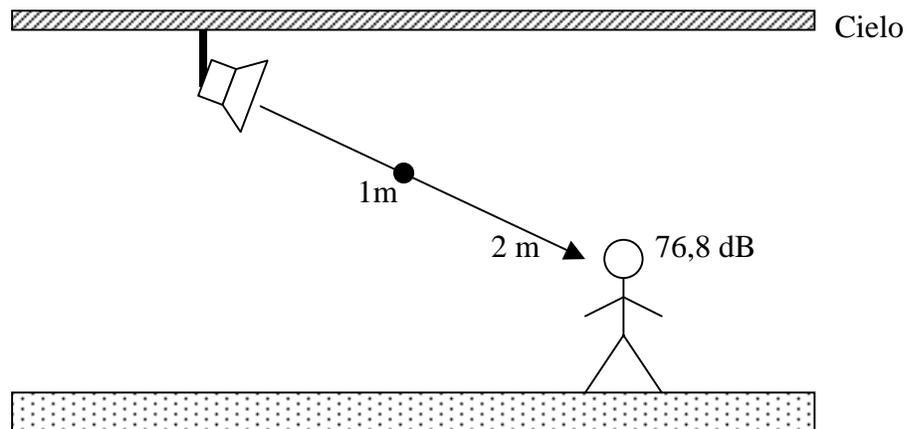
$d$ : Distancia altavoz-receptor (m)

$L_{REF}$ : NPS a la distancia de referencia (dB)

$d_{REF}$ : Distancia de referencia (1 m en este caso)

En definitiva,  $L_{REF}$  será el NPS que tendrá que generar cada uno de los altavoces a 1 m de distancia. Para determinarlo, se reemplazará los valores de la tabla 5.2 en la fórmula anterior como se muestra a continuación:

- **Caso Biblioteca:** Se determinará el nivel que tendrán que generar los altavoces que se montarán en el frontis de la biblioteca. Como se muestra en la figura 5.2, el NPS que deben recibir los oyentes es de 76,8 dB a 2 m de cada altavoz.



**Fig. 5.2: Instalación Frontis Biblioteca**

Reemplazando:

$d$ : 2 m

$d_{REF}$ : 1 m

$L_P$ : 76,8 dB

$$L_{REF} = 76,8 dB + 20 \log \left( \frac{2}{1} \right)$$

$$L_{REF} = 82,8 dB$$

El NPS que tendrá que reproducir cada uno de los altavoces que se ubicarán en el pasillo frente a la biblioteca será de 82,8 dB a 1 m de distancia. Con ese nivel los receptores recibirán 76,8 dB a 2 m de cada altavoz.

Repitiendo el procedimiento para los demás altavoces, se obtiene la siguiente tabla:

<b>LUGAR</b>	<b>NPS deseado en el receptor (dB)</b>	<b>Distancia Aprox. Altavoz-Receptor (m)</b>	<b>NPS deseado a 1m del altavoz (dB)</b>
<b>Paradero micros</b>	92,5	2	98,5
<b>Ed. Nahmías</b>	76,7	4	88,7
<b>Biblioteca</b>	76,8	2	82,8
<b>D.A.E</b>	79,2	4	91,2
<b>Ed. Ciencias</b>	80,3	3,5	91,2
<b>FEUACH</b>	78,7	2	84,7
<b>Pabellón docente</b>	77,9	3	87,4
<b>Ed. Cs. Jurídicas</b>	83,3	3	92,8
<b>Pasillo Techado</b>	84,6	2	90,6

**Tabla 5.3: NPS necesario para una buena inteligibilidad**

Observando la tabla 5.3, es posible notar que algunos niveles necesarios para obtener una buena inteligibilidad son altos, llegando prácticamente a un NPS máximo de 98,5 dB a 1m de distancia de los altavoces que se ubicarán en el paradero de micros. Como los altavoces estarán montados a baja altura, estos pueden llegar a producir molestias a la gente que circule en las proximidades de ellos. La altura de los altavoces no se puede aumentar producto de la baja altura del techo, por lo que se recomienda que se realice un monitoreo minucioso de los niveles que entregará cada altavoz, una vez que esté funcionando el sistema.

### **5.4.3 Patrón direccional**

Con el fin de evitar molestias al interior de recintos cercanos a los lugares donde se montarán los altavoces, se elegirán altavoces que posean una direccionalidad alta. Esto ayudará a evitar la posibilidad de emitir ruido a lugares no previstos.

#### **5.4.4 Otros parámetros tomados en cuenta**

Al momento de seleccionar los altavoces, se deberá considerar algunos puntos que se alejan del campo de la acústica.

- Algunos altavoces se montarán en lugares donde estarán expuestos a inclemencias climáticas, por lo que se debe asegurar que sean capaces de resistirlas o tener el cuidado de protegerlos de éstas.
- Se debe tomar en consideración, que el diseño estético de los altavoces sea sobrio y no deteriore la armonía del entorno, de manera que la instalación permanezca visualmente desapercibida para los auditores

#### **5.4.5 Distribución Altavoces**

La distribución de los altavoces estará en función de:

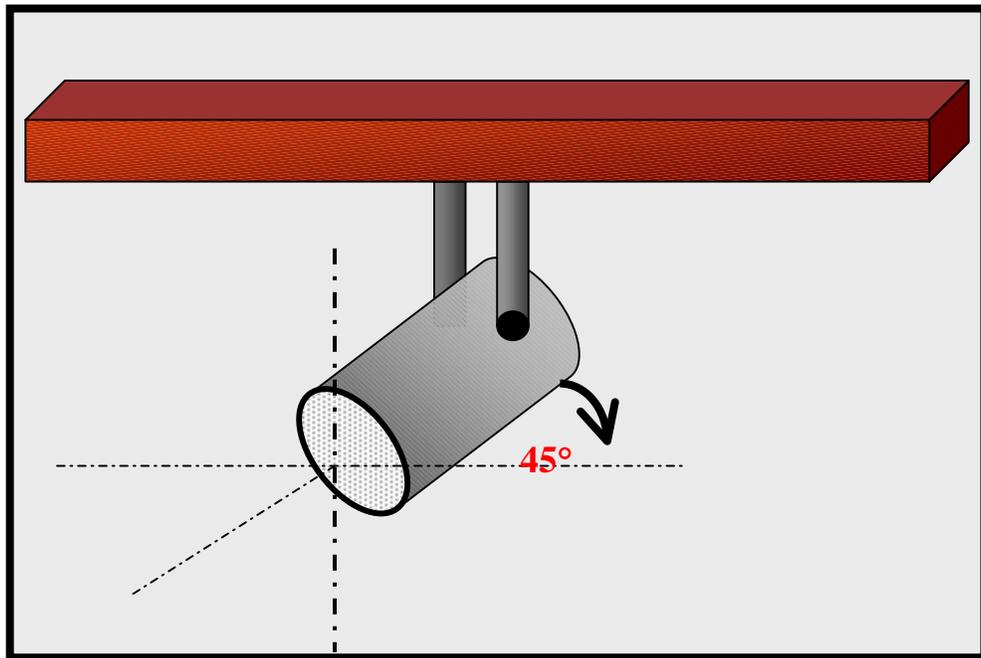
- Area que se desea cubrir.
- Inteligibilidad que se requiere lograr.
- Características direccionales de los altavoces.

Se analizarán dos modelos de altavoces de diferente marca y valor comercial, los que cumplen con los requerimientos técnicos anteriores. El primero es el proyector CAD20T de la marca Penton y el otro es el altavoz Control 25T de JBL. A continuación la tabla 5.4 indica sus especificaciones.

	<b>Penton CAD 20T</b>	<b>JBL CONTROL 25T</b>
Respuesta de frecuencia	160-20.000 Hz $\pm$ 6 dB	80-15.000 Hz (-10 dB)
Sensibilidad (1w, 1m)	92 dB	89 dB
Taps de potencia (W)	2,5; 5; 10; 20	3,7; 7,5; 15; 30
Factor de directividad (Q)	5,5	5,3
Ángulo de cubrimiento	94°	96°
Instalación permitida	Interior y exterior	Interior y exterior

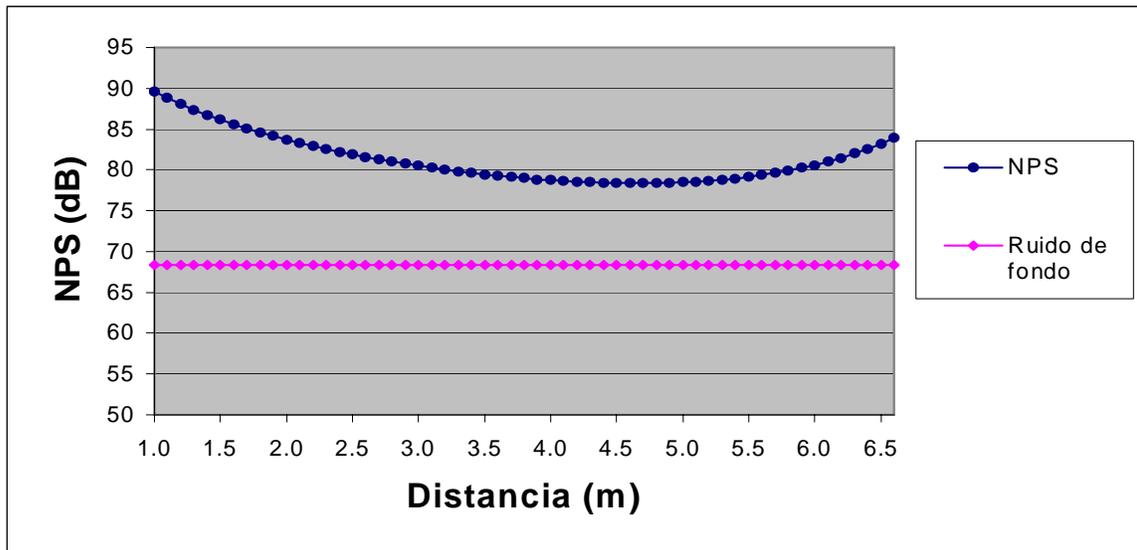
**Tabla 5.4: Especificaciones altavoces**

Los dos modelos de altavoz poseen una direccionalidad semejante, de tal manera que se utilizará en el diseño el mismo ángulo de montaje para ambos. Todos los aparatos se instalarán en la misma dirección, en un ángulo de 45° en dirección a la calle (fig. 5.3) para no producir molestias al interior de los edificios.



**Fig. 5.3: Instalación altavoces**

Tomando en cuenta el patrón direccional de cada altavoz, la distancia entre dos aparatos consecutivos tendrá que ser menor o igual a 7,6 m, para obtener una relación señal/ruido que fluctúe entre 10 y 15 dB. Visualizando gráficamente el comportamiento del NPS para el caso del pasillo techado se obtiene el siguiente gráfico:



**Gráfico 5.1: Comportamiento del NPS entre dos altavoces consecutivos**

Utilizar un distanciamiento pequeño entre los altavoces minimizará las posibilidades de producir ecos y además se logra una distribución uniforme del sonido, con una variación máxima de 5 dB entre los altavoces.

Utilizando un distanciamiento de 7,6 m entre altavoces consecutivos, se necesitarán 66 altavoces para cubrir de manera uniforme el pasillo techado y los demás lugares elegidos del campus Teja.

## 5.5 Amplificador

Para seleccionar un amplificador apropiado, primero se determinará la potencia total que deberá entregar. Esta será igual a la potencia total consumida por los altavoces cuando estén todos conectados a la línea, más un factor de corrección debido a las pérdidas que se producen en el sistema.

Se analizará el desempeño de cables de diversos calibres para verificar la pérdida que se produce en el sistema, y poder seleccionar el amplificador que mejor se acomode a cada una de las necesidades de potencia.

### 5.5.1 Potencia consumida por los altavoces

Se determinará la potencia que consumirá individualmente cada uno de los altavoces, para lo que es necesario conocer el NPS que debe generar cada uno a 1 m de distancia y su respectiva sensibilidad. Utilizando esos dos parámetros es posible identificar el tap con que cada transformador se deberá unir a la línea, determinando la máxima potencia que consumirán.

En el caso de los altavoces estudiados:

MODELO	SENSIBILIDAD dB (1w, 1m)
Penton CAD 20T	92
JBL Control 25T	89

**Tabla 5.5: Sensibilidad altavoces Penton**

Para el cálculo, se utilizará la siguiente ecuación:

$$NPS = 10 \log \left( P \times 10^{\frac{NPS_{(SENS)}}{10}} \right) \quad (5.1)$$

Donde:

P: Potencia entregada al altavoz (W)

NPS: NPS generado por el altavoz a 1m (dB)

NPS<sub>(SENS)</sub>: NPS generado con 1 watt y a 1m (dB)

Despejando la potencia:

$$P = \frac{10^{\frac{NPS}{10}}}{10^{\frac{NPS_{(SENS)}}{10}}}$$

- **Caso Biblioteca:** Se calculará la potencia que consumirá cada altavoz Penton CAD20T ubicado en el pasillo techado frente a la Biblioteca:

NPS<sub>(SENS)</sub>: 92 dB (1w, 1m)

NPS: 82,8 dB

$$P = \frac{10^{\frac{82,8}{10}}}{10^{\frac{92}{10}}}$$

$$P = 0,12 \text{ W}$$

Cada altavoz Penton CAD20T ubicado en el frontis de la Biblioteca tendrá que recibir 0,12 W para generar un NPS de 82,8 dB a 1 m del altavoz y un NPS de 76,8 dB a 2 m.

El sistema deberá ser capaz de alcanzar un NPS tal, que en casos de emergencias – donde el nivel de ruido de fondo que se genera puede ser más alto de lo normal – los mensajes sean inteligibles. Debido a eso, se conectarán los transformadores a la línea con terminales que entreguen a los altavoces por lo menos el doble de la potencia que necesita cada uno en condiciones normales para generar el NPS requerido, de tal modo de obtener un headroom.

Repitiendo el proceso para cada altavoz, se obtiene:

<b>Ubicación</b>	<b>Altavoces (N°)</b>	<b>CAD 20T (w)</b>	<b>CAD 20T Tap (w)</b>	<b>Control 25T (w)</b>	<b>Control 25T Tap (w)</b>
<b>Paradero micros</b>	8	4,46	10	8,9	15
<b>Ed. Nahmías</b>	1	0,46	2,5	0,93	3,7
<b>Frontis Biblioteca</b>	10	0,12	2,5	0,23	3,7
<b>D.A.E</b>	1	0,83	2,5	1,66	3,7
<b>Ed. Ciencias</b>	1	0,83	2,5	1,66	3,7
<b>Feuach</b>	1	0,18	2,5	0,37	3,7
<b>Pabellón Docente</b>	1	0,34	2,5	0,69	3,7
<b>Ed. Cs. Jurídicas</b>	1	1,20	2,5	2,39	7,5
<b>Pasillo Techado</b>	42	0,72	2,5	1,44	3,7

**Tabla 5.6: Tap de potencia a utilizar en un sistema de 70 V.**

### **5.5.2 Potencia amplificador**

La potencia que debe poseer el amplificador seleccionado dependerá directamente de la pérdida que se produzca en la línea, la que se ve afectada por el valor de la impedancia de carga y de la resistencia del cable.

Usando un plano a escala del Campus Isla Teja de la Universidad Austral otorgado por la Dirección de Servicios, se determinó la distancia que recorrerá la línea de potencia, siendo esta una longitud de 590 m aproximadamente.

Se estudiará el comportamiento de cables AWG N° 12, 14 y 16 con los altavoces Penton CAD20T y JBL Control 25T. Se utilizará la ecuación 4.3 para calcular la pérdida que se producirá en los distintos cables, cuando la impedancia de carga de los altavoces sea la indicada en la siguiente tabla.

<b>Modelo</b>	<b>Potencia consumida (w)</b>	<b>Impedancia (Ω)</b>
Penton CAD 20T	225	22,2
JBL CONTROL 25T	338,4	14,7

**Tabla 5.7: Potencia amplificador**

### **CASO 1: Cable AWG 16**

El cable posee una resistencia de 7,8 Ω para un largo de 590 m, por lo tanto se tiene que:

- La pérdida con altavoces Penton CAD 20T será:

$$P_{\text{LOSS}} = 20 \log \left( \frac{2 \times 7,8 + 22,2}{22,2} \right)$$

$$P_{\text{LOSS}} = 4,6 \text{ dB}$$

La potencia mínima del amplificador:

$$10 \log \left( \frac{P_A}{225} \right) = 4,6 \text{ dB}$$

$$P_A = 649 \text{ W}$$

- La pérdida con altavoces JBL Control 25T:

$$P_{\text{LOSS}} = 20 \log \left[ \frac{2 \times 7,8 + 14,7}{14,7} \right]$$

$$P_{\text{LOSS}} = 6,3 \text{ dB}$$

La potencia mínima del amplificador deberá ser:

$$10 \log \left( \frac{P_A}{338,4} \right) = 6,3 \text{ dB}$$

$$P_A = 1443 \text{ W}$$

## **CASO 2: Cable AWG 14**

El cable posee una resistencia de  $4,9 \Omega$  para un largo de 590 m, por lo tanto se tiene que:

- La pérdida con altavoces Penton CAD 20T es:

$$P_{\text{LOSS}} = 20 \log \left( \frac{2 \times 4,9 + 22,2}{22,2} \right)$$

$$P_{\text{LOSS}} = 3,2 \text{ dB}$$

La potencia mínima del amplificador será:

$$10 \log \left( \frac{P_A}{225} \right) = 3,2 \text{ dB}$$

$$P_A = 470 \text{ W}$$

- La pérdida con altavoces JBL Control 25T es:

$$P_{\text{LOSS}} = 20 \log \left[ \frac{2 \times 4,9 + 14,7}{14,7} \right]$$

$$P_{\text{LOSS}} = 4,4 \text{dB}$$

La potencia mínima del amplificador deberá ser:

$$10 \log \left( \frac{P_A}{338,4} \right) = 4,4 \text{dB}$$

$$P_A = 932 \text{W}$$

### CASO 3: Cable AWG 12

El cable posee una resistencia de  $3,1 \Omega$  para un largo de 590 m, por lo tanto se tiene que:

- La pérdida con altavoces Penton CAD 20T:

$$P_{\text{LOSS}} = 20 \log \left( \frac{2 \times 3,1 + 22,2}{22,2} \right)$$

$$P_{\text{LOSS}} = 2,1 \text{dB}$$

La potencia mínima del amplificador será:

$$10 \log \left( \frac{P_A}{225} \right) = 2,1 \text{dB}$$

$$P_A = 365 \text{W}$$

- La pérdida con altavoces JBL Control 25T:

$$P_{\text{LOSS}} = 20 \log \left[ \frac{2 \times 3,1 + 14,7}{14,7} \right]$$

$$P_{\text{LOSS}} = 3 \text{dB}$$

La potencia mínima del amplificador deberá ser:

$$10 \log \left( \frac{P_A}{338,4} \right) = 3 \text{dB}$$

$$P_A = 675 \text{W}$$

Para cada modelo de altavoz y cable AWG se considerará 3 marcas distintas de amplificadores. Tomando en cuenta que las tres marcas son de excelente calidad, por economía se seleccionará el modelo marcado en amarillo.

Mod. Altavoz	Cable AWG	Mod. Amplificador	Potencia a 70V (w)	VALOR (\$)
• Penton CAD 20T	16	CREST CKV 1600	800	1.400.000
		CROWN CTs 2000	1000	1.347.000
		QSC CX 1202	1200	1.137.000
	14	CREST CKV 1600	800	1.400.000
		CROWN CTs 1200	600	1.096.000
		QSC CX 602	600	952.000
	12	CREST CKV 800	400	760.000
		CROWN CTs 1200	600	1.096.000
		QSC CX 602	600	952.000
• JBL Control 25T	16	CREST CKV 1600	-	-
		CROWN CTs 3000	1500	1.976.000
		QSC CX	-	-
	14	CREST CKV 2400	1200	1.900.000
		CROWN CTs 2000	1000	1.347.000
		QSC CX 1202	1200	1.137.000
	12	CREST CKV 1600	800	1.400.000
		CROWN CTs 2000	1000	1.347.000
		QSC CX 1202	1200	1.137.000

**Tabla 5.8: Amplificadores de Potencia**

## 5.6 Opciones de presupuesto

Se analizarán las distintas opciones que existen en el mercado, para realizar una comparación entre los valores que ofrecen los distintos equipos.

Opción	Equipo	Cantidad	Valor Unt (\$)	Valor total (\$)	TOTAL (\$)
<b>I</b>	Altavoz CAD 20T	66 un	40.700	2.686.200	<b>4.047.400</b>
	Amp. QSC CX 1202	1 un	1.137.000	1.137.000	
	Cable AWG 16	590 m	380 p/m	224.200	
<b>II</b>	Altavoz Control 25T	66 un	83.400	5.504.400	<b>7.704.600</b>
	Amp. Crown CTs 3000	1 un	1.976.000	1.976.000	
	Cable AWG 16	590 m	380 p/m	224.200	
<b>III</b>	Altavoz CAD 20T	66 un	40.700	2.686.200	<b>3.904.000</b>
	Amp. QSC CX 602	1 un	952.000	952.000	
	Cable AWG 14	590 m	450 p/m	265.500	
<b>IV</b>	Altavoz Control 25T	66 un	83.400	5.504.400	<b>6.906.900</b>
	Amp. QSC CX 1202	1 un	1.137.000	1.137.000	
	Cable AWG 14	590 m	450 p/m	265.500	
<b>V</b>	Altavoz CAD 20T	66 un	40.700	2.686.200	<b>3.800.200</b>
	Amp. Crest CKV 800	1 un	760.000	760.000	
	Cable AWG 12	590 m	600 p/m	354.000	
<b>VI</b>	Altavoz Control 25T	66 un	83.400	5.504.400	<b>6.995.400</b>
	Amp. QSC CX 1202	1 un	1.137.000	1.137.000	
	Cable AWG 12	590 m	600 p/m	354.000	

**Tabla 5.9: Distintas opciones comerciales**

- Comparando las distintas opciones, se puede apreciar que la alternativa más económica es inferior al 50% de la opción de más valor.

- La opción IV se puede elegir como la opción ideal, ya que todos los componentes del sistema de audio (altavoces y amplificador) son de excelente calidad y se logra maximizar los recursos.
- La opción V se puede elegir como la opción más económica, cumpliendo en forma eficiente los requerimientos técnicos para obtener una buena inteligibilidad.

## **5.7 Discusión de resultados**

Debido al bajo presupuesto del proyecto, no fue posible implementar un diseño óptimo, por lo tanto fue necesario realizar variaciones para ajustarse al financiamiento que se tenía. Las variaciones que se realizaron fueron:

- Se disminuyó el número de altavoces, eliminando los altavoces que cubrían el pasillo techado, manteniendo únicamente los altavoces que se ubicarían en los puntos más críticos de la Universidad (Biblioteca, D.A.E, Paradero Micros).
- Debido a la gran diferencia de precio que existía entre altavoces JBL y Penton, solo se adquirieron aparatos Penton CAD20T y JD20XT. EL modelo JD20XT posee características similares al Control 25T en cuanto a su sensibilidad, patrón direccional y respuesta de frecuencia.
- La disminución del número de altavoces permitió elegir un amplificado de menor potencia, seleccionando un amplificador marca Siera modelo SPA3120, el que posee una potencia de 180 W trabajando en 70 V. Producto de las limitantes económicas, no fue posible adquirir un amplificador de mejor calidad (Crest, Crown, QSC).

## 6. CONCLUSIONES

Realizar el diseño e instalación de un sistema de audio distribuido, permitió verificar las ventajas y facilidades que poseen los Sistemas de Voltaje Constante, comparado con los sistemas de conexión directa.

- Evita complicaciones con el cálculo del valor de la impedancia de carga, ya que un sistema de audio convencional, hubiera obligado a realizar conexiones en serie-paralelo de los altavoces para no disminuir la impedancia de carga más de lo recomendado. Esto hubiera implicado un tedioso cálculo para determinar el valor de la impedancia de carga.
- Una gran cantidad de cable de menor diámetro se puede utilizar sin producir una pérdida en la línea tan considerable, como la que se produce en un sistema de audio convencional.
- La ejecución del diseño se vio afectado por limitantes económicas que tenía el proyecto. El no poseer suficientes recursos para realizar en la práctica el diseño óptimo, se vio reflejado en un menor número de altavoces y un amplificador de menos potencia, además de ser componentes de menor calidad. En el caso de los altavoces, estos cumplen con las condiciones mínimas para lograr una buena inteligibilidad de la voz, pero hubiera sido mejor adquirir altavoces con una mejor respuesta de frecuencia, para poder reproducir con mejor calidad música ambiental.
- Una gran cantidad de dinero se puede ahorrar por el uso de cables de menor diámetro, tomando en cuenta que en casos de grandes locales (como aeropuertos y centros comerciales) la línea de potencia puede recorrer fácilmente 1.000 m. Se comprobó además, que en algunos casos se puede lograr una mayor economía utilizando un cable de mayor diámetro (que posee un costo superior), pero adquiriendo un amplificador de menor potencia.

- La sensibilidad de los altavoces afecta de manera notoria el presupuesto. Una menor sensibilidad significa un consumo mayor de potencia y una impedancia de carga menor, lo que implica seleccionar un amplificador de mayor potencia.
- Posee una gran ventaja cuando se trabaja con pocos recursos, ya que permite que en el futuro sea posible instalar altavoces en cualquier punto de la línea sin tener que calcular nuevamente la impedancia de carga. Esto da la posibilidad de ir agregando altavoces al sistema de audio a medida que se consigan recursos y la potencia del amplificador así lo permita. De esta manera se puede ir mejorando el sistema, para obtener un cubrimiento más uniforme y poder cubrir áreas que quedaron sin cobertura.
- Cuando se trabaja con sistemas que utilizan gran cantidad de altavoces es probable encontrar problemas, especialmente en el proceso de instalación. Es posible realizar conexiones incorrectas, siendo más crítica cuando se trabaja con transformadores externos a los altavoces, ya que significa realizar el doble de conexiones por cada altavoz.
- Para concluir, el diseño de sistemas de Audio Distribuido es un claro ejemplo de un campo laboral que puede ocupar el ingeniero Acústico, existiendo empresas especializadas en el diseño e instalaciones de Sistemas de Audio Distribuido.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Sound System Design Reference Manual.  
Eargler, J. 1999  
JBL Pro.
  
- [2] Circuitos Eléctricos  
Siskind, Ch. 1972  
Editorial Hispano Americana
  
- [3] Audio-ciclopedia, Volumen I  
Tremaine, H. 1977  
Editorial Boixareu
  
- [4] Maquinas Eléctricas “Estado dinámico y permanente”  
Thaler, J y Wilcox, M. 1969  
Ed. Limusa-Wiley
  
- [5] Testing a constant voltage loudspeaker system  
Ballou, G. 1996  
Sound &Video Contractor
  
- [6] Constant-Voltage Audio Distribution Systems: 25, 70,7 & 100 Volts  
Bohn, D. 1997  
RaneNote 136
  
- [7] Distibuted Speaker Systems 101  
Kamlet, R. 2001  
Sound &Video Contractor

- [8] [www.meyersound.com/spanish/support/papers/speech/index.htm](http://www.meyersound.com/spanish/support/papers/speech/index.htm)  
Jones, R.
- [9] Sound System Engineering  
Davis, D, Davis, C. 1997  
Focal Press Publications
- [10] Speech Intelligibility-A JBL professional Note  
Technical Notes, Volumen 1, Numero 26  
JBL Pro.
- [11] Articulation Loss of Consonants as a Criterion for speech Transmission in Room  
Peutz, V. M. A. 1971  
Journal Audio Engineering Soc., Vol. 17
- [12] Sound Reinforcement Engineering  
Ahnert, W y Steffen, F. 1993  
E&FN Spon.

# **ANEXOS**

## 8. ANEXO 1

### Transformador diseñado para 25 V:

La potencia se define como:

$$P = \frac{V^2}{Z_L} \quad (8.1)$$

Donde:

P: Potencia disipada en la carga

V: Voltaje en la carga

$Z_L$ : Impedancia de la carga

En un sistema de 25 V la potencia será:

$$P_{25} = \frac{25^2 v}{Z_0} \Rightarrow P_{25} = \frac{625}{Z_0}$$

El mismo tap en un sistema de 70 V:

$$P_{70} = \frac{70,7^2}{Z_0} \Rightarrow P_{70} = 8 \times P_{25}$$

En el caso de 100 V:

$$P_{100} = \frac{100^2}{Z_0} \Rightarrow P_{100} = 16 \times P_{25}$$

El mismo procedimiento puede ser realizado para 70 V y 100 V.

## ANEXO 2

### Transformador diseñado para carga de 4 Ω:

Se tiene que:

$$P = \frac{V^2}{Z_L} \Rightarrow V = \sqrt{P \times Z_L} \quad (8.3)$$

Donde:

V: Voltaje en la carga

P: Potencia disipada en la carga

Z<sub>L</sub>: Impedancia de la carga

En el caso de un transformador diseñado para una carga de 4 Ω, el transformador consumirá una potencia P<sub>0</sub>, por lo tanto:

$$V = \sqrt{P_0 \times 4\Omega} \Rightarrow V = 2\sqrt{P_0}$$

Reemplazando en la primera ecuación el valor de V y la impedancia de la nueva carga, es posible determinar la potencia que consumirá el transformador con la nueva carga.

- Cuando se le conecte un altavoz de 2 Ω:

$$P = \frac{4P_0}{2} \Rightarrow P = 2P_0$$

$$P = \frac{4P_0}{8} \Rightarrow P = \frac{1}{2}P_0$$

- Cuando se le conecte un altavoz de 8 Ω:

Es posible repetir el mismo procedimiento para transformadores diseñados para otros valores de cargas.

## ANEXO 3

### FOTOS INSTALACION



**Foto 8.1: Altavoz D.A.E**



**Foto 8.2: Altavoz D.A.E**



**Foto 8.3: Altavoz Paradero Micros**



**Foto 8.4: Altavoz Paradero Micros**



**Foto 8.5: Altavoz Pasillo**



**Foto 8.6: Altavoz Pasillo**



**Foto 8.7: Instalación Cable**



**Foto 8.8: Instalación Cable**



**Foto 8.9: Instalación Cable**



**Foto 8.10: Instalación Cable**