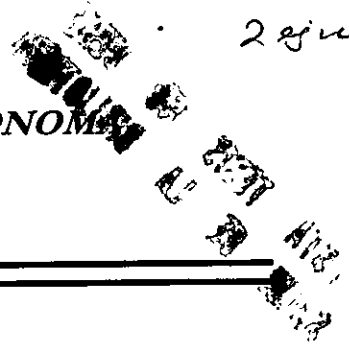


8  
2 ejm

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO



FACULTAD DE CIENCIAS

*“Determinación de la Velocidad del Viento Vertical  
Mediante Ondas Sonoras”*

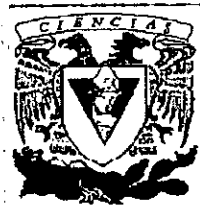
T E S I S.

*Que para obtener el Título de Física*

P R E S E N T A:

*Sandra Bonilla Meza*

*Director Dr. Héctor Gerardo Riveros Rotgé*



FACULTAD DE CIENCIAS.  
UNAM



263438

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

M. en C. Virginia Abrín Batule  
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la  
Facultad de Ciencias  
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis:  
"Determinación de la velocidad del viento vertical mediante ondas sonoras"

realizado por Bonilla Meza Sandra

con número de cuenta 9150756-7 , pasante de la carrera de Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis  
Propietario

DR. HECTOR GERARDO RIVEROS ROTGE

Propietario

M. EN C. AUGUSTO CABRERA MANUEL

Propietario

DR. VICTOR MANUEL MENDOZA CASTRO

Suplente

FIS. RAUL ESPEJEL PAZ

Suplente

M. EN C. RICARDO RUIZ BOULLOSA

Consejo Departamental de Física

DR. ROBERTO ALEJANDRO RUELAS MAYORGA  
Coordinador de Licenciatura.



FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

*A mi Mamá*

*A mis Abuelos*

*A mis Padres.*

## ***Agradecimientos.***

*Quiero agradecer a todas y cada una de las personas involucradas en este trabajo ya que sin su inapreciable ayuda no me habría sido posible llevar a término esta Tesis.*

*En primer lugar a mis Padres, Abuelos y Hermanos por todo lo que significan para mí.*

*Al Dr. Héctor G. Riveros Rotgé, mi Director, por su apoyo y por haber tenido confianza en Mí para realizar este trabajo.*

*Al Dr. Victor Manuel Mendoza Castro y al M en C Augusto Cabrera Mamuel, mis sinodales que enriquecieron con su experiencia este trabajo.*

*Muy especialmente a los Dres. Raúl Espejel Paz y Enrique Cabrera Bravo, al Prof. Andrés V. Porta C. y al M en C. Ricardo Ruiz Boullosa, mis coasesores, por su gran apoyo y paciencia.*

*A Carlos I. Mendoza por su amistad y gran ayuda.*

*A Luis Flores M., a Jesús Armando Lara, a los muchachos del Institutode Física: Mónica Mendoza, David Riveros R., Alfredo Alba S, Pilar Ovalle y Claudia Mendoza, Héctor Verdiguél G, Jorge Fujioka, Juan Carlos Glez. etc.*

*A Cesar Arzate y Francisco Fernández por su gran ayuda y cooperación.*

*A todo el personal administrativo del Instituto, muy especialmente a Anita, Lilia, los Sres. Mario, Miguel Bustos, y al personal de Taller por su paciencia y cooperación.*

*A mi entrañable Marisol Güizado*

*A la familia Rivas, mi familia adoptiva, muy especialmente a Mamá Martha y a mi hermana Nancy. A la familia Cazares Tzinzun y Esmirna Blanco, a la familia Villavicencio Aguilar, a la familia Jiménez Arévalo en especial a David A.*

*A todos mis Maestros, amigos y compañeros de la Facultad de Ciencias: Juan Antonio V, Claudia Villavicencio, Octavio H, Jorge Jaime G, Marco A. O., Norma J. N., Rocio C., Erica R., Euridice, Sara Lissette, Vanesa P. R., Julieta T, Julio Cesar Guevara, Cesar Eduardo, Agustín Juárez etc.*

*A mi querida Bertha Vázquez.*

*A la Mafta Coral: Norma I. G, Julieta T, Josefina J., Luis Enrique F., Fernando S, Carlos S., Miguel Angel S, Alfonso V., Jorge Luis y Ludwig.*

*A Salvador E. Rangel R.*

*A mis nuevos amigos Edgar Kiyoshi N. y Marco Antonio T.*

*Y a todos aquellos que me han enriquecido como persona.....*

**Contenido.**

*Pagina.*

*Indice .....i*

*Indice de Figuras y Gráficas.....vi*

*Introducción.....I*

**Capitulo I**

***Propiedades básicas de las ondas Acústicas.***

*1.1.1 Velocidad del sonido en fluidos.....1*

*1.1.2. Intensidad acústica .....2*

*1.2 Fenómenos de transmisión..... 5*

*1.2.1 Dispersión. ....5*

*1.2.2 Mecanismos de dispersión. ....6*

*1.2.3 Absorción de las ondas sonoras en el aire. ....11*

*1.3 Radar Acústico o sistema Detector y Localizador de  
Sonido (Sodar). ....16*

1.3.1 Métodos acústicos para el reconocimiento de la baja atmósfera.....	16
1.3.2. Reconocimiento pasivo de la atmósfera utilizando ondas sonoras. ....	17
1.3.3 Principios de funcionamiento del sistema de detección y localización sonora (Sodar).....	19
1.3.4 Principios de la medición del viento empleados por el SODAR Doppler.....	21
1.3.5 Elección del rango óptimo de frecuencias para un radar Acústico. (SODAR) .....	23

## **Capítulo II**

### **Transductores.**

2.1.1 Transductores de salida.....	25
2.1.1.1 Bocinas. ....	25
Características .....	27
- Directividad (dispersión). ....	27
- Distorsión Armónica .....	30
- Respuesta a transitorios.....	30
- Eficiencia. ....	31
- Respuesta en frecuencia. ....	31
2.1.2 Amplificador. ....	33



<i>Características</i> .....	33
- <i>Distorsión no lineal</i> .....	34
- <i>Distorsión de intermodulación</i> .....	34
- <i>Distorsión de Transitorios</i> .....	35
- <i>Respuesta en frecuencia</i> .....	35
<b>2.2 Tansductores de entrada</b> .....	37
2.2.1 <i>Micrófono</i> .....	37
2.2.1 <i>Características de funcionamiento</i> .....	37
2.2.2 <i>Impedancia de un micrófono</i> .....	39
2.2.3 <i>Colector</i> .....	40
<i>Características</i> .....	40

### **Capítulo III**

#### **Experimentación.**

3.1 <i>Emisión</i> .....	45
3.1.1.1 <i>Generación de Pulsos</i> .....	45
3.1.1.2 <i>Recepción</i> .....	49
3.1.1.3 <i>Muestra de resultados</i> .....	49
3.1.2 <i>Amplificador de Potencia</i> .....	50
3.1.3 <i>Sistema de Bocinas</i> .....	53

<b>3.2 Recepción</b> .....	57
3.2.1 <i>Micrófono</i> .....	57
3.2.2 <i>Preamplificador de Instrumentación</i> .....	59
3.3 <i>Realización del Experimento</i> .....	62

## **Capítulo IV**

### **Resultados, Análisis y Conclusiones.**

<b>4.1.1 Implementación del radar acústico (SODAR)</b> .....	64
<b>4.1.2 Calibración del sistema emisor-receptor</b> .....	68
4.2.1.1. <i>Procedimiento</i> .....	68
4.1.2.2 <i>Experimentos de Calibración</i> .....	74
4.2. <i>Resultados</i> .....	77
4.2.2 <i>Interpretación de resultados experimentales</i> .....	80
<b>4.3. Conclusiones</b> .....	83

<b>Bibliografía</b> .....	86
---------------------------	----

### **Apéndice I**

<i>Gráficas FFT para un pulso lateral</i> .....	88
<i>Respuesta en frecuencia de una bocina</i> .....	90

*Patrón de radiación para un sistema hexagonal ideal .....91*

***Apéndice II***

*Análisis de la Transformada de Fourier para diferente número de Pulsos.....92*

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
<i>1 Representación esquemática del SODAR.....</i>	<i>21</i>
<i>2.1.1 Estructura Interna de una bocina de tipo electromagnético.....</i>	<i>27</i>
<i>2.1.2 Patrón de radiación y factor de directividad para una bocina.....</i>	<i>29</i>
<i>2.1.3 Propiedades de una bocina.....</i>	<i>32</i>
<i>2.1.4 Diagrama de Bode para un amplificador RC.....</i>	<i>36</i>
<i>2.2.1 Patrón de direccionalidad para micrófonos.....</i>	<i>38</i>
<i>2.2.2 Configuración interna de un micrófono dinámico... </i>	<i>39</i>
<i>3.1.1 Diagrama del sistema emisor receptor .....</i>	<i>44</i>
<i>3.1.2 Tarjeta adquisidora de datos PCLAB-812PG.....</i>	<i>46</i>
<i>3.1.3 Diagrama del diseño del amplificador de potencia..</i>	<i>52</i>
<i>3.1.4 Arreglo hexagonal de bocinas.....</i>	<i>54</i>
<i>3.1.5 Analogía entre una trompeta acústica y un transformador.....</i>	<i>54</i>
<i>3.2.1 Diagrama de diseño del preamplificador de instrumentación.....</i>	<i>59</i>
<i>3.2.2 Montaje del experimento.....</i>	<i>62</i>
<i>4.1.4 Distribución del sistema emisor - receptor para la calibración.....</i>	<i>74</i>

<i>Gráfica.</i>	<i>Página.</i>
<i>1.1 Exceso de atenuación del sonido en el aire .....</i>	<i>13</i>
<i>2.2.3 Amplificación teórica para un reflector con 1/a= 1/4.....</i>	<i>41</i>
<i>2.2.4 Amplificación teórica para un reflector con 1/a= 1.....</i>	<i>42</i>
<i>2.2.5 Amplificación teórica para un reflector con 1/a= 4.....</i>	<i>42</i>
<i>3.2.1 Respuesta en frecuencia para el micrófono Shure- Prologe.....</i>	<i>58</i>
<i>4.1.1 Datos experimentales obtenidos para la determinación del periodo de lectura del sistema receptor.....</i>	<i>69</i>
<i>4.1.2 Despliegue de la señal emitida por el sistema emisor en el canal 1 y la señal recibida en el sistema receptor canal 2 .....</i>	<i>70</i>
<i>4.1.3 Adelanto en la recepción de señal .....</i>	<i>71</i>
<i>4.1.4 Calibración en Frecuencia del sistema emisor.....</i>	<i>72</i>
<i>4.1.5 Reflejo del objeto sólido.....</i>	<i>75</i>
<i>4.1.6 Reflejo atmosférico.....</i>	<i>77</i>
<i>4.2.1 Comportamiento teórico.....</i>	<i>81</i>
<i>4.2.2 Comportamiento experimental.....</i>	<i>81</i>
<i>4.2.3 Comparación entre modelo y experimento.....</i>	<i>82</i>

## *Introducción*

La medición continua de la velocidad de los vientos en la frontera de la capa atmosférica terrestre es necesaria para realizar las predicciones meteorológicas.

El radar acústico (Sodar) es uno de los equipos más ampliamente utilizados para obtener información sobre las condiciones atmosféricas a pocos kilómetros (se han reportado mediciones hasta en 1500m) Este emite un pulso sonoro dirigido hacia arriba y posteriormente recibe los ecos provenientes de las capas en donde se produzca un cambio espacial brusco de temperatura o donde el aire se mueva de modo turbulento. También se usa ampliamente para detectar la capa de inversión asociada con estos cambios bruscos en temperatura.

La secuencia de transmisión y recepción se repite proporcionando una representación continua de las condiciones atmosféricas de la región en donde se encuentre ubicado dicho sistema; así el usuario tiene la posibilidad de interpretar la información que proviene del sistema receptor y que los especialistas sean capaces de observar la variación en la capacidad de la atmósfera para mezclar los contaminantes y por consiguiente emplear esta información para la validación de modelos de dispersión. A este respecto al poder observar la variación en la capacidad atmosférica para mezclar los contaminantes y considerar estas fluctuaciones sería posible, además, determinar la velocidad el viento vertical en la atmósfera que es uno de los principales factores que intervienen en estas variaciones.

En el presente trabajo se propone el diseño y construcción de uno de estos equipos para determinar la velocidad del viento vertical en la atmósfera

que tiene la ventaja sobre el equipo ya existente a nivel comercial de operar en un intervalo de frecuencia más amplio (800 a 2500 Hz.), además de ser más accesible en costos y esperamos sea más eficiente que el equipo existente; ya que al tener la posibilidad de barrer un intervalo de frecuencias puede optimizarse el eco eligiendo la frecuencia adecuada considerando la respuesta del sistema emisor - receptor.

La estructura de este trabajo es la siguiente:

- En el capítulo I se tratan los fundamentos teóricos, los antecedentes históricos y los experimentos realizados, previos al desarrollo de este trabajo. Se plantea el sistema experimental.
- En el capítulo II se analizan los transductores que se emplearon para el desarrollo del experimento.
- En el capítulo III se explica cada parte del sistema emisor-receptor así como los experimentos que se llevaron a cabo.
- En el capítulo IV se analizan los resultados obtenidos y se exponen las conclusiones.

## ***Capítulo I***

### ***Propiedades básicas de las ondas Acústicas.***

#### ***1.1. Velocidad del sonido en medios fluidos.***

La velocidad del sonido ( $V$ ) deducida por un observador estacionario, será la suma de la velocidad del sonido  $C$  relativa al aire mas la velocidad del aire  $W$  relativa al observador. De aquí:

$$V = C + W$$

La magnitud de la velocidad del sonido en el aire seco ( $C_s$ ) esta Dada por:

$$C_s = 20.05\sqrt{T} (m/s)$$

Donde  $T$  es la temperatura absoluta del aire. En el aire húmedo la velocidad del sonido ( $C_h$ ) es ligeramente mayor, y se incrementa por una cantidad proporcional a la presión parcial de la presión de vapor de agua:

$$C_h = C_s \left( 1 + 0.14 \frac{e}{p} \right)$$



Donde  $e/p$  es la razón de la presión de vapor de agua a  $20^{\circ}\text{C}$  ( $e = 2.33 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ ) con respecto a la presión total (presión atmosférica normal) ( $p = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ). La contribución total de la presión de vapor de agua atmosférico a la velocidad de fase del sonido ( $C_p = w/k$ ) es aproximadamente de  $1\text{m/seg}$  para una humedad relativa del  $100\%$  a  $20^{\circ}\text{C}$ .

Una técnica de percepción remota utilizada anteriormente fue la técnica del cohete granada<sup>2</sup>, que ha proveído de mediciones importantes derivadas de los perfiles de viento y temperatura a alturas del orden de  $90\text{Km}$ .

### *1.2 Intensidad Acústica.*

Consideremos un frente de onda esférico. Así podemos expresar la intensidad para este tipo de ondas de la siguiente forma:

$$I = \frac{P^2}{2\rho_0 C} \text{ watts/m}^2$$

---

<sup>2</sup> W.G. Strand, W. Nordberg, and J. R. Walsh "Atmospheric temperatures and winds between 30 and 80 Km". J. Geophys. Res. Vol. 61 pp. 45-56. January 1956.

Donde  $P$  = presión acústica,  $\rho_0$  = Densidad del medio.

Para condiciones STP, la densidad del aire con un valor de  $1.21 \text{ kg/m}^3$ , la velocidad del sonido de  $341 \text{ m/seg.}$  y la impedancia acústica del aire  $(\rho_0 C)_{20} = 413 \text{ rayls}$ ; la intensidad de un tono puro que puede ser percibido por el oído humano es aproximadamente del orden de  $10^{-12} \text{ watts/m}^2$ .

De la ecuación anterior obtenemos que la amplitud de la presión es:

$$P = \sqrt{2\rho_0 CI} = \sqrt{2 \times 415 \times 10^{-12}} = 2.9 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

O bien considerando la presión efectiva  $P_e$ <sup>3</sup>:

$$P_e = \frac{P}{\sqrt{2}} = 2.05 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

En algunas ocasiones es conveniente expresar la presión del sonido en escala logarítmica que también se le conoce como niveles de intensidad de sonido, una de las razones para ello es el amplio rango de presiones e intensidades que se encuentran en nuestro medio acústico.

<sup>3</sup> Un microbar =  $1 \text{ dina/cm}^2 = 0.1 \text{ Nw/m}^2 \cong 10^{-6} \text{ atm.}$

El oído detecta las diferencias en sonoridad como diferencias en el logaritmo de la intensidad. La escala logarítmica más comúnmente utilizada es la *escala de decibeles*. El nivel de intensidad (IL) de un sonido con intensidad  $I$  se define como:

$$IL = 10 \log (I/I_0)$$

Donde IL está expresado en decibeles (dB) e  $I_0$  es la intensidad de referencia. La intensidad de referencia más comúnmente utilizada es aquella tal que en aire  $I_0 = 10^{-12}$  watts/m<sup>2</sup>. Que corresponde al umbral auditivo.

La intensidad y la presión efectiva para ondas planas se encuentran relacionadas por medio de la siguiente ecuación:

$$I = P_e^2 / \rho_0 C$$

Así la expresión para la intensidad puede reemplazarse por la expresión para la presión, lo que nos proporciona:

$$SLP = 20 \log (P/P_0)$$

En esta ecuación SLP se conoce como nivel de presión sonora y también se expresa en decibeles,  $P_e$  es la medida de presión efectiva de la onda sonora y  $P_0$  es la presión efectiva de referencia. La presión efectiva de referencia ( $P_0$ ) que se utiliza para medir presiones

en el aire es  $P_0 = 0.00002 \text{ Nw/m}^2$ . Que corresponde a la presión umbral de sensibilidad del oído humano a 1KHz, en promedio.

Observamos que para una amplitud de presión dada la intensidad es inversamente proporcional a la impedancia característica del medio.

## ***1.2 Fenómenos de transmisión***

### ***1.2.1 Dispersión.***

La atmósfera es parcialmente opaca a las ondas sonoras. Se ha encontrado que esto se debe a la presencia de capas de diferentes densidades con repentinos cambios en temperatura, humedad o en ambos, partículas suspendidas etc. De tal forma que no se produce una reflexión regular, así el sonido se dispersa en cada una de las irregularidades de la superficie, y consecuentemente se atenúa.

Se puede describir a la propagación de una perturbación en un medio conservativo por medio de la siguiente ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} = \frac{\partial^2 \eta}{a^2}$$

Donde C es la velocidad de fase constante e independiente de la frecuencia, y  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad del medio. Para medios

no conservativos la velocidad depende de la frecuencia o equivalentemente de su longitud de onda. En tales condiciones decimos que se trata de un medio *dispersivo*.

En los medios dispersivos tanto como en los no dispersivos, la velocidad para ondas sinusoidales con una frecuencia específica se determina por medio de la velocidad de fase que se relaciona con la con la frecuencia ( $\omega$ ) y con el número de onda ( $k$ ) por medio de la siguiente expresión.

$$C_{\text{fase}} = \frac{\omega}{k}$$

En el caso de medios dispersivos, si la velocidad de fase decrece al aumentar la frecuencia determinada en cierto rango, se dice que el medio posee una dispersión normal. Si se incrementa con la frecuencia en entonces se dice que el medio posee una dispersión anómala<sup>4</sup>.

### *1.2.2 Mecanismos de dispersión*

La teoría de la dispersión del sonido por fluctuaciones en la velocidad atmosférica, o por fluctuaciones en propiedades atmosféricas escalares tales como la temperatura, han sido investigadas por varios autores. Lighthill y Kraichnan trataron el caso de la

---

<sup>4</sup> ROTHWELL P. "Sound Propagation in the Lower Atmosphere". Acoust. Am. . Vol. 28. No.4 Pp. 656 - 665. July 1956

dispersión para fluctuaciones turbulentas de la velocidad, y Batchelor la dispersión del sonido por inhomogeneidades en la temperatura.

La dispersión debida a las fluctuaciones en la velocidad de los vientos atmosféricos se han investigado experimentalmente. Uno de los primeros investigadores fue Tyndall<sup>5</sup>, quien concluyó en 1874 que la longitud persistente de un eco obtenido, cuando se utilizó una sirena de niebla en la costa sur de Inglaterra, puede atribuirse a la naturaleza "Fluctuante" de la atmósfera.

En 1964 Gilman, Coxhead, y Willis de los laboratorios telefónicos Bell reportaron la detección de ecos acústicos de una inesperada alta intensidad a pocos cientos de pies en la baja atmósfera<sup>6</sup>.

Kallistratova probó experimentalmente la teoría de la dispersión del sonido por irregularidades atmosféricas entre 1958 y 1959<sup>7</sup>. Kelton y Bricout en 1964 mostraron que la dispersión de las señales acústicas era lo suficientemente intensas para medir el corrimiento Doppler en la velocidad del viento<sup>8</sup>.

<sup>5</sup> J. Tyndall "On the atmosphere as a vehicle of sound." Phil. Trans. Rev. Soc. Vol. 164. pp. 183-244, 1874.

<sup>6</sup> G. W. Gilman, H.B. Coxhead and H. Willis "Reflection of Sound signals in the Troposphere". Acoust. Am. . Vol. 18. Pp. 274-283. October 1946.

<sup>7</sup> M. A. Kallistratova . "An experimental investigation onto the scattering of sound in a turbulent atmosphere." Dokl. Akad Nauk. SSSR. Vol. 6. Pp. 72. 1959.

"Procedure in investigation of sound scattering in the atmosphere". Akus. Zh. Vol. 5 pp. 496 - 498. October - December 1959. (Soviet. Phys. Acoustics. Vol. 5 pp. 512 - 514. 1959)

M. A. Kallistratova and V.I. Tatarski . "Accounting for wind turbulence in the calculation of sound scattering in the atmosphere" ". Akus. Zh. Vol. 6 pp. 503-505. October - December 1959. (Soviet. Phys. Acoustics. Vol. 6 pp. 512 - 514. 1960).

<sup>8</sup> G. Kelton y P. Bricout "Wind velocity measurements using sonic techniques". Bull. Am. Soc. Vol.45 pp. 571 - 580. September 1964.

Estudios realizados por Bellamy 1958 sobre la dispersión en alturas considerables no se concluyeron, y fueron continuados por McAllister para demostrar que estos ecos realmente pueden ser obtenidos y estudiados<sup>9</sup>.

El ensanchamiento del espectro de energía dispersada debido al corrimiento Doppler asociado con los campos turbulentos de velocidades, fue discutido por Kraichnan, Ford y Meechan<sup>10</sup>.

La dispersión debida a la temperatura y a las fluctuaciones de velocidad ha sido también tratada por los investigadores Soviéticos Tatarski, Kallistratova y Monin, y el análisis en el campo de la teoría se realizó por Kallistratova, Baerg y Schwarz.

Siguiendo el trabajo de Monin<sup>11</sup>, podemos escribir la dispersión del sonido debida a las inhomogeneidades en el aire seco de la siguiente manera<sup>12</sup>:

---

<sup>9</sup> L.G. McAllister, et al; this issue, pp. 579 – 587. 1968.

<sup>10</sup> R.H Kraichnan, "The scattering of sound in a turbulent medium." J. Acoust. Soc. Am. Vol.25 pp 1096 – 1104. November 1956.

G. W. Ford and W.C. Meecham. "Scattering of sound by isotropic turbulence of large Reynolds number." J. Acoust. Soc. Am. Vol.32 pp 1668 – 1672. December 1960.

<sup>11</sup> A. S. Monin, "Characteristics of the scattering of sound in a turbulent atmosphere." Akus. Zh. Vol. 7 pp. 457 – 461. October – December 1961. (Soviet. Phys. Acoustics. Vol. 7 pp. 370 – 373. 1962).

<sup>12</sup> Esta ecuación no es completa, ya que no incluye el efecto Doppler debido a la transportación de las pequeñas dispersiones provocadas por remolinos, que son discutidas por Ford y Meecham. Esta omisión es equivalente a asumir que la potencia de éste eco es medida por un receptor con un ancho de banda varias veces más ancho que el ensanchamiento Doppler (que se considera pequeño) debido a la turbulencia.

$$d\sigma = 2\pi k^4 V \cos^2 \theta \left[ \frac{1}{C^2} E(K) \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4T^2} \phi(K) \right] d\Omega$$

Donde  $d\sigma$  es la fracción de potencia acústica incidente, la cual es dispersada por irregularidades en el volumen  $V$  a través de un ángulo  $\theta$  en un cono de ángulo sólido ( $d\Omega$ );  $k = 2\pi / \lambda$  es el número de onda de la onda acústica;  $K = 2k(\sin \theta/2)$  es el número de onda efectivo al cual una dispersión a través del ángulo del radar acústico  $\theta$  cuestiona al medio,  $C$  y  $T$  la velocidad del sonido y la temperatura del volumen dispersor;  $E(K)$  y  $\phi(K)$  son, respectivamente, la intensidad espectral de las fluctuaciones del viento y las fluctuaciones de temperatura al número de onda  $K$ .

Para el espectro de Kolmogorov la turbulencia se reduce a:

$$\sigma(\theta) = 0.03k^{1/3} \cos^2 \theta \left[ \frac{C_v^2}{C^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} + 0.13 \frac{C_T^2}{T^2} \right] \left( \sin \frac{\theta}{2} \right)^{-11/3}$$

Donde  $\sigma(\theta)$  es la potencia dispersada por unidad de volumen, por unidad de flujo incidente, por unidad de ángulo sólido en un ángulo  $\theta$  a partir de la dirección inicial de propagación.  $C_v$  y  $C_T$  se definen como constantes estructurales de fluctuaciones de la velocidad del viento y de la temperatura y puede obtenerse a partir de mediciones de las correspondientes funciones de estructura<sup>13</sup>:

<sup>13</sup> C. GORDON LITTLE, "Acoustic Methods for the Remote Probing of the Lower Atmosphere". Fellow. IEEE. April. 1969



$$D_w = \overline{[W(x) - W(x+r)]^2} = C_v^2 r^{2/3}$$

$$D_T = \overline{[T(x) - T(x+r)]^2} = C_T^2 r^{2/3}$$

Donde  $W(x)$  es la velocidad instantánea del viento en el punto  $x$  en la dirección  $x+r$ ,  $T(x)$  es la temperatura instantánea en el punto  $x$ ,  $W(x+r)$  y  $T(x+r)$ , son los valores instantáneos correspondientes en el punto  $x+r$ . De aquí  $C_v$  y  $C_T$  son respectivamente, la raíz cuadrática media de la diferencia entre la velocidad longitudinal y en temperatura para 2 puntos separados por una distancia unitaria.

De la ecuación anterior tenemos que:

- La potencia acústica disipada, que resulta a partir del espectro de turbulencias de Kolmogorov, que varía de manera relativamente débil con respecto la longitud de onda ( $\sigma \propto \lambda^{-1/3}$ ).
- La potencia de la dispersión acústica es la suma de 2 términos; uno que depende de las fluctuaciones del viento (normalizada por la velocidad media del sonido en el medio). Y otra debida a las fluctuaciones en temperatura (normalizada por la temperatura media en el medio).

- Ambas componentes de la dispersión, viento y temperatura, multiplicadas por el factor  $(\sin^2(\theta/2))^{-11/3}$ , Significa que la mayor parte de la dispersión se da hacia adelante.

Esta ecuación indica que una medición completa de la potencia dispersada como función del número de onda y del ángulo de dispersión, permitiría medir la velocidad del viento y su dirección, estas cantidades pueden medirse como función de la altura, utilizando técnicas Doppler.

### ***1.2.3 Absorción de las ondas sonoras en el aire:***

Existen diversos factores que influyen en la atenuación de las ondas sonoras al propagarse en el exterior, estos incluyen:

- a) La refracción y la formación de zonas de sombra asociadas con gradientes de temperatura y presión.
- b) La absorción en el aire asociada con diversos procesos irreversibles que transforman la energía acústica de la onda sonora en calor.
- c) La reflexión y absorción de las ondas sonoras por la superficie terrestre.
- d) La dispersión de las ondas sonoras debida a la turbulencia.
- e) La absorción del sonido asociada con la lluvia, nieve y niebla.

Existen 2 procesos que son los responsables de la absorción del sonido en el aire (considerándolo como un medio isotrópico). El primero es la energía extraída a la onda sonora debida a la absorción clásica. Esta incluye pérdidas por viscosidad, conducción del calor, difusión y radiación. Las pérdidas por difusión y radiación son tan pequeñas que en general son despreciables. Las pérdidas por viscosidad son proporcionales al cuadrado de la frecuencia y son significativas sólo a muy altas frecuencias. Las pérdidas por conducción del calor son significativas solamente a frecuencias extremadamente bajas (por debajo de 1KHz y a distancias de la fuente al receptor inferiores a 2000m). En el intervalo de frecuencia audible la absorción clásica usualmente es menor al 1% de la absorción total, de aquí puede ser despreciada para la mayoría del trabajo relacionado con la propagación del sonido en la atmósfera. En el segundo, la energía se extrae de la onda sonora por relajación vibracional y rotacional de las moléculas de oxígeno en el aire. Ambos casos, el clásico y la absorción por relajación molecular son función de la distancia de propagación, las impurezas, la humedad y la temperatura. En la siguiente figura podemos observar los valores del exceso de atenuación asociada con la absorción del aire como función de la temperatura y la humedad.

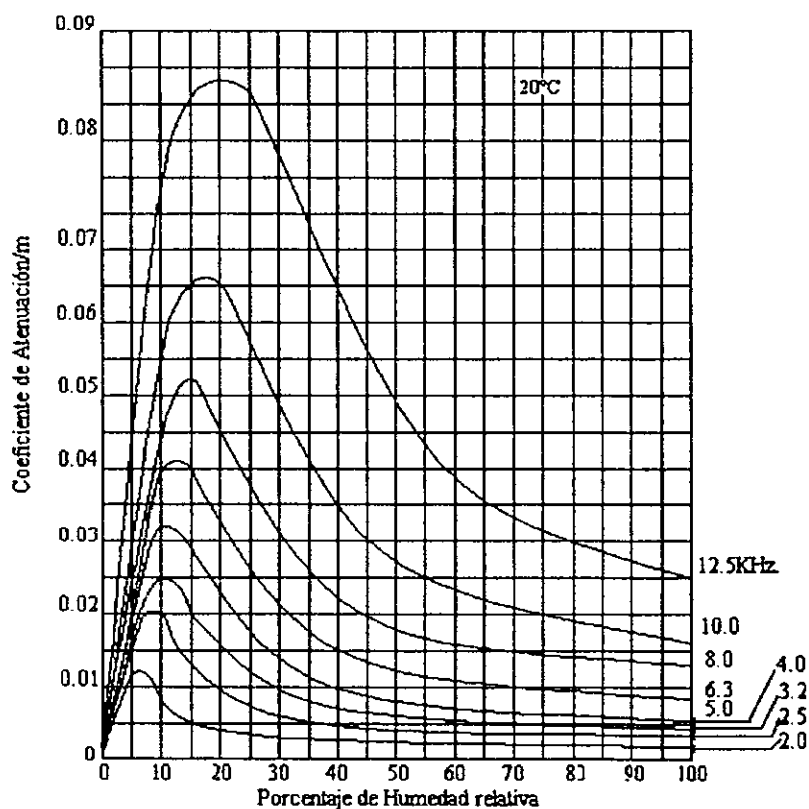


Figura 1.1 Exceso de atenuación del sonido en el aire vs temperatura para diferentes valores de humedad relativa para el aire a 20°C y presión atmosférica normal (1 atm).

C.M. Harris<sup>14</sup> encontró que a frecuencias menores de 1KHz. el exceso de atenuación debido a la absorción del aire es tan pequeño que puede despreciarse. En general la mayor absorción se incrementa

<sup>14</sup> HARRIS C.M. "Absortion of sound in air versus humidity and temperature" J. Acoust. Soc. Am. Vol.40 pp.148 - 159. July 1966.

conforme disminuye la humedad, a excepción de las altas frecuencias a una menor humedad, y también se incrementa conforme disminuye la temperatura.

Las fuentes de esta disipación pueden dividirse en 2 categorías generales, aquellas que se encuentran relacionadas con la disipación de la energía acústica en el medio de transmisión y en aquellas asociadas con las condiciones en la frontera del medio.

El primer tipo de pérdidas tiene particular importancia cuando el volumen del fluido es grande en comparación con el área de sus fronteras, como por ejemplo en la transmisión de sonido en la atmósfera terrestre y en los océanos, o a través de grandes ductos de ventilación etc. Otras pérdidas a considerar son las siguientes:

- Pérdidas por viscosidad.
- Pérdidas por conducción calorífica.
- Pérdidas asociadas con cambios moleculares de energía.

Las pérdidas por viscosidad se deben a los movimientos relativos que se presentan durante la expansión o la compresión que acompañan a la transmisión de una onda sonora.

Existe la tendencia del calor para conducirse de las regiones de condensación, en donde la temperatura disminuye. En el proceso de esta transferencia de calor la presión tiende a equilibrarse, por lo que se reduce la amplitud de la onda que se propaga a través del medio. La disipación de energía acústica asociada con cambios en la estructura molecular del medio, proviene del hecho de que existe un cierto tiempo requerido para llegar al equilibrio una vez que se altera el sistema.

Respecto a la disipación de energía acústica a través de la frontera de un fluido, tiene particular importancia cuando el volumen del fluido es pequeño en comparación con el área de las paredes que lo delimitan.

### ***1.3 Radar Acústico o Sistema detector y localizador de sonido (Sodar).***

#### ***1.3.1 Métodos acústicos para el reconocimiento de la baja atmósfera.***

El reconocimiento remoto de la baja atmósfera por medio de ondas sonoras o electromagnéticas involucra la interacción de estas con la atmósfera. Debemos tomar en cuenta que esta interacción con la baja atmósfera es mucho más intensa que para la mayor parte del espectro electromagnético.

La intensidad de estas interacciones se expresa en términos de la velocidad de fase de la onda en el medio, relativa a la velocidad de fase en condiciones normales de temperatura y presión (STP). Vacío para ondas electromagnéticas, 1 atmósfera de presión en el aire seco a 0°C para ondas sonoras.

Así las fluctuaciones en 1°C de temperatura son equivalentes a un cambio de alrededor de 1700N en el índice refractivo del medio.

Donde  $N = 1$  unidad de cambio en el índice refractivo del medio y corresponde a  $1/10^{-6}$ .

Respecto al viento las ondas sonoras experimentan un cambio de 3000N por variaciones de 1 m/seg en la velocidad del viento. Para la humedad hay una gran diferencia, el cambio en 1mbar en la presión de vapor de agua corresponde a un cambio de

alrededor de 140N en el índice refractivo del medio. De lo anterior podemos decir que las fluctuaciones en el índice refractivo del aire para las ondas sonoras tienden a ser dominadas por el viento y por las fluctuaciones de temperatura.

La potencia dispersada tanto para las ondas sonoras como para las ondas electromagnéticas por irregularidades en la atmósfera es proporcional al cuadrado de las fluctuaciones del índice refractivo y se expresa de la siguiente manera<sup>15</sup>:

$$(\Delta n/n)^2$$

Con  $n$  = índice refractivo del medio. El índice refractivo acústico incorpora una componente imaginaria para describir la absorción de la onda cuando se propaga a través de la atmósfera. La atenuación de ondas sonoras de longitudes de onda de 3 cm es del orden de 100 dB/Km. En la baja atmósfera, para ondas de radio con la misma longitud corresponde una atenuación de alrededor de 0.01 dB/Km. Y en ambos casos, la absorción tiende a incrementarse rápidamente con el incremento en la frecuencia.

### ***1.3.2 Reconocimiento pasivo de la Atmósfera utilizando Ondas sonoras de origen atmosférico***

Un micrófono expuesto a la atmósfera registra, fluctuaciones de presión originadas por la atmósfera. Algunas de estas fluctuaciones se originan como ruido de viento, asociado con la incidencia del viento sobre el micrófono o sobre algún objeto

---

<sup>15</sup> LITTLE GORDON C. "Acoustic Methods for the Remote probing of the Low Atmosphere". Proceedings of the IEEE. Pp. 571 – 578. April 1969



cercano, y otras se originan a partir de los movimientos turbulentos de la atmósfera.

Estas ondas sonoras de origen atmosférico se han estudiado particularmente en el rango infrasónico de frecuencias. Se propagan con muy poca atenuación y pueden ser detectadas en rangos de miles de kilómetros. Sin embargo las ondas sonoras consideradas como fluctuaciones de presión, han sido interpretadas en principio en términos de su origen y de su propagación.

La potencia del ruido acústico obtenida a partir de las fluctuaciones de presión residual es proporcional a la temperatura ambiente y puede utilizarse para medir temperatura. Esta presión residual se asocia con los movimientos aleatorios de las moléculas del aire en la atmósfera.

La generación de ondas sonoras producidas por turbulencia ha sido estudiada por Lighthill<sup>16</sup>, Meecham y Ford<sup>17</sup>. La potencia radiada es función del número de Mach de la turbulencia atmosférica, (la potencia total es proporcional a  $M^8$  para turbulencias isotrópicas).

Donde el número de Mach está dado por<sup>18</sup>:

$$M = v/C$$

---

<sup>16</sup> M. J Lighthill. "On sound generated aerodynamically: General theory" *Proc. Roy. Soc (London)*. Ser. A. Vol.211. pp 564 – 587. 1952.

<sup>17</sup> W.C Meecham and G.W. Ford "Acoustic radiation from isotropic turbulence". *J Acoust. Soc. Am.* Vol. 30 pp. 318 – 322. April 1958.

<sup>18</sup> PIERCE Allan, "Acoustics: An introduction to its Physical Principles and applications" *Acous. Soc. Am. USA.* 1989.

Con  $v$  = velocidad de movimiento del objeto de estudio, en este caso las variaciones en la capa de mezcla. y  $C$  = Velocidad del sonido.

Nuestra señal debe estar por encima de este nivel de ruido para poder realizar la interpretación.

### *1.3.3 Principios de funcionamiento del sistema de detección y localización sonora (SODAR).*

Este sistema, que también se conoce como Radar Acústico, emite un pulso formado por varios ciclos de una frecuencia dada en un intervalo de frecuencias entre 800 y 2500 Hz, para posteriormente recibir el eco proveniente de un elemento (S) de las zonas de turbulencia.

La manera como esto se lleva a cabo es empleando un transmisor; en este caso particular se trata de un arreglo hexagonal de bocinas que se conecta a un amplificador de potencia. La señal emitida se controla mediante un programa computacional. vía una tarjeta adquisidora de datos y un equipo de cómputo.

El eco reflejado se recibe mediante un sistema que consta de un micrófono de alta sensibilidad, montado en el foco de una antena parabólica, que se encuentra conectado a un preamplificador de instrumentación y que transmite directamente la señal recibida al equipo de cómputo. Esta información se almacena en forma de paquetes de datos para posteriormente desplegarlos y llevar a cabo su análisis.

La señal que despliega en la pantalla de la computadora se

encuentra calibrada en tiempo por lo que podemos determinar la distancia a la que se encuentra la capa reflectora así como también su de translación mediante el corrimiento Doppler.

La amplitud de la señal que se recibe es sumamente débil, pero puede detectarse electrónicamente dependiendo de la eficiencia del equipo receptor, y puede identificarse aún en presencia de ruido ambiental mediante una adecuada técnica de filtrado. Así el radar acústico (SODAR) puede proporcionar información aún bajo condiciones deficientes de movilidad de la capa límite (capa de mezcla) que se encuentran asociadas con algunos graves problemas de contaminación.

La señal recibida siempre es mucho más débil cuando proviene de grandes distancias por diversas razones:

- Existe un esparcimiento de la energía dispersada y de aquí un decaimiento de la intensidad recibida.
- La dispersión es usualmente más débil en las partes más altas que cerca del suelo donde existe una mayor turbulencia y el gradiente de temperatura es típicamente mayor.
- La atmósfera atenúa las ondas acústicas, principalmente en aire muy seco, y los efectos netos se incrementan con la longitud de la trayectoria.

El límite de la sensibilidad del radar acústico proviene normalmente del ruido ambiental. Para minimizar estos efectos, el sistema receptor debe colocarse en un área que se encuentre lo más alejada posible en la vertical del ruido que se produce en el ambiente urbano

Existe más información en el eco recibido; su frecuencia puede examinarse para determinar el movimiento de turbulento de

los contaminantes. El cambio de frecuencia entre la señal transmitida y la recibida, por el efecto Doppler, es proporcional a la velocidad de los componentes de la dispersión a lo largo de la línea transmisor-receptor. Por lo tanto el corrimiento Doppler medido proporciona una estimación de la velocidad vertical del aire.

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente el sistema de detección.

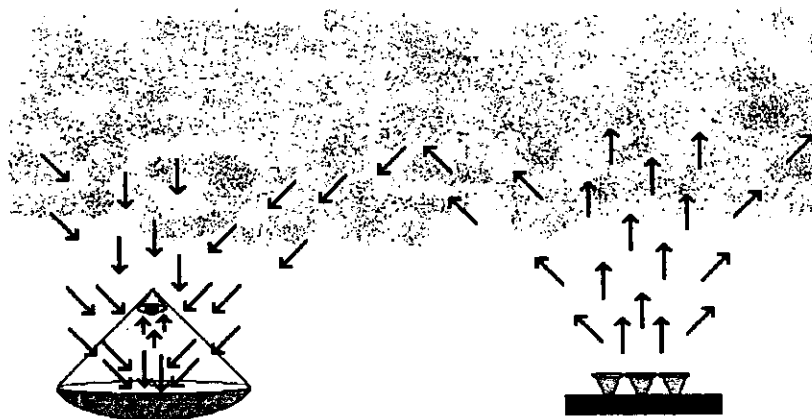


Figura 1. Representación esquemática del SODAR.

#### ***1.3.4. Principios de la medición del viento empleados por el SODAR Doppler.***

La baja atmósfera generalmente llamada capa límite superficial, que se extiende a no más de 100m sobre la superficie, abundante en inhomogeneidades de viento y de temperatura.

Cuando un pulso de frecuencia audible se transmite en la atmósfera, la onda interactúa con las inhomogeneidades y se dispersa. La señal reflejada se recibe por medio una antena acústica; y se almacena en el equipo receptor en forma de diferentes paquetes de datos que se despliegan en pantallas individuales en el sistema de despliegue lo que permite procesar la información para cada tiempo. Esta información, proviene de un volumen específico ( $\Delta V$ ) de atmósfera, que se conoce como volumen de dispersión. El cual engloba un ensamble de inhomogeneidades o dispersiones. El corrimiento en frecuencia de estas dispersiones nos proporciona una medición indirecta del viento.

La velocidad del aire dentro del volumen de dispersión se obtiene a partir de la ecuación conocida como ecuación Doppler<sup>19</sup>.

$$v = -\frac{c \Delta f}{2 f}$$

Donde  $\Delta f$  es el corrimiento Doppler en la frecuencia dispersada  $f$ ,  $c$  es la velocidad de fase de la onda acústica.

En meteorología los movimientos del aire en la vertical se consideran positivos, si son ascendentes y negativos si son descendentes; por lo tanto la ecuación anterior tiene signo negativo, pues si el movimiento del aire es ascendente la frecuencia disminuye.

---

<sup>19</sup> KHANNA R. M. "Doppler Sodar and Measurement of Atmospheric Wind" IETE Technical Review, Vol. 11, No. 4 July August 1994, pp 231-237

### *1.3.5 Elección del rango óptimo de frecuencias para un Radar Acústico (SODAR).*

El rango de frecuencias óptimas para un radar acústico debe ser un compromiso entre el incremento en la directividad, el mejoramiento de la resolución Doppler y la reducción de la interferencia debida a altas frecuencias; así como la atenuación experimentados cuando se alcanzan estas altas frecuencias.

El rango de operación del sodar, por regla general, no excede a 1 Km. Esto se debe a razones naturales, en primer lugar, la fuerte atenuación que experimentan las ondas sonoras en la atmósfera y el alto nivel de ruido ambiental de fondo en contraste con la señal dispersada por las inhomogeneidades atmosféricas.

Cuando la frecuencia aumenta, la atenuación del sonido también se incrementa, esto implica que a mayores distancias corresponden valores menores para la frecuencia.

Actualmente en los SODARES que se encuentran en operación se utilizan frecuentemente frecuencias portadoras en el intervalo de 1- 2KHz. Este intervalo se considera el más aceptable para la detección acústica dadas unas condiciones específicas de presión, temperatura y humedad en la baja atmósfera<sup>20</sup>.

Se ha observado que la detección acústica de la atmósfera puede emplearse para realizar mediciones de alturas que alcanzan los 1500m, en donde es posible determinar el perfil de la velocidad

del viento vertical (utilizando la técnica Doppler) y la localización de la capa de inversión.

En el siguiente capítulo mencionaremos algunas características importantes para la elección de los transductores a emplear en el diseño del experimento.

---

<sup>20</sup> KRASENENKO N.P. "Optimal Frequencies for meteorological SODAR". Inst. of atmospheric Optics. USSR Academy of Sciences. J. Acoust. Soc. Am. 75 (2). Pp 390 – 393. February 1984.

## ***Capítulo II***

### ***Transductores***

#### ***2.1 Transductores de Salida.***

##### ***2.1.1 Bocinas.***

Una bocina es un transductor electroacústico que convierte la energía eléctrica en acústica. Esta conversión se lleva a cabo en 2 etapas; la señal eléctrica provoca un movimiento mecánico en el cono o bien en el diafragma, el cual a su vez provoca ondas de presión en el aire. Estos transductores se dividen principalmente en: Electromagnéticos (utilizando el principio de bobina móvil), Electrostáticos (capacitivos) y Piezoeléctricos.

Existen 3 tipos de arreglos de bocinas que son los más comúnmente utilizados en los sistemas de sonido: radiador de cono, radiador de línea o columna y radiador de trompeta. En nuestro caso se emplea una bocina con radiador de trompeta.

Las bocinas de trompeta también reciben el nombre de cónicas, exponenciales o hiperbólicas de acuerdo a la forma en la cual se expande su área con la distancia a partir de su base. La trompeta constituye esencialmente un transformador acústico que acopla la impedancia del aire a la del pistón. En particular, la resistencia acústica en la garganta de la trompeta, es mayor que la que actuaría en un pistón de igual área vibrando en una pantalla infinita, y por consiguiente la salida acústica es mayor.



Es posible demostrar que si el cambio de área de sección transversal con la distancia es suficientemente pequeño, entonces las ondas que se propagan son esencialmente planas<sup>21</sup>.

El volumen de aire que se necesita para desplazar transmitir cierta potencia depende de la frecuencia. Y las bocinas que reproducen bajas frecuencias deben de tener mayores dimensiones que las que reproducen altas frecuencias para aumentar la eficiencia de conversión.

Dado que la velocidad de fase de las ondas ( $C_p = \omega/\beta$ ) es función de la frecuencia el aire en una trompeta de función exponencial constituye un medio dispersivo. Las ondas no se propagarán en la trompeta si la frecuencia de excitación es menor que la *frecuencia de corte*. Que es la frecuencia a la cual la velocidad de fase se vuelve infinita, lo cual indica que todas las partes de la trompeta se mueven en fase. La frecuencia de corte se expresa por medio de la siguiente relación:

$$f_c = \frac{mC}{4\pi}$$

Con  $m$  = constante de ensanchamiento y  $C$  = velocidad del sonido en el medio.

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente la estructura interna de una bocina del tipo electromagnético:

---

<sup>21</sup> KINSLER LAWRENCE E. "Fundamentos de Acústica". Edit. Limusa México 1995.

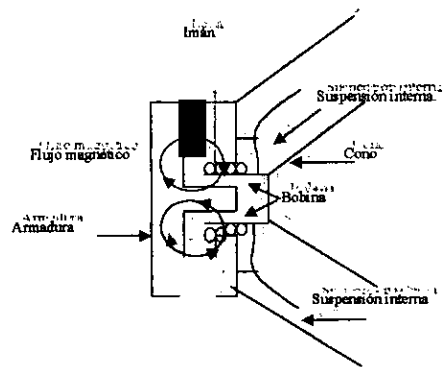


Figura 2.1.1 Estructura interna de una bocina de tipo electromagnético.

Las especificaciones más importantes para una bocina son:

- Directividad (dispersión).
- Distorsión.
- Eficiencia.
- Impedancia característica.
- Respuesta en frecuencia.

### ***Directividad (dispersión).***

La directividad de una bocina se encuentra determinada por el patrón de distribución de la radiación sonora. Otro término utilizado para definir este fenómeno es el de dispersión.

La directividad es función de la frecuencia. Debido al fenómeno de difracción las bocinas tienden a emitir hacia delante

El factor de directividad  $Q$  se define como la razón de la intensidad del sonido radiado sobre el eje de propagación entre la intensidad radiada promedio<sup>22</sup>. Cuando la longitud de onda es mucho mayor que las dimensiones del cono (trompeta) de la bocina la radiación es lo suficientemente uniforme en el hemisferio delantero, el nivel sonoro es solo de 10 o 15 dB menor para el hemisferio posterior, dependiendo del diseño del gabinete que se utilice.

A altas frecuencias, la radiación es principalmente hacia delante, y  $Q$  se incrementa del orden de 20 veces o más dependiendo de las dimensiones de la bocina. El patrón de radiación y la eficiencia de una típica bocina de 20 cm se muestra en la siguiente figura.

---

<sup>22</sup> ROSSING. "LOUDSPEAKER PERFORMANCE: EFFICIENCY, FREQUENCY RESPONSE AND DIRECTIVITY". *THE SCIENCE OF SOUND. Sections 20.10 - 20.20, 22.8, 22.10, 24.1.*  
DAVIS Don and Carol. "STANDARDS FOR LOUDSPEAKERS MEASUREMENTS". *SOUND SYSTEMS ENGINEERING ANSI 1.5 - 1963. Cap. 3.*

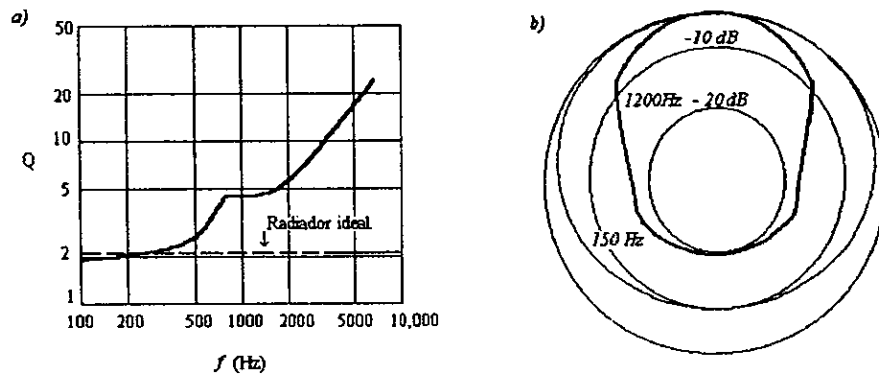


Figura 2.1.2 a) Patrón de radiación y b) factor de directividad  $Q$  para una bocina típica de cono con 20cm de diámetro.

El patrón de radiación polar indica el nivel sonoro relativo para cada ángulo, comparando con el nivel sonoro a la misma distancia del frente de la bocina.

Las bocinas de trompeta tienen una gran eficiencia en convertir la energía eléctrica en energía acústica. También pueden diseñarse para tener una gran directividad; de aquí que sean ampliamente utilizadas en sistemas de sonido. Para responder adecuadamente a frecuencias por debajo de 100Hz. por ejemplo, es necesario que la boca de la trompeta tenga un área al menos  $20\text{cm}^2$ .

### *Distorsión Armónica.*

Se definen como distorsión a las señales que aparecen a la salida de un sistema de reproducción de sonido que no pertenecen al mismo patrón de frecuencias de la entrada. La distorsión en una bocina depende en gran medida de la amplitud de las componentes de baja frecuencia, la distorsión armónica se debe normalmente a las siguientes causas:

- El cono se encuentra fuera de su rango lineal de trabajo.
- La bobina no se encuentra operando en un campo magnético uniforme.
- La intermodulación debida al efecto Doppler. Diferentes frecuencias pueden interaccionar para producir diversas portadoras productos de las distorsiones por intermodulación, que da como resultado un sonido distorsionado para altos niveles de potencia. Pero debido a que la potencia promedio en un a bocina es baja, la distorsión debida al efecto Doppler no es apreciable.

### *Respuesta a transitorios.*

La respuesta de una bocina a los transitorios o impulsos, se calcula haciendo el análisis de Fourier e integrando la respuesta en el tiempo y determina las frecuencias que pueden ser reproducidas. Esta respuesta está determinada en parte por el factor de amortiguamiento, el diseño del gabinete en donde se encuentre colocada la bocina e inclusive por la posición de los elementos.

### *Eficiencia.*

La eficiencia de una bocina ( $\eta$ ), se define como la potencia total radiada dividida entre la potencia eléctrica de entrada.

$$\eta = \frac{R_r / \phi^2}{R_R} \frac{R_0}{R_0 + R}$$

Donde  $R_0$  = Resistencia de la bobina;  $R_R = \phi_M^2 / R_F$ ,  $\phi_M$  = factor de transformación  $R_r$  = Resistencia de radiación<sup>23</sup>.

$$R = \frac{\phi_M^2}{R_m + R_r}; R_m = \text{resistencia mecánica.}$$

La razón  $R_r / (R_0)^2$  mide la conversión de energía mecánica en energía acústica y se conoce como *eficiencia mecánico-acústica* ( $\eta_{MA}$ ). Y la razón  $R_0 / (R_0 + R)$  mide la conversión de energía eléctrica en energía mecánica y se conoce como *eficiencia electromecánica* ( $\eta_{EM}$ ).

En la siguiente figura se bosqueja como la resistencia mecánica aumenta muy lentamente de 1Ns/m a muy bajas frecuencias, aumenta muy rápidamente entre 100 y 1000Hz conforme la resistencia de la radiación empieza a dominar, y después fluctúa alrededor de 14Ns/m a frecuencias superiores.

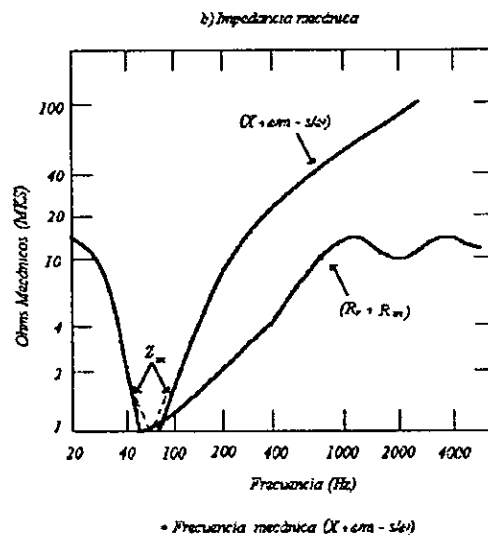
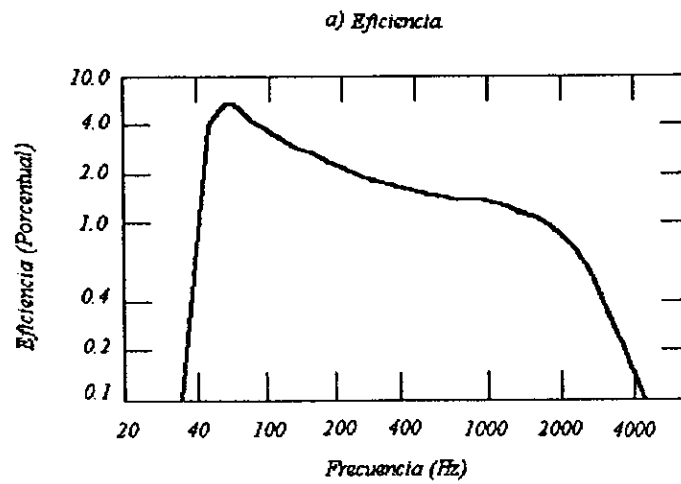


Figura 2.1.3. Propiedades de una bocina a) Eficiencia, b) Impedancia mecánica.

<sup>23</sup> KINSLER Lawrence E. "Fundamentos de Acústica" pp. 451 – 456. México 1995.

El intervalo de eficiencia, expresado en decibeles, se expresa como el  $10 \log \eta$ .

Otro parámetro relacionado con la eficiencia es la respuesta en presión, la cual se define como el nivel de la presión sonora a una distancia de un metro sobre el eje de propagación con una potencia de entrada de 1mW.

### 2.1.2 Amplificador..

Muy frecuentemente para poder analizar la señal proporcionada por algún sistema es necesario amplificarla con un mínimo de distorsión. Los equipos que hacen posible este proceso reciben el nombre de *amplificadores*.

Los amplificadores pueden clasificarse dependiendo de la señal a amplificar, de su ancho de banda, etc.

La clasificación de acuerdo a su ancho de banda incluye:

- C.D. en el intervalo de 0Hz. a 10 Hz.
- Audio en el intervalo de 20 Hz a 20Khz.
- Video o Pulsos en un intervalo por encima de algunos MHz.
- Radio Frecuencia considerando un intervalo que va de algunos KHz a cientos de MHz.
- Ultra alta frecuencia en un intervalo de cientos a miles de MHz.

En general la carga de un amplificador es una impedancia. Los 2 casos más importantes son: la carga resistiva ideal y el



circuito sintonizado operando cerca de su frecuencia de resonancia.

Algunas características importantes para un amplificador son las siguientes:

- *Distorsión no lineal.*

Este tipo de distorsión resulta de la generación de frecuencias en la salida que no se encuentran en la señal de entrada. Estas frecuencias se conocen con el nombre de "armónicos". Y son el resultado de la existencia del comportamiento no lineal de los elementos activos que conforman el amplificador.

- *Distorsión de intermodulación.*

Este tipo de distorsión se presenta cuando la señal de entrada se compone de diferentes frecuencias con diferente amplitud (armónicos de la frecuencia fundamental). Bajo estas condiciones la ganancia (A) es un número complejo cuya magnitud y ángulo de fase dependen de la frecuencia de respuesta del amplificador.

- *Distorsión de Transitorios.*

Esta distorsión resulta de un corrimiento de fase diferente de la señal para distintas frecuencias. Esta distorsión se debe al hecho de que algunas componentes no responden rápidamente al cambio en la señal.

- *Respuesta en frecuencia.*

Un criterio empleado para comparar un amplificador con otro respecto a su fidelidad de reproducción de la señal de entrada se proporciona a continuación: Cualquier forma de onda arbitraria puede reducirse a un espectro de Fourier. Si la forma de onda es periódica el espectro consistir de una serie de senos y cosenos cuyas frecuencias son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental.

Consideremos una señal senoidal de frecuencia angular  $w$  representada por  $V_m \text{ sen } (wt + \phi)$ . Si la ganancia de voltaje del amplificador tiene una magnitud  $A$ , y si la señal sufre un cambio de fase  $\theta$ , entonces la señal de salida será:

$$AV_m \text{ sen}(wt + \phi + \theta) = AV_m \text{ sen} \left[ w \left( t + \frac{\theta}{w} \right) + \phi \right]$$

De lo anterior, si la ganancia ( $A$ ) del amplificador es independiente de la frecuencia, si el corrimiento de fase  $\theta$  es cero, entonces el amplificador preservará la forma de la señal de entrada, aunque la señal se recorra en el tiempo una cantidad  $D = \theta/\omega$ .

Para un amplificador las frecuencias características se dividen en tres regiones: existe un intervalo llamado *frecuencia media*, dentro del cual la amplificación es constante con una ganancia  $A_0$  la cual normalizamos a  $A_0 = 1$  y sobre el cual el retardo es también constante. En la segunda región que se encuentra por debajo de la banda media, se conoce como región de *baja frecuencia*, en esta región la respuesta decrece con el decrecimiento de la frecuencia y en la salida se aproxima a cero DC ( $f = 0$ ). En la tercera región que se encuentra por encima del intervalo de frecuencia media se le conoce como región de *alta frecuencia*, la respuesta del circuito decrece con el incremento de la frecuencia.

En la siguiente figura se muestra gráficamente el comportamiento de un amplificador en estas 3 regiones:

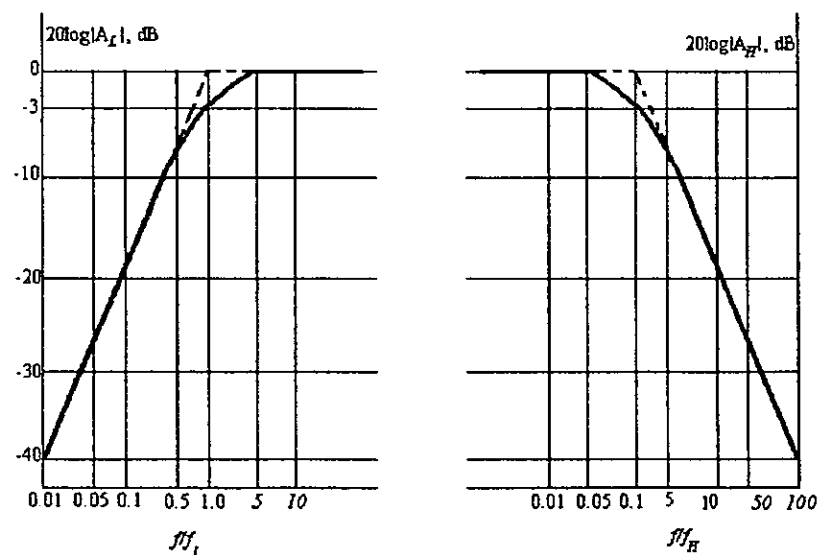


Figura 2.1.4 Diagrama de Bode idealizado que muestra la frecuencia de respuesta para un amplificador RC.

## ***2.2 Transductores de entrada.***

### ***2.2.1 Micrófono.***

Para realizar la transducción de la señal acústica producida por el sistema de bocinas empleamos un transductor electro-acústico (micrófono dinámico), el cuál se activa por medio de ondas sonoras y proporciona su equivalente en ondas eléctricas. Los micrófonos convencionales pueden clasificarse de diversas maneras: en base a su respuesta eléctrica, al tipo de transductor empleado en su construcción, o bien por su patrón de direccionalidad.

#### ***2.2.1 Características de funcionamiento.***

El funcionamiento de un micrófono se determina principalmente por los siguientes factores: las características de frecuencia de la respuesta de voltaje de salida a circuito abierto, de direccionalidad, de distorsión no lineal, y las características de relación señal a ruido. Existen otras características tales como la impedancia acústica característica y la respuesta transitoria característica las cuales son importantes pero que son mucho más difíciles de medir y especificar. En algunos casos el tipo de cable empleado afecta también el rendimiento.

Entre los tipos de transductores más empleados en la construcción de micrófonos tenemos los siguientes: dinámicos,

magnéticos, electrostáticos, piezoeléctricos, cerámicos, carbón, etc.

De la clasificación respecto a su patrón de direccionalidad tenemos: micrófonos omnidireccionales, bidireccionales, unidireccionales o cardioides; cuyo patrón de respuesta se muestra en la siguiente figura:

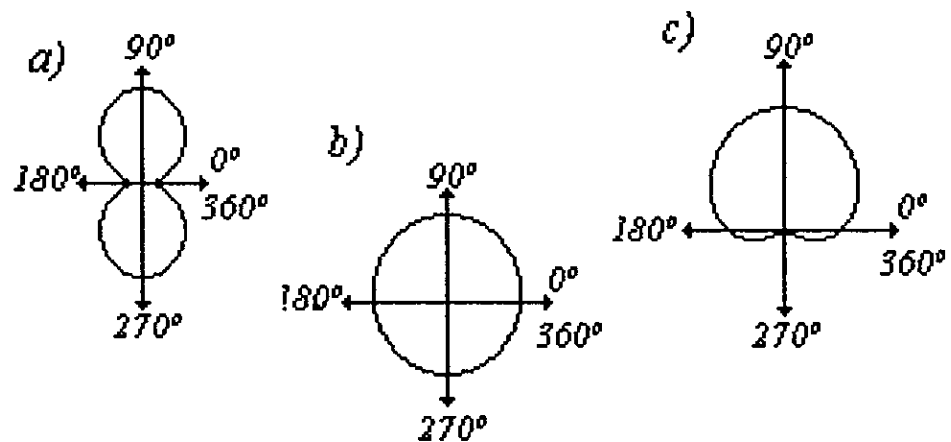


Figura 2.2.1 Patrón de direccionalidad a) Micrófono bidireccional,  
b) Micrófono omnidireccional, c) Micrófono unidireccional o cardioide

En diversas aplicaciones se requiere tener un micrófono con un máximo de sensibilidad en una sola dirección. El micrófono unidireccional más popular es el *cardioide*, llamado así debido a su patrón de direccionalidad.

Cuando una onda sonora proviene de la parte posterior del micrófono, la presión máxima y la mínima alcanzan la parte frontal y trasera del diafragma al mismo tiempo, y su desviación es mínima. Sin embargo una onda sonora proveniente del frente produce una desviación normal.

Es relativamente difícil obtener patrón de respuesta cardioide en un intervalo de frecuencias, de aquí que los micrófonos cardioides tienen una respuesta en frecuencia impar especialmente a bajas frecuencias.

### 2.2.2 Impedancia de un micrófono.

Los micrófonos se clasifican principalmente como micrófonos de alta impedancia y micrófonos de baja impedancia. Los micrófonos de cristal y los capacitivos tienen una alta impedancia de salida, a partir de  $50\text{K}\Omega$ . Por otro lado los micrófonos dinámicos tienen una baja impedancia de salida, típicamente de entre  $50\Omega$  y  $600\Omega$ .

En el tipo más común de micrófono dinámico, el sonido ejerce una presión sobre el diafragma lo que provoca que la bobina se desplace en el campo magnético producido por un imán, generando así un voltaje de salida. En la siguiente figura se muestra la configuración interna de este tipo de micrófonos.

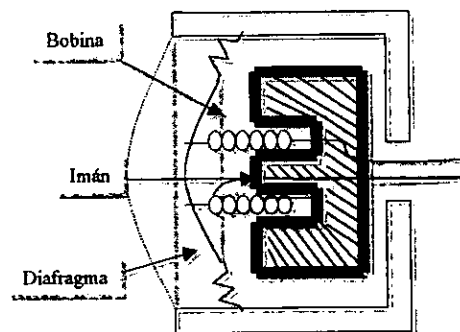


Figura 2.2.2 Configuración interna de un micrófono dinámico.

### 2.2.3 Colector.

La concentración y el comportamiento sobre superficies curvas fue tratado por primera vez por W.C Sabine<sup>24</sup>. Existen pocas publicaciones en la literatura, pero ninguna contiene un análisis cuantitativo. Las aplicaciones prácticas de los reflectores parabólicos se iniciaron alrededor de 1930. Olson y Wolff<sup>25</sup> sugirieron el uso de una construcción parabólica que se comportara como una bocina a bajas frecuencias y como reflector a altas frecuencias

La amplificación, en el foco de la parábola, de emisiones sonoras paralelas al eje transversal se da por la siguiente ecuación<sup>26</sup>:

$$F_p = \left\{ 1 + \left[ 4\pi \frac{a}{\lambda} \ln \left( 1 + \frac{l}{a} \right) \right]^2 + 8\pi \frac{a}{\lambda} \ln \left( 1 + \frac{l}{a} \right) \sin 4\pi \frac{a}{\lambda} \right\}^{1/2}$$

Con  $\lambda$  = Longitud de onda

Finalmente la amplificación en decibeles ( $\Delta L_p$ ) se obtiene por medio de la siguiente relación:

<sup>24</sup>W.C. SABINE, "Collected Papers on Acoustics". Harvard, 1927.

<sup>25</sup>H.F. Olson and I. Wolff. "Sound Concentrator for Microphones". J. Acoustic. Soc. Am. Vol. 1 1930.

<sup>26</sup>WAHLSTRÖM Sten. "The Parabolic Reflector as an Acoustic Amplifier". J.Audio Eng. Soc. Vol.33, No. 6 June 1985.

$$\Delta L_p = 20 \log F_p.$$

La amplificación de un reflector se incrementa del orden de 6 dB por octava sobre la región de frecuencia donde la distancia focal es del mismo orden que la magnitud de la longitud de onda del sonido,  $a/\lambda > 1$ . Y el reflector más eficiente es aquel un factor de  $l/a = 4$

Donde  $l$  = Distancia del vértice al plano definido por la boca de la parábola ( $18.5 \pm 0.05$ cm) y  $a$  = Distancia del vértice al foco ( $34.83 \pm 0.05$ cm).

La amplificación varía respecto al término senoidal en la ecuación anterior. Y es la interacción entre el sonido directo y el reflejado el que produce los patrones de ondas estacionarias frente al reflector cuando estas componentes tienen la misma intensidad. A continuación se muestran las gráficas teóricas de amplificación para diferentes distancias del vértice al foco.

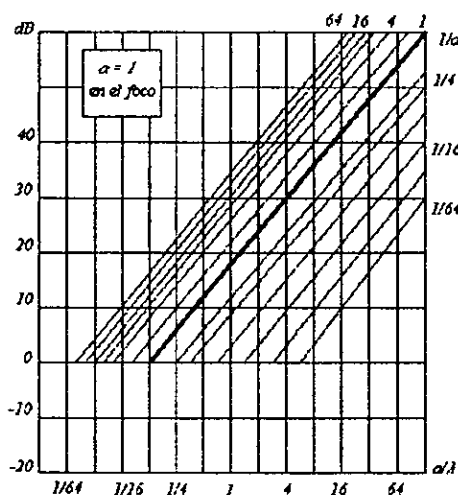


Figura 2.2.3 Amplificación teórica sobre el eje para un reflector con  $l/a = 1/4$ .



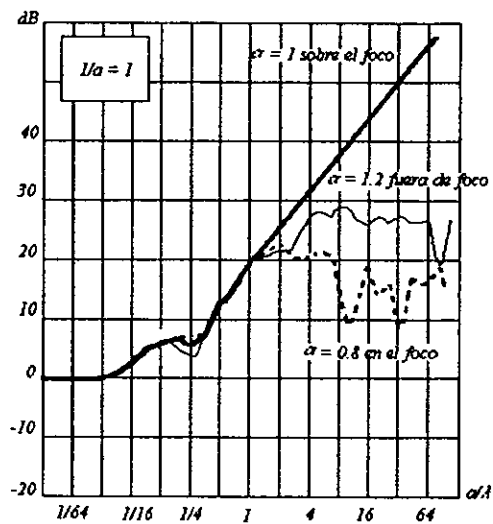


Figura 2.2.4 Amplificación teórica sobre el eje para un reflector con  $1/a = 1$

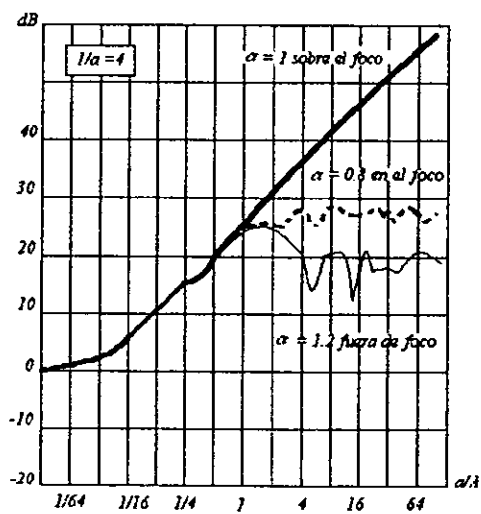


Figura 2.2.5. Amplificación teórica sobre el eje para un reflector con

$$1/a = 4$$

En el capítulo referente a la experimentación se describirá el tipo de transductores empleados para llevar a cabo el experimento.

## CAPITULO III

### Experimentación.

Para obtener valores confiables en la medición de la velocidad del viento vertical, es necesario considerar factores importantes, tales como: cambios atmosféricos atribuibles a inhomogeneidades en el medio de propagación; cambios climáticos provocados por cambios de temperatura, presión, humedad etc.

De aquí que fuese necesario diseñar un sistema con características muy específicas: gran sensibilidad, alta ganancia y bajo ruido para el preamplificador, una relación señal a ruido adecuada, y una potencia de salida que nos permitiera tener detección dada la naturaleza de las mediciones a realizar. Para llevar a cabo las mediciones se construyó un sistema emisor-receptor que se representa en el siguiente diagrama.

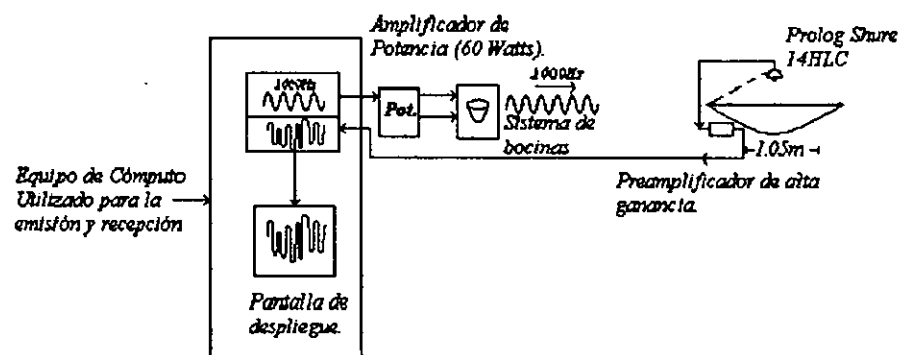


Figura 3.1.1 Diagrama del sistema emisor-receptor.

A continuación describiremos cada una de estas partes con mas detalle.

El análisis del sistema formado por el software y la tarjeta adquisidora de datos empleados en este trabajo no es el tema principal, consideraremos a dicho sistema como una fuente generadora de pulsos y un digitalizado de audio, sin ahondar en la parte de programación.

Cabe sin embargo mencionar que este sistema presenta, para su manejo, las siguientes características.

### ***3.1 Emisión***

#### ***3.1.1.1 Generación de Pulsos***

La señal emitida se genera a través de un sistema formado por un equipo de cómputo (386SX) y por la tarjeta adquisidora de datos (PCLAB- 812G) instalada en la computadora. Las características determinantes del sistema son: para el equipo de cómputo la frecuencia del reloj (33MHz) y para la tarjeta adquisidora de datos la duración mínima de un pulso ( $9.76\mu\text{seg}$ ) y la frecuencia de lectura (36.62 KHz).

Para generar la señal de salida, es necesario hacer uso del convertidor D/A tal que permita emitir una señal sonora discreta, integrado en la tarjeta adquisidora de datos (PCL -812PG), y que posteriormente la inercia de las bocinas puede integrar en una señal senoidal. La etapa de salida de esta tarjeta adquisidora tiene las siguientes características:

- Rango de salida (bipolar) de 0 a +/- 10 V.

- 2 canales de salida.
- Resolución de 12 bits.
- Voltaje de referencia interno de  $-10\text{ V} \pm 0.1\text{ V}$   
externo de  $\pm 10\text{ V} \pm 0.1\text{ V}$ .
- Linealidad  $\pm \frac{1}{2}$  bit.
- Tiempo de ajuste  $30\ \mu\text{seg}$ .

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques de esta tarjeta adquisidora de datos.

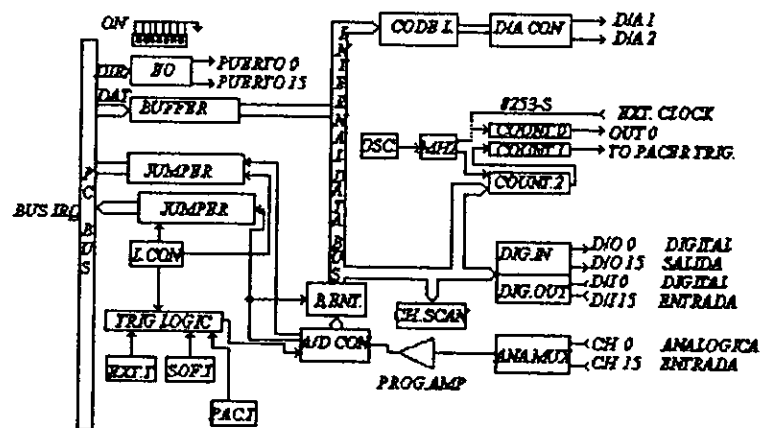


Figura 3.1.2 Tarjeta Adquisidora de datos PCLAB-812G.

Esta etapa se controla por medio de un programa encargado de generar una señal senoidal discreta, la cual se caracteriza por cuatro parámetros en el programa, ajustables dependiendo del experimento: el primero controla el número de elementos en cada

periodo, el segundo el número de periodos que dure la señal, el tercero la pausa entre emisión y recepción y finalmente el cuarto el canal de salida. El rango de los dos primeros parámetros se selecciona de forma tal que la señal generada se encuentra dentro del rango audible de frecuencias<sup>27</sup>.

PASO = Es el número de puntos por senoide. Este valor, previa calibración del sistema, nos permite variar la frecuencia del pulso emitido.

El PASO puede variar de 16 a 1024, lo que nos permite barrer el rango de frecuencias de 6900 a 200 Hz; utilizando en los experimentos la frecuencia de emisión en 1600Hz, lo que se logra con 64 puntos por senoide. La relación del PASO con la frecuencia se muestra en la siguiente tabla:

Frecuencia Hz.	Puntos por senoide
200	1024
400	512
800	128
1600	64
3200	32
6400	16

Tabla 3.1.1. Relación entre el PASO y la frecuencia.

<sup>27</sup> Este programa es aportación del Dr. Enrique Cabrera Bravo Investigador

NCICLOS = Es el número de periodos de señal emitida. Este número puede variar desde 1 hasta 128.<sup>28</sup>

RETARDO = Es el tiempo que la computadora debe esperar entre el fin de la emisión y el principio de la recepción.

CANAL = Dado que la tarjeta adquisidora cuenta con 2 canales de salida (el 4 y el 6), estamos en posibilidad de seleccionar por cual de ellos se emite la señal. En este caso se seleccionó el canal 4.

Así el generador de pulsos nos proporciona una señal senoidal con una amplitud de 10 Vpp +/- 0.1. Que posteriormente es enviada al exterior vía un amplificador de potencia y un sistema de bocinas en arreglo hexagonal.

### *3.1.1.2 Recepción.*

Al calibrar este sistema en particular, se encontró que la tarjeta PCLAB-812G es capaz de leer hasta  $36.62 \times 10^3$  lecturas por segundo, lo que equivale a un intervalo de  $T = 0.0275 \times 10^{-3}$  seg. Para ello el sistema no puede estar ocupado haciendo ninguna otra operación, por lo que el despliegue de la información capturada se hace por separado una vez concluida la lectura.

Esta etapa se controla mediante dos parámetros en el programa: NVAGONES y PAUSA.

NVAGONES = Es el número de veces que se realizan 1024 lecturas. Este parámetro varía de 1 a 16 vagones de datos. El valor 1024 está definido por la capacidad de memoria y corresponde al número de datos que pueden ser almacenados en la memoria para su análisis dadas las restricciones de un sistema de 16 bits.

PAUSA = Es el tiempo que el sistema debe esperar entre vagones. Este se determina en base a la distancia de muestreo estimada previamente.

### *3.1.1.3 Muestra de Resultados*

Dado que la resolución del monitor es de 640 x 480 pixeles, y que tenemos vagones de 1024 datos a desplegar, se divide cada uno de los vagones en 2 líneas de diferente color en la misma

---

<sup>28</sup>Al aplicar la transformada de Fourier encontramos que mayor número de pulsos por ciclos emitidos se obtiene una mejor aproximación a la frecuencia de estudio (Apéndice 2).



pantalla (desplegando 512 datos por color). El despliegue de la información recibida se realiza en forma gráfica, donde el eje de las abscisas esta dado en unidades de cuentas con su equivalencia en voltaje y el de ordenadas en lecturas que posteriormente se convierte en escala de tiempo. Dado el tiempo entre lecturas, el eje de las ordenadas queda calibrado de 0 a 14.08mseg.

Manualmente se pasa de desplegar un vagón al siguiente vagón.

Los datos capturados para cada uno de los vagones son almacenados en el disco duro en un archivo en formato ASCII para su posterior análisis.

### ***3.1.2 Amplificador de potencia.***

Dependiendo del punto de operación se determina su modo de operación, los amplificadores se clasifican en diferentes clases de trabajo:

- Clase A. Un amplificador clase A es aquel cuyo punto de operación y señal de entrada son tales que, la corriente en la salida del circuito fluye todo el tiempo. Un amplificador clase A opera esencialmente en la región lineal.
- Clase B. El amplificador clase B es aquel en el cual el punto de operación se encuentra en el extremo final de su región de operación característica. Si se aplica una señal senoidal, la amplificación tiene lugar únicamente en la mitad del ciclo.

- Clase AB. El amplificador clase AB es aquel que opera entre los 2 extremos definidos por las clases A y B, de aquí que para una señal senoidal de entrada la señal de salida sea cero para una parte del ciclo y menor que la mitad de la señal entrada.
- Clase C. Un amplificador clase C es aquel cuyo punto de operación se elige de manera que la señal de salida (voltaje o corriente) sea cero para mas de la mitad del ciclo de una señal de entrada senoidal.

Las clases AB y B se utilizan en amplificadores de potencia desintonizados, la clase C con amplificadores sintonizados de radio frecuencia.

Para eliminar la distorsión introducida por la no-linealidad de las características de transferencia dinámica puede utilizarse el amplificador Push-Pull operando en clase B.

Debido a la naturaleza del experimento se requiere de una intensidad considerable en la señal de salida. Una vez emitida la señal es necesario amplificarla tal que después de interaccionar con el medio sea posible identificarla al ser recibida por el sistema receptor. Así se propuso el siguiente diseño de amplificador de potencia<sup>29</sup>:

---

<sup>29</sup> Los diseños tanto del Amplificador de potencia como del Preamplificador de Instrumentación son aportaciones del Fís. Raúl Espejel Paz. Técnico Asociado titular "C" de tiempo completo. Instituto de Física U.N.A.M.

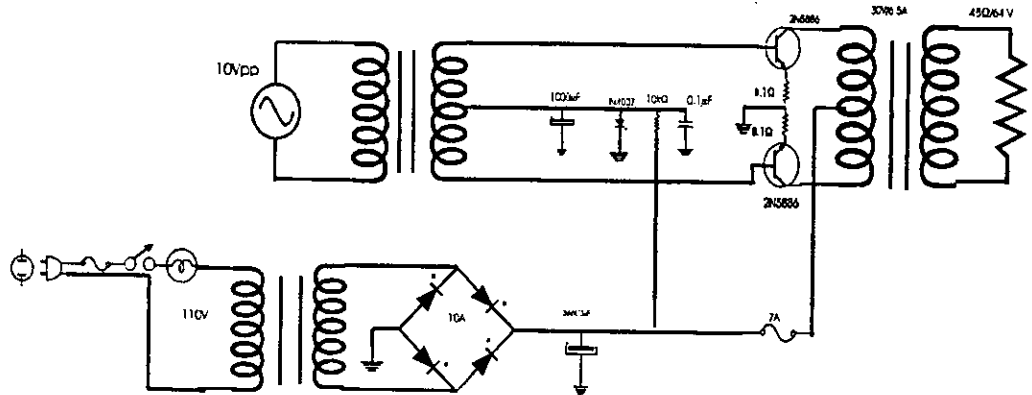


Figura 3.1.3 Diagrama de diseño del Amplificador de Potencia.

Esta configuración de amplificador se conoce como Push-Pull, (Contrafase) por la configuración que presenta. Esta configuración en particular atenúa eficientemente los armónicos pares, de manera tal que desaparecerá el 3<sup>er</sup> armónico que es la principal fuente de distorsión, esta eliminación se llevará a cabo siempre y cuando los transistores sean idénticos. El hecho de que el voltaje de salida no contenga a los armónicos pares, significa que el sistema Push-Pull tiene una simetría de *media onda* o de *espejo* adicionalmente al eje de simetría ubicado en el origen. La condición de simetría de espejo se representa matemáticamente de la siguiente forma:

$$i(\omega t) = -i(\omega t + \pi)$$

Las ventajas que presenta este sistema proporciona una mayor amplitud a la salida por elemento activo dada una cierta distorsión. Por lo que se emplea para disminuir la distorsión para la potencia de salida proporcionada por transistor. Otra de las ventajas estriba en que las corrientes de colector se oponen magnéticamente en el núcleo del transformador, lo que prácticamente elimina cualquier tendencia a la saturación en el núcleo y consecuentemente la distorsión no lineal.

Este amplificador opera en clase B, i.e. que se encuentra aproximadamente en corte; debido a que en esta clase es posible obtener una mayor potencia de salida y mayor eficiencia.

### ***3.1.3 Sistema de Bocinas:***

Para realizar la transducción de la señal eléctrica producida por el generador de pulsos empleamos un transductor electro-acústico (bocinas). Existen diversos tipos de transductores electro-acústicos y pueden clasificarse dependiendo del medio elemento radiativo que las conforma, este puede ser una membrana, un baffle o bien el medio ambiente directamente. Para nuestro caso particular utilizamos un sistema de bocinas de trompeta cubierta para intemperie del tipo dinámico en arreglo hexagonal como se muestra en la siguiente figura.

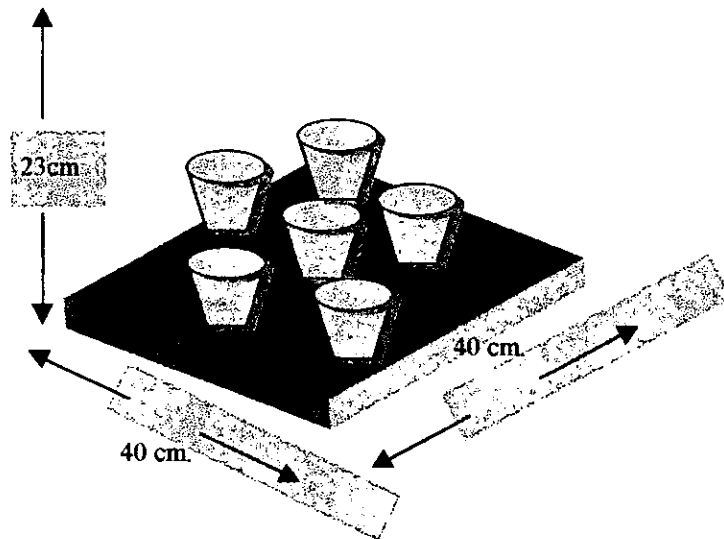


Figura 3.1.4 Arreglo hexagonal de bocinas empleado en el experimento.

Una bocina de trompeta que consta de un diafragma activado eléctricamente, y de una bobina acoplada acústicamente a la trompeta. La trompeta acústica transforma la alta presión generada en la garganta en baja presión distribuida en la boca de la trompeta. En la siguiente figura se observa una analogía entre el comportamiento de la trompeta y de un transformador.

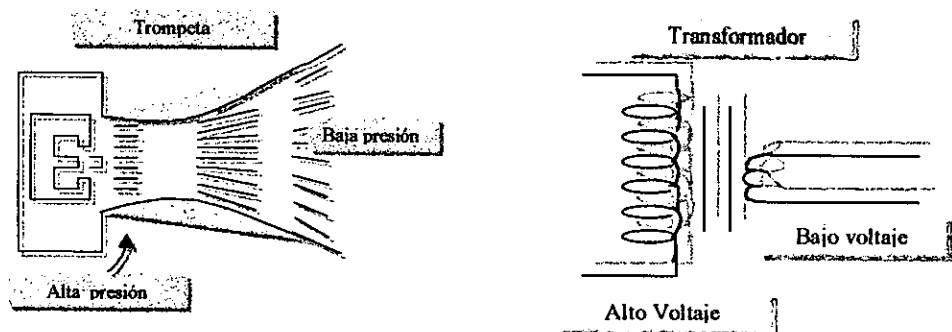


Figura 3.1.5 Analogía entre la trompeta acústica y un transformador.

Una bocina del tipo de trompeta, resulta ser un radiador de sonido muy eficiente, esta eficiencia alcanza entre un 40% y 50% comparada con la eficiencia típica del 3% al 5% para una bocina del tipo cono. Por lo tanto se emplean en lugares en donde se requiere una gran potencia de emisión. Las dimensiones de las bocinas utilizadas se determinaron considerando la longitud de onda de la frecuencia de emisión como:

$$\lambda/2 = 11.6 \times 10^{-2} m / 2 = 5.8 \times 10^{-2} m$$

Se emplearon las bocinas Sproam TR-525AD que tienen las siguientes características:

- Una impedancia nominal de  $8\Omega$ .
- Un ancho de banda de 750Hz. a 2700Hz.
- Soporta una potencia de 22.4 Watts.
- Presenta resonancias en 900Hz, 1300Hz y 1750Hz.
- Diámetro interno de  $12.6 \pm 0.05$ cm.

El arreglo hexagonal se determinó en base a la direccionalidad de la emisión, debido a que se requería la menor atenuación del haz emitido tal que se garantizara la mayor intensidad posible para la señal recibida. Mediante una simulación del comportamiento de este arreglo se determinó que entre mayor fuese el número de bocinas se tendría la mayor potencia y direccionalidad en la emisión. Sin embargo el número de bocinas elegido satisface el patrón de direccionalidad requerido.

Por otro lado era necesario tener el acoplamiento de impedancias tal que se cumplieran las condiciones establecidas para el teorema de máxima transferencia de potencia.<sup>30</sup>

En el apéndice 1 se muestra la simulación del patrón de emisión para este arreglo de bocinas. En estos patrones de emisión se considera un arreglo de fuentes ideales, que se encuentran en fase y con un omnidireccionamiento; además de suponer que no existen pérdidas al interaccionar con el medio de propagación<sup>31</sup>.

Con esta suposición garantizamos que la intensidad de la emisión se conserva, y que el patrón de emisión se mantiene independientemente de la altura a la que se emita la señal.

Para nuestro sistema real, se atenúa la emisión hacia atrás (180°) aislando el sistema con un gabinete de madera abierto sobre el cual se coloca el arreglo de bocinas. Por lo que se considera únicamente la emisión frontal de las bocinas.

---

<sup>30</sup> DIEFENDERFER A.J. "Instrumentación electrónica". Edit. Interamericana. 2ª edic. pp.45 Méx. 1986.

<sup>31</sup> El modelado del patrón de emisión es una aportación del M. En C. Ricardo Ruíz Boullosa Jefe de la sección de acústica del Centro de Instrumentos y del Ing. Antonio Pérez López adscrito a la sección de Acústica del Centro de Instrumentos U. N. A. M.

## ***3.2 Recepción.***

### ***3.2.1 Micrófono.***

Para nuestro caso particular era necesario contar con un micrófono capaz de recibir la señal reflejada por la atmósfera de manera que su patrón de respuesta fuese unidireccional, tal que garantizara recibir un porcentaje importante de la señal emitida originalmente. Por lo que se eligió un micrófono unidireccional que además tuviera una muy alta sensibilidad; ya que la señal que se recibiría se encuentra sumamente atenuada.

Se eligió un micrófono de tipo dinámico con respuesta cardioide (unidireccional) de la serie prolog 14H-LC.

El micrófono empleado tiene las siguientes características:

- Respuesta en frecuencias de 40 a 13000 Hz.
- Nivel de salida a 1kHz. 1.1 mV (-59.5 dB)
  
- Nivel de potencia de -60.5 dB (0 dB = 1V/ $\mu$ bar.)
- Alta impedancia de entrada.

A continuación se muestra gráficamente la respuesta en frecuencia para el micrófono empleado en el experimento.



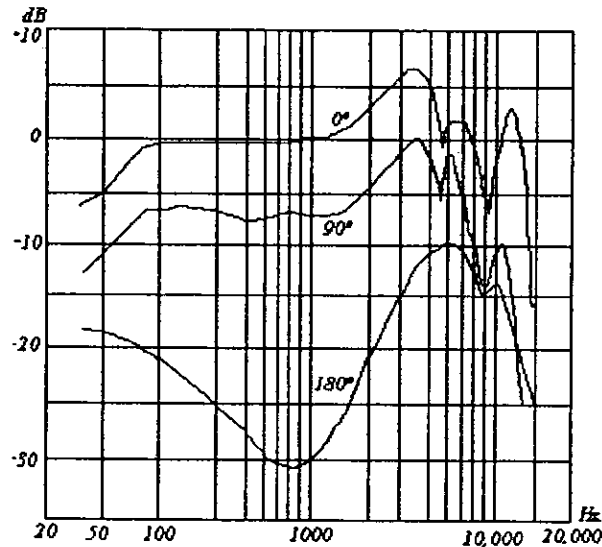


Figura 3.2.1 Gráfica que muestra la respuesta en frecuencia para el micrófono Shure-Prologe 14H-LC.

Debido a que la señal de voltaje de salida producida por este tipo de micrófonos es muy débil, es necesario amplificar esta señal tal que sea detectable para su procesamiento.

Realizamos 2 etapas de amplificación; la primera consiste en montar al micrófono en el foco de un espejo parabólico, como el que se muestra en el esquema inicial. De esta manera garantizamos que el haz reflejado sobre este espejo incida sobre el micrófono unidireccional con la mayor intensidad posible. Este espejo parabólico tiene un diámetro de 1.05m y una distancia focal de  $50 \pm 0.05$  cm. El micrófono se colocó en el foco de este espejo parabólico de manera que se garantizara captar esta señal con la mayor intensidad posible. Como se mencionó en el capítulo anterior, la amplificación proporcionada por el colector es función del diámetro, de la distancia focal, de la longitud de onda y de la distancia del vértice a la superficie, al sustituir en la relación para

$F_p$  y  $\Delta L_p$  obtenemos una amplificación teórica de 21.55 dB. Debido a que la intensidad de la señal recibida no es suficiente para procesarla, recurrimos a la instrumentación electrónica para llevar a cabo la etapa de amplificación en la recepción.

### 3.2.2 Preamplificador de Instrumentación.

A continuación presentamos el diseño del amplificador de instrumentación empleado en este experimento.

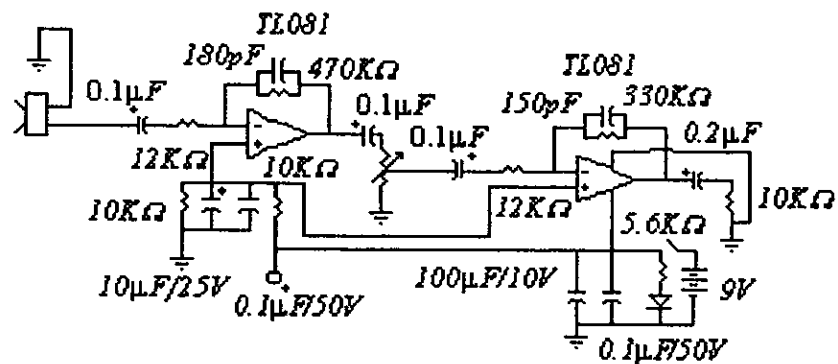


Figura 3.2.1 Diagrama de diseño del preamplificador de Instrumentación.

Consideremos la primera parte del circuito. Para esta parte determinaremos en una primera aproximación su frecuencia de corte inferior ( $R = X_C$ ) considerando el arreglo RC en serie y la frecuencia de corte superior ( $R = X_C$ ) considerando el arreglo RC en paralelo. Así obtenemos lo siguiente:

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(0.1\mu F)(12K\Omega)} = 132.62Hz.$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(180pF)(470K\Omega)} = 1.881KHz.$$

La polarización de referencia para los amplificadores operacionales se obtiene del divisor de voltaje formado por las resistencias de  $10K\Omega$  y los capacitores de  $10\mu F/25V$  y de  $0.1\mu F$  como elementos de desacoplamiento.

Análogamente realizamos el análisis para la segunda parte del circuito:

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(0.1\mu F)(12K\Omega)} = 132.62Hz.$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(150pF)(330K\Omega)} = 3.215KHz.$$

A continuación calculamos la amplificación de banda media (ganancia  $A_v$ ) para la primera parte del circuito de la siguiente manera:

$$A_{v_1} = \frac{R_R \parallel X_R}{R_f + X_f} = \frac{470K\Omega \parallel 552.621K\Omega}{12k\Omega + 994k\Omega} = \frac{253.986K\Omega}{12.994K\Omega} = 19.77 \cong 20$$

Con :

$$X_R = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1.6KHz)(180pF)} = 556.621K\Omega$$

$$X_f = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1.6KHz)(0.1\mu F)} = 994.71\Omega$$

De manera análoga para la segunda parte tenemos:

$$A_{v_2} = \frac{R_R \parallel X_R}{R_f + X_f} = \frac{330K\Omega \parallel 663.145K\Omega}{12k\Omega + 994k\Omega} = \frac{220.348K\Omega}{12.994K\Omega} = 16.98 \cong 17$$

Con:

$$X_R = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1.6KHz)(150pF)} = 663.145K\Omega$$

$$X_f = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(1.6KHz)(0.1\mu F)} = 994.71\Omega$$

La ganancia total del circuito es entonces:

$$A_{v_t} = A_{v_1} \cdot A_{v_2} = (20)(17) = 340$$

Cuando posicionamos el potenciómetro en  $1K\Omega$ , obtenemos la máxima ganancia.

### 3.3 Realización del Experimento.

Se montó el sistema como se muestra en el siguiente diagrama:

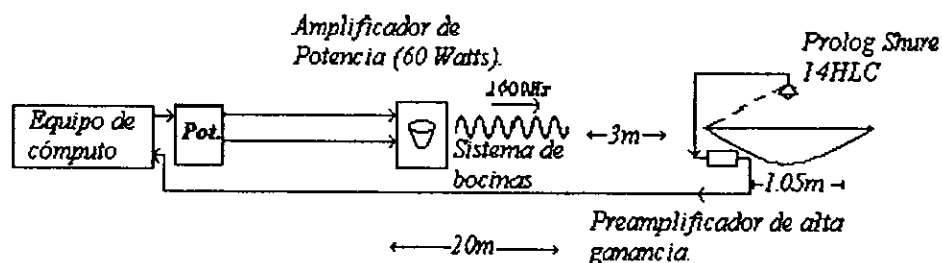


Figura 3.2.2 Montaje del experimento.

El micrófono se encuentra montado en el foco del colector parabólico ( $50.5 \pm 0.05$  cm respecto al vértice de la parábola.) El arreglo de bocinas se encuentra localizado a 3m de distancia del sistema micrófono colector.

El equipo de cómputo así como el amplificador de potencia se encuentran localizados en la planta baja del edificio principal del Instituto de Física y el sistema receptor – emisor se ubica en la azotea de este edificio ( $\cong 12$ m respecto al suelo).

Por esta razón se realizaron las conexiones del amplificador de potencia al arreglo hexagonal de bocinas con cable duplex calibre 12, de manera tal que se evitaran en lo posible las pérdidas de señal y las señales parásitas (ruido eléctrico).

Los experimentos se llevaron a cabo entre 6:30 y 7:15 a.m; de manera que evitara en lo posible la contribución no deseada de una componente de velocidad debida a la convección producida por el calentamiento de la superficie al incidir energía solar sobre la misma

Para la calibración del sistema se emitió una señal senoidal con una frecuencia conocida ( $2985 \pm 62.2\text{Hz.}$ ), un número de ciclos determinado (16 ciclos). Que se hizo incidir en una superficie sólida (madera) con un área de 87cm X 28.5cm.

Posteriormente se llevaron a cabo pruebas a diferentes horarios bajo las mismas condiciones (16 ciclos a  $2985 \pm 62\text{Hz}$  Hz.). Y más adelante se realizaron pruebas variando la frecuencia así como el número de ciclos por emisión.

## *Capítulo IV*

### *Resultados, Análisis y Conclusiones.*

#### *4.1 Implementación del radar acústico (SODAR).*

De la discusión anterior podemos decir que la detección acústica ofrece ventajas considerables para la medición remota de parámetros atmosféricos. Por consiguiente procedemos a estimar los requerimientos del sistema para una detección efectiva.

La ecuación del radar aplicada al caso monoestático (i.e. colocar un emisor y un receptor), proporciona la potencia recibida como:

$$P_r = P \cdot \sigma \cdot C \cdot \tau / 2 \cdot A_r \cdot 1/R^2 \cdot L$$

Donde  $P$  es la potencia acústica irradiada,  $\sigma$  es la dispersión a través de la sección transversal con  $\theta = 180^\circ$ ,  $C$  es la velocidad del sonido,  $\tau$  es la longitud del pulso,  $A_r$  es el área colectora de la antena receptora,  $R$  es el alcance de la región de dispersión, y  $L$  es el factor de atenuación, tomado considerando a la antena, la eficiencia del transductor y la atenuación atmosférica a lo largo de la trayectoria de y hacia la región de dispersión.

Para nuestro caso particular:

$P \cdot \eta = 60 \text{ watts} \cdot \eta$ ;  $\eta = \text{eficiencia electroacústica de la bocina.}$

$\tau = 2.81 \times 10^{-2} \text{ seg.}$  ( $\lambda = 11.6 \times 10^{-2} \text{ m}$  lo que corresponde a  $f \approx 3 \text{ KHz}$ . Y al emitir 16 ciclos tenemos una longitud de pulso de 1.85m).

$$R = 150 \text{ m}$$

$$A_r = 1 \text{ m}^2$$

Tenemos entonces que:

$$P_r = 12.73 \times 10^{-3} \sigma L \text{ (watts).}$$

Para el caso de dispersión en sentido opuesto a la dirección de propagación, esto se reduce a:

$$\sigma = 0.0039 (2\pi / \lambda)^{1/3} (C_r / T)^2$$

Tomando  $\lambda = 11.60 \times 10^{-2} \text{ m}$  ( $f \approx 3000 \text{ KHz}$ ),  $C_r = 4.6 \times 10^{-2} \text{ grados-metro}^{-1/3}$  y  $T = 300^\circ \text{K}$ , tenemos:

$$\sigma = 7.98 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{m}^3$$

Empleando este resultado tenemos:

$$P_r = 9.2419 \times 10^{-10} L \text{ (watts).}$$



Para considerar la detectabilidad de esta potencia recibida es necesario estimar el valor del factor de atenuación  $L$  y de aquí determinar la interferencia contra la cual se detecta la señal. El factor de atenuación se determina a partir del factor de eficiencia de la antena receptora (i.e la razón de la potencia de la señal eléctrica de salida de las

bocinas respecto a la señal acústica incidente sobre el área del colector) y la absorción de la energía acústica por el medio durante su propagación.

Considerando los valores típicos para el factor de atenuación considerando la eficiencia de la antena receptora y de la atenuación atmosférica tenemos que:

$$L = 5 \times 10^{-3}$$

Por lo que:  $P_r = 4.62 \times 10^{-11}$  watts. Por lo que esta señal eléctrica no es comparable con el nivel de ruido que se presenta a la entrada del preamplificador. Para un ancho de banda de 100Hz y temperatura atmosférica normal (20°C) la potencia del ruido acústico – térmico es de alrededor de  $4.2 \times 10^{-18}$  watts<sup>32</sup>. Steven Baruch mostró que el ruido acústico ambiental en condiciones de quietud es del orden de 20dB por encima de  $10^{-16}$  W. cm<sup>-2</sup> para una banda centrada en 1KHz y decrece alrededor de 5dB por octava al incrementarse la frecuencia<sup>33</sup>. Si asumimos que el ruido es de origen isotrópico, el área colectora efectiva será de:  $\lambda^2 / 4\pi = 10.707 \text{ cm}^2$  para una potencia de ruido acústico de  $3.75 \times 10^{-16}$  watts.

<sup>32</sup> LITTLE C. GORDON. "Acoustic Methods for Remote Probing of the Lower Atmosphere". Proceedings of IEEE. Pp 571 – 578. April 1969

<sup>33</sup> K.N. Stevens and J.J Baruch. Handbook of Noise Control. C.M. Harris. Ed. New York. Pp 35-1 35-17. Mc. Graw Hill 1957.

La potencia de ruido acústico que se puede obtener está dada por la siguiente relación<sup>34</sup>.

$$P_a = kTB.$$

Donde  $k$  = a la constante de Boltzman ( $1.3805 \times 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}^{-1}$ ),  
 $T$  = Temperatura absoluta del aire ( $293^\circ\text{K}$ ),  $B$  = Intervalo de frecuencia observado. Para un intervalo de frecuencia de 100Hz y condiciones normales de temperatura y presión (STP), la potencia de ruido acústico sería de alrededor de  $4.2 \times 10^{-19}$  Watts.

La potencia acústica recibida se obtiene a partir de la ganancia de voltaje de entrada:

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = 340$$

De la gráfica 4.1.3. observamos que el voltaje registrado a la salida del preamplificador es de  $8 \pm 0.5 V_{pp}$ . El voltaje de entrada al micrófono es de 23.5mV, la potencia recibida es de:

$$P_r = V^2 R = (23.5mV)^2 50K\Omega = 27.6 \text{ watts}$$

Así la potencia de la señal acústica recibida excede a la potencia estimada para la interferencia (ruido acústico) por lo que podemos esperar una recepción adecuada de la señal.

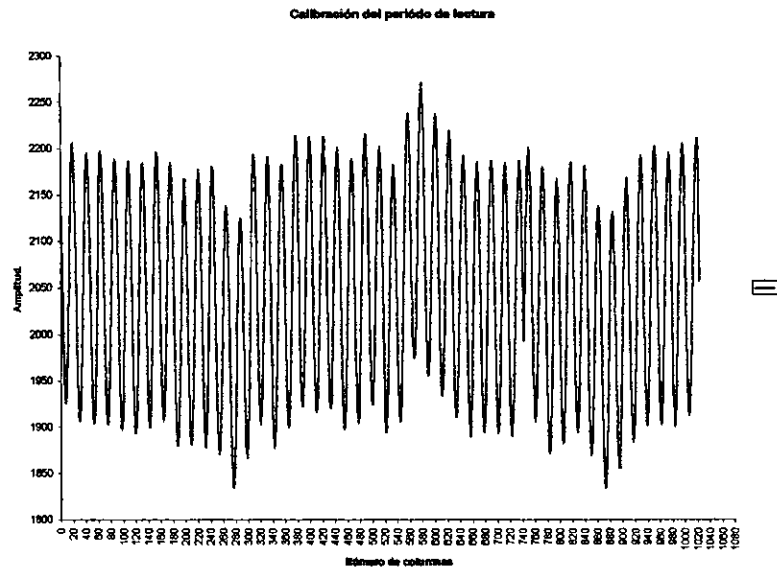
---

<sup>34</sup> LITTLE C.GORDON. "Acoustic Methods for Remote Probing of the Lower Atmosphere". Proceedings of IEEE. Pp 571 – 578. April 1969

#### ***4.1.2 Calibración del sistema emisor-receptor.***

##### ***4.1.2.1. Procedimiento.***

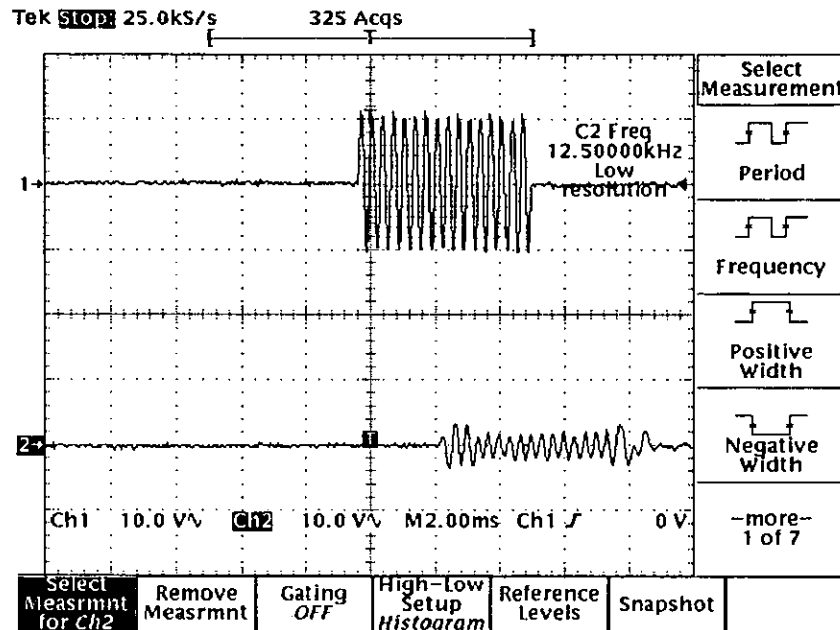
Para determinar el tiempo de lectura por columna para el sistema emisor (computadora-tarjeta adquisidora de datos-amplificador de salida) se alimentó al equipo de cómputo con una señal senoidal de frecuencia conocida empleando un generador de funciones ( $1613 \pm 5$  Hz relativos a la oscilación de la escala de medición del frecuencímetro utilizado para calibrar el generador de funciones). Esta señal se adquirió por el sistema receptor (micrófono-preamplificador de instrumentación-canal de adquisición de datos de la tarjeta-computadora) para almacenarse en el archivo correspondiente y desplegarse gráficamente en pantalla. Del archivo de datos numéricos se determinaron los puntos de cruce por cero que corresponden a un número determinado de columnas y de esta manera determinar el periodo de lectura de la tarjeta correspondiente a esta frecuencia. Al graficar estos datos se obtiene lo siguiente:



Gráfica 4.1.1. Datos experimentales obtenidos para determinar el periodo de lectura del sistema receptor.

Del análisis gráfico determinamos que el periodo de lectura correspondiente a cada columna es de  $.02666 \pm 0.0008$  mseg.

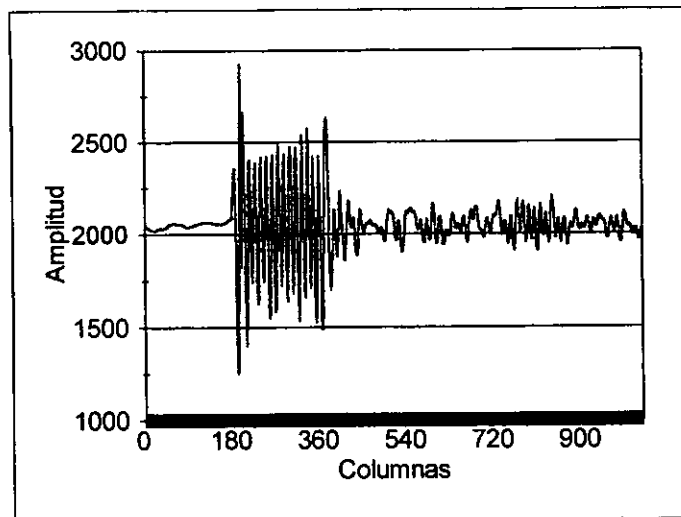
Posteriormente se determino la frecuencia para una emisión de 64 puntos por senoide y desplegando la señal emitida y recibida por el sistema (emisión receptor) a un osciloscopio Tektronic con memoria para almacenar los datos obtenidos, encontramos gráficamente lo siguiente.



Gráfica 4.1.2. Despliegue de señal emitida por el sistema emisor en el canal 1 y señal recibida en el sistema receptor canal 2.

Al analizar el despliegue de datos en el osciloscopio determinamos la frecuencia para la señal emitida. Obtuvimos una frecuencia de emisión de y recepción de  $2985 \pm 62\text{Hz}$ . Se analizaron los resultados gráficamente para determinar la validez de las mediciones. Se tomaron lecturas a una distancia conocida (.87m y 1.4m); encontramos un error sistemático 0.5mseg entre emisión y recepción.

Existe un intervalo de tiempo de adelanto en la recepción de y el término de la emisión. Este tiempo se asocia al retraso entre orden de finalizar escritura y término de escritura, relacionado con el almacenamiento de los datos en el buffer de salida de la tarjeta adquisidora de datos. A continuación se muestran gráficamente estos datos.



4.1.3 Gráfica que muestra los datos recibidos con un adelanto de 87columnas correspondientes a 0.5mseg respecto al término de la emisión

Posteriormente se obtuvo experimentalmente la curva de calibración, se hizo una correlación entre frecuencia y número de puntos. La frecuencia generada por el programa se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$f = A \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi i}{n}\right),$$

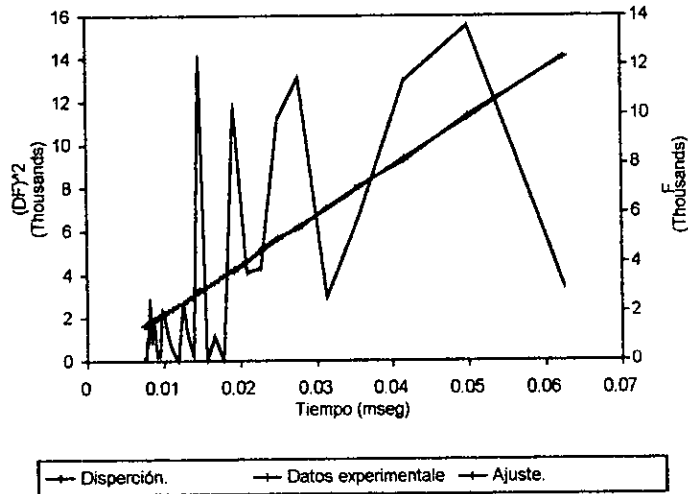
$$i = 0, \dots, (n-1)$$

Donde  $n$  es el número de puntos por senoide y  $A = 2048$  (amplitud para despliegue), Los datos obtenidos para la correlación se muestran en la siguiente tabla.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	No de puntos	Fz(exp)	1/n	199237n-86 622	Detos Experimentales	(Fz(exp)-Fz(teo))^2	Constante	Salida de Regresión:		
1	16	12307	0.0625	12365 6654	180	3441 62915716				-86 6221
2	20	10000	0.05	9875 2079	80	15573.06822241	Err Estándar Est Y			84 1136
3	24	8101	0.04167	8214 9029		12973.87082841	R Cuadrado			0.99945
4	28	7111	0.03571	7028.9707571429		6728.7966837161	Nº de Observaciones			31
5	32	6194	0.03125	6139.52165	50	2967.8906187224	Grados de Libertad			29
6	36	5333	0.02778	5447.7279	81	13162.49103841				
7	40	5000	0.025	4894.2929		11173.99099041	Coefficiente(s) X			199237
8	44	4507	0.02273	4441.4824454545		4292.5499536165	Err Estándar de Coef.			870.177
9	48	4000	0.02083	4064.1404		4113.99091216				
10	52	3636	0.01923	3744.8509769231		11848.535177108	Promedio Exp =			118238.3
11	56	3478	0.01786	3471.1743285714		46.58979045082	Promedio Exp ^1/G			62.24836
12	60	3200	0.01667	3233.9879		1155.17734641				
13	64	3030	0.01563	3026.449775		12.604097550625				
14	68	2962	0.01471	2843.3279		14083.06731841	Promedio teórico=			119206.2
15	72	2886	0.01389	2680.5529		211.78689841	Promedio teórico *			62.01097
16	76	2500	0.01316	2534.9121105263		1218.8554614017				
17	80	2352	0.0125	2403.8354		2686.90869316				
18	84	2285	0.0119	2285.2421857143		0.0586539202041				
19	90	2105	0.01111	2127.1179		489.20150041001				
20	94	2000	0.01064	2032.9181978723		1083.4760823711				
21	98	1904	0.0102	1946.4044308122		1798.1357355487				
22	102	1818	0.0098	1866.6779		2369.53794841				
23	106	1777	0.00943	1792.9684660377		254.90190759832				
24	110	1739	0.00909	1724.8197181818		206.79250517033				
25	114	1702	0.00877	1661.0873738842		1675.4796971081				
26	118	1632	0.00847	1601.8236627119		910.81133212732				
27	122	1600	0.0082	1546.4647852459	32	2666.0192187674				
28	126	1523	0.00794	1494.6207571429		805.38142514469				
29	128	1500	0.00781	1469.9138375	142	905.17717397641				
30	130	1454	0.00769	1445.9671307692	30	64.526966078638				
31	134	1391	0.00746	1400.2181985075	28	84.975183722986				

Tabla 4.1 Regresión lineal para los datos de calibración del sistema emisor.

Calibración del sistema emisor.



Gráfica 4.1.4. Calibración en Frecuencia del sistema emisor.

Gráficamente encontramos que para 64 puntos por senoide tenemos una frecuencia de  $3030 \pm 62$  Hz. Esto se debe a que la velocidad del sistema equipo de cómputo-tarjeta adquisidora debe calibrarse para cada computadora dadas las características que presenta cada equipo de cómputo de manera particular.

Una vez calibrado el sistema emisor-receptor se procedió a realizar los siguientes experimentos.



### 4.1.2.2 Experimentos de calibración.

En la siguiente figura se muestra la disposición del sistema emisor – receptor en el experimento realizado para tener un marco de referencia respecto al comportamiento atmosférico.

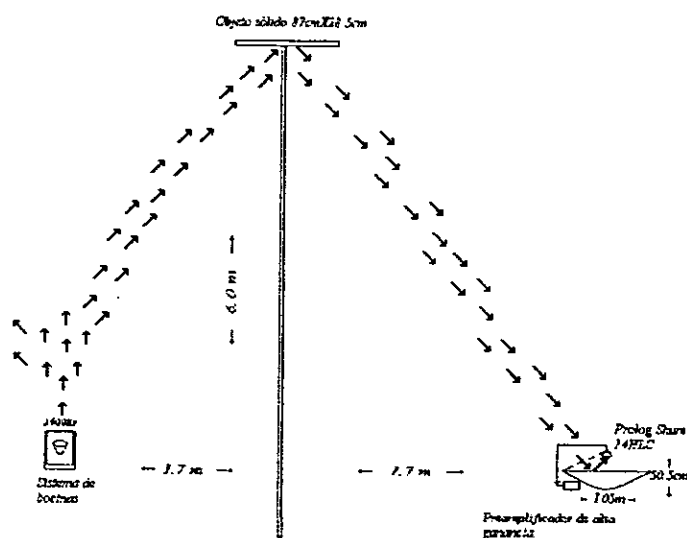
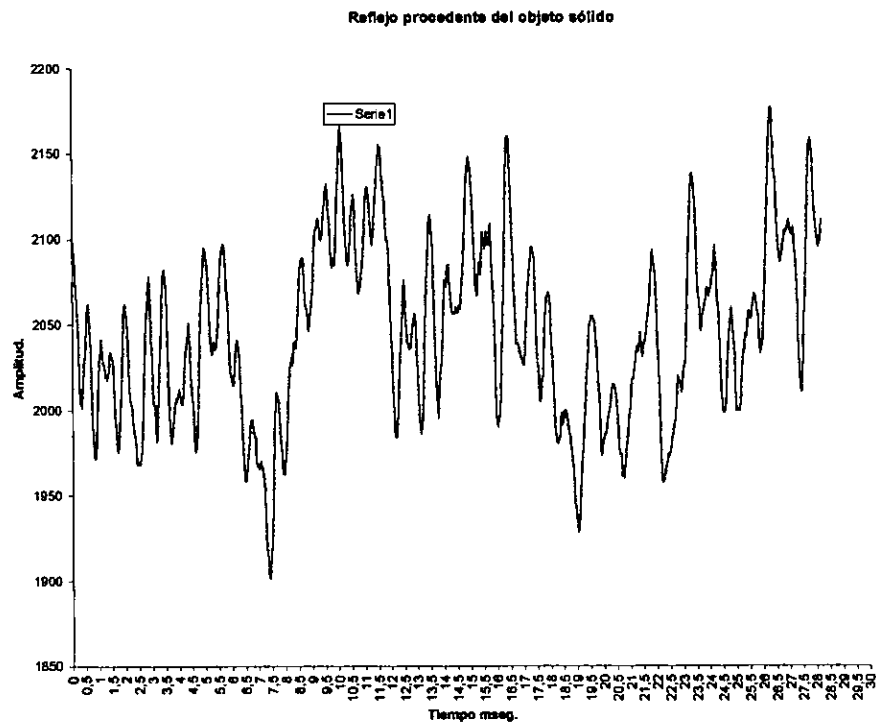


Figura 4.1.1. Distribución del sistema emisor – receptor empleado para la calibración.

A continuación presentamos gráficamente los datos obtenidos para el pulso reflejado por el objeto sólido.



Gráfica 4.1.5. Reflejo del objeto sólido 2º tren.

Considerando la distancia a la que se encontraba el objeto sólido (6.22m) se recibió el eco producido por el reflejo de la señal enviada en el 2º tren recibido, se analizó la gráfica correspondiente a las series de datos almacenados después de la emisión del pulso y el reflejo del mismo. Encontramos un ligero corrimiento respecto a la frecuencia de emisión obtenida previamente en la calibración ( $2052 \pm 62 \text{ Hz}$ ). La frecuencia obtenida es de  $2000 \pm 62 \text{ Hz}$ , que tiene un corrimiento de  $52 \pm 62 \text{ Hz}$

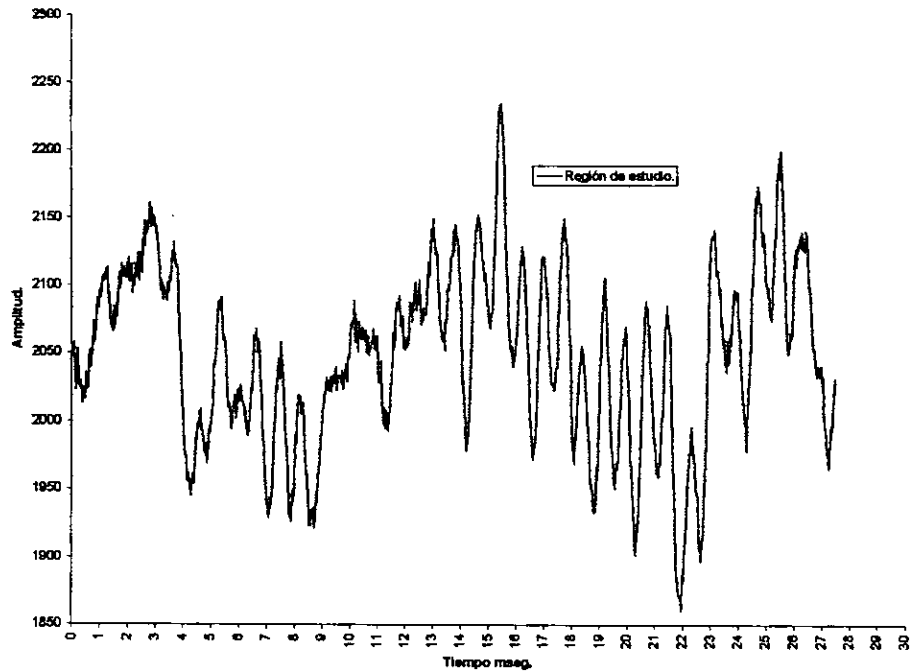
Obtuvimos la distancia a partir del tiempo de retraso en la recepción. El tiempo en el cual aparecería el reflejo del objeto se determinó de la siguiente forma:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{12.97m}{341m/seg} = 38mseg$$

La señal producida por el reflejo del pulso proveniente del sólido se registraría a 38mseg que corresponde al inicio de la 2a pantalla ( $2.66mseg \pm 0.008mseg$ ). Analizamos los resultados obtenidos gráficamente para el 2º despliegue y encontramos que el tiempo en el que se presenta el pulso reflejado coincide con el tiempo calculado para esta distancia (6.22m)

A continuación mostramos la gráfica correspondiente al reflejo de un pulso de 16 ciclos, el cual se envió directamente a atmósfera con el fin de determinar la velocidad del viento vertical al medir el corrimiento Doppler.

Reflejo proveniente de la atmósfera a una distancia de 32.55m de altura.



Gráfica 4.1.6. Reflejo atmosférico correspondiente a una distancia de 32.55m que corresponde a la distancia de recorrido total respecto a la ubicación del sistema emisor – receptor.

Al analizar estos datos obtuvimos los siguientes resultados:

#### **4.2. Resultados.**

En el análisis de frecuencias realizado para el reflejo atmosférico encontramos que la frecuencia dominante para este tren es de  $3030 \pm 62\text{Hz}$  que tiene un corrimiento  $\Delta f = 45\text{Hz}$

respecto a la frecuencia de emisión. para esta prueba que muestra en la gráfica 4.1.2 ( $2985 \pm 62\text{Hz}$ ). Para determinar la velocidad del viento vertical utilizamos la relación empleada para determinar esta velocidad por el SODAR Doppler:

$$v = -\frac{c \Delta f}{2 f}$$

Considerando la velocidad del sonido a  $27^{\circ}\text{C}$  ( $348\text{m/seg.}$ )obtenemos que la velocidad del viento vertical es de  $2.62\text{m/seg}$  con una confiabilidad del 80% a  $32.55\text{m}$  de altura respecto a la ubicación del sistema<sup>35</sup>

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para diferentes alturas.

Altura (m)	Corrimiento en frecuencia respecto a la emisión (hz)	Velocidad (m/seg)	Observaciones
10.23	46	-3.68	*Datos tomados durante la mañana (6:30-7:15 a.m.)
20.57	75	6.00	*
25.57	36	-2.9	*
32.55	45	2.62	*

Tabla 4.2.2 Relación de alturas y velocidades obtenidas a partir de los corrimientos en frecuencia

<sup>35</sup> Estas velocidades se encuentran dentro del intervalo de velocidades reportadas por la RAMA (Red Automática de Monitoreo Ambiental)

Estos resultados se encuentran dentro de las velocidades reportadas en trabajos previos que muestran valores desde 0.44m/seg hasta 6 m/seg<sup>36</sup>.

Posteriormente para una frecuencia de emisión lateral (2000  $\pm$  62) Al emitir 16 ciclos por pulso, encontramos que se presentan otras frecuencias dominantes, claramente las frecuencias de 1300 y 2100 Hz. para el primer tren recibido que corresponde a la emisión lateral. Esto se debe en parte a la respuesta transitoria de las bocinas, que se ve claramente en los 4 primeros ciclos y en los 4 finales de esta emisión lateral. De esta forma podemos contar una buena resolución espacial al reconocer con mayor definición el patrón de la frecuencia de emisión en trenes de recepción posteriores (mayor altura de muestreo)

Se analizó el pulso lateral por secciones para determinar las frecuencias de los transitorios; al inicio y al final del pulso emitido encontramos que la frecuencia en el intervalo de 0 a 0.05 mseg. corresponde a 1300 Hz. Posteriormente se analizó el intervalo intermedio del pulso en donde encontramos una contribución principal de 2056Hz  $\pm$  62 y el intervalo de 25 a 30 mseg corresponde también a 1300Hz<sup>37</sup>.

---

<sup>36</sup> KHANA & AGGARWAL, "Doppler Sodar and Measurement of Atmospheric Wind" IETE Technical Review Vol. 11, July - August 1994, pp 231 - 237.

<sup>37</sup> Apéndice I

**ESTA TESTS NO HAN  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

#### 4.2.2 Interpretación de Resultados experimentales.

Para interpretar adecuadamente los datos obtenidos del experimento, además de determinar su espectro de frecuencias, se analiza el modelo transitorio del comportamiento de un circuito RCL en paralelo. Debido a que cada una de las bocinas del sistema se puede modelar de esta forma.

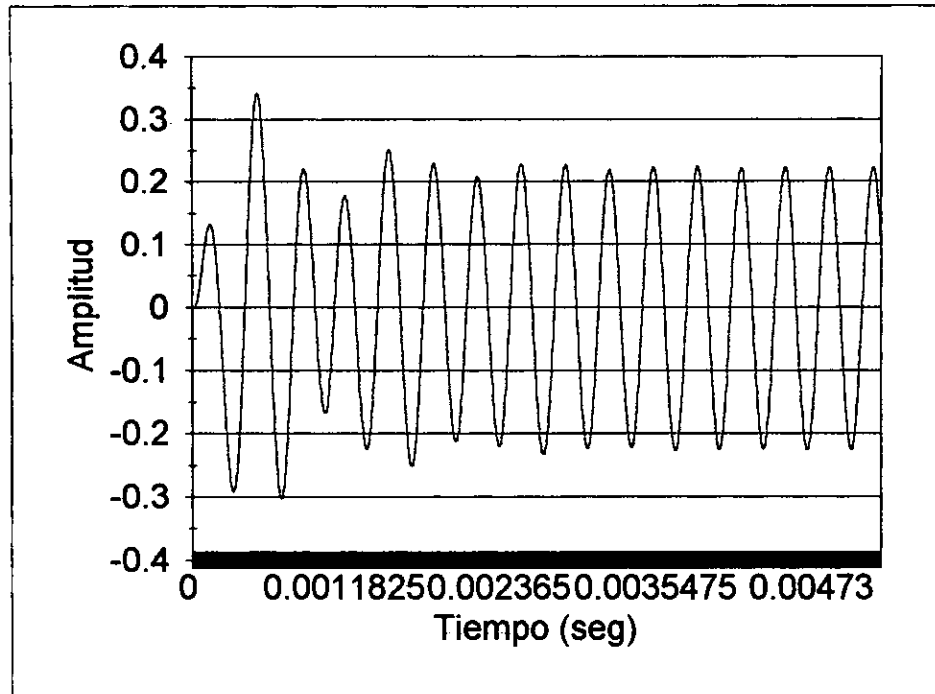
La ecuación diferencial que modela este comportamiento es la siguiente:

$$i_t = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt} + \int \frac{V}{L} dt = I_0 \cos(\omega t + \phi)$$

Se generó una señal senoidal con una frecuencia de 3000Hz. Considerando esta frecuencia de emisión, una resistencia de  $6\Omega$ , una inductancia de 0.0022H y una capacitancia de  $2.7\mu\text{F}$ <sup>38</sup>. Obtenemos gráficamente el siguiente comportamiento:

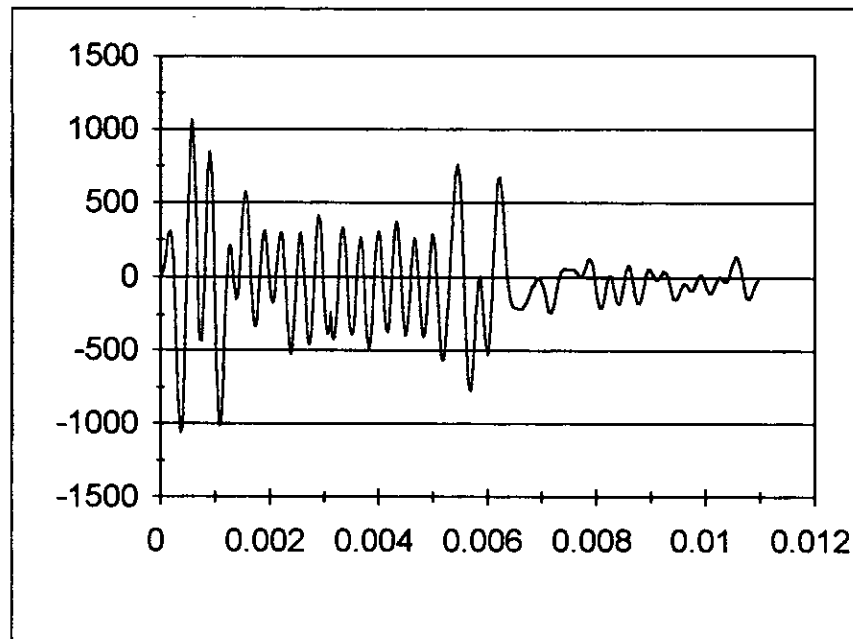
---

<sup>38</sup> Modelo propuesto por el Dr. Héctor Gerardo Riveros Rotge. Investigador Titular "C" de tiempo completo. Instituto de Física U. N. A. M.



Gráfica 4.2.1. Comportamiento teórico.

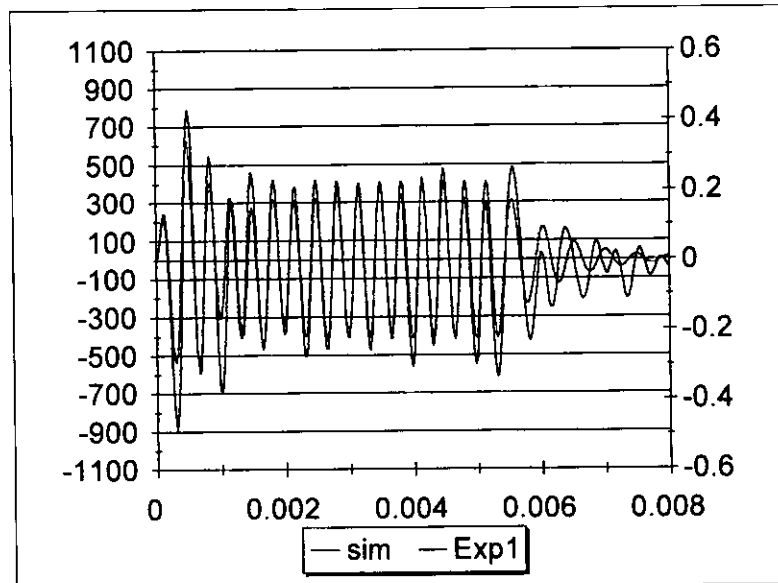
En la siguiente gráfica mostramos el comportamiento experimental para el pulso lateral.



Gráfica 4.2.2. Comportamiento experimental.



En la siguiente gráfica mostramos una comparación entre el análisis teórico y los resultados experimentales.



Gráfica 4.2.3. Comparación entre modelo y experimento.

A partir de lo anterior, podemos interpretar los resultados del experimento. Encontramos que el transitorio de l sistema de emisión contribuye en los 4 primeros y en los 4 últimos ciclos del pulso emitido, como se había mencionado anteriormente,. Podemos apreciar del análisis en el apéndice 1 que la frecuencia correspondiente a este transitorio es de  $1300 \pm 62\text{Hz}$ , y en la gráfica de simulación y experimento el análisis de frecuencia central corresponde a  $2985 \pm 62\text{Hz}$ . que es la frecuencia de emisión.

### ***4.3 Conclusiones.***

A lo largo del desarrollo del este trabajo se ha hecho mención de diversas técnicas para determinar la velocidad del viento vertical. A partir de los experimentos realizados previamente y de las experiencias reportadas; fue posible implementar con otras técnicas un experimento con características diferentes a las propuestas anteriormente obteniendo resultados comparables a los obtenidos con técnicas más sofisticadas.

Las aportaciones de este trabajo son las siguientes:

- Observar el comportamiento transitorio del sistema, que en la emisión de pulsos largos reportados previamente no es observable.
- Tener una frecuencia de emisión definida en la parte central del pulso. Pese a tratarse de un pulso de corta duración.
- Al emplear este pulso corto (16 ciclos con una duración aproximada de 5.333mseg) se tiene una mayor precisión espacial, de manera tal que es posible determinar la distancia a la que se encuentra la superficie reflectora al obtener una mejor resolución en el análisis gráfico.
- Este pulso corto no presenta el espectro Gaussiano a diferencia del espectro produce en las emisiones prolongadas, el cual esta constituido por una frecuencia

principal bien definida entre mayor sea su duración. Este comportamiento se muestra en el apéndice 2.

- Dadas las condiciones experimentales, en el primer tren recibido por el detector, se encontró una emisión lateral que presenta una frecuencia diferente a la emitida en el pulso directo en la parte central ( $2100 \pm 62$  Hz), se observa un cambio de frecuencia correspondiente a los armónicos en los 4 primeros y últimos ciclos del tren de pulsos. Se modela este comportamiento y se explica el corrimiento en fase debido a la ubicación espacial de las bocinas del arreglo. Encontrando una concordancia entre el comportamiento experimental y el modelo teórico.
- El empleo de electrónica básica con un costo muy por debajo de los sistemas reportados.

Al realizar las pruebas experimentales encontramos que la frecuencia óptima de emisión es aquella a la que se aprovecha la respuesta en frecuencia del sistema emisor (las frecuencias de resonancia), obteniendo así la máxima amplitud. Ya que debido a las condiciones del experimento, la señal proveniente de la atmósfera sufre de atenuación y distorsión debido a las causas tratadas anteriormente (dispersión e inhomogeneidades en la atmósfera principalmente).

Al comparar con los arreglos propuestos anteriormente, encontramos que el arreglo que proponemos es más rentable y versátil, dado que es posible elegir la frecuencia de estudio, tal que

pueda aprovecharse la respuesta del sistema en conjunto. Además de encontrarse dentro del intervalo de eficiencia (a 1500m de altura) reportado previamente.

La resolución típica es del orden de  $1/2$  de la longitud el pulso enviado para los trabajos reportados.

Dado que aún es posible perfeccionar el sistema considerando los resultados obtenidos, se tiene un tema abierto de investigación en el estudio de las capas atmosféricas inferiores tal que se obtenga una mayor eficiencia en el estudio de estos fenómenos.

***Bibliografía.***

LITTLE C. Gordon, FELLOW, IEEE. *ACOUSTICS METHODS FOR THE REMOTE PROBING OF THE LOWER ATMOSPHERE*. Proceedings of the IEEE. April. 1969.

HSU Hwei P. *ANÁLISIS DE FOURIER*. 2a Edición en Español. Edit. Fondo Educativo Interamericano. México. 1986.

GLAZEBROOK Sir. Richard. *DICTIONARY OF APPLIED PHYSICS*. Vol. IV pags. 678-737; Vol. III pags. 44-84. Light, Sound and Radiology.

KHANNA R.M. and AGGRARWAL S.K. *DOPPLER SODAR AND MEASUREMENT OF ATMOSPHERIC WIND* IETE Technical Review. Vol. 11, No. 4, July-August pp 231-237. New Delhi, India. 1994.

FOGIEL M. *ELECTRONICS PROBLEMS SOLVER*. Edit. Staff of Research and Education Association. New York. 1986.

*ENCYCLOPAEDIA OF SCIENCE AND TECHNOLOGY*. Vol. XIII. Pags. 425-434. Edit. Mc. Graw Hill. U.S.A. 1980.

KINSLER Laurence E. *FUNDAMENTAL OF ACUSTICS*. 2a Edición. Edit. John Willey & Sons, Inc. U.S.A. 1962.

ROSSING. *LOUDSPEAKER PERFORMANCE: EFFICIENCY, FREQUENCY RESPONSE AND DIRECTIVITY THE SCIENCE OF SOUND*. Sections 20.10 – 20.20, 22.8, 22.10, 24.1.

KASAHARA Akira, *METHODS IN COMPUTATIONAL PHYSICS, COMPUTATIONAL ASPECTS OF NUMERICAL MODELS FOR WEATHER PREDICTION AND CLIMATE SIMULATION*, pp. 8 Academic Press, U.S.A. 1977.

ELMORE William C. & HEALD Mark A. *PHYSICS OF WAVES*. Edit. Mc-Graw Hill. U.S.A. 1969.

GEORGI Howard. *THE PHYSICS OF WAVES*. Edit. Prentice - Hall. U. S. A. 1993.

BLOKHINTZEV D. *THE PROPAGATION OF SOUND IN A INHOMOGENEOUS AND MOVING MEDIUM I, II*. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol.18, No 2 Oct. pp. 322 – 334. U.S.S.R. 1946.

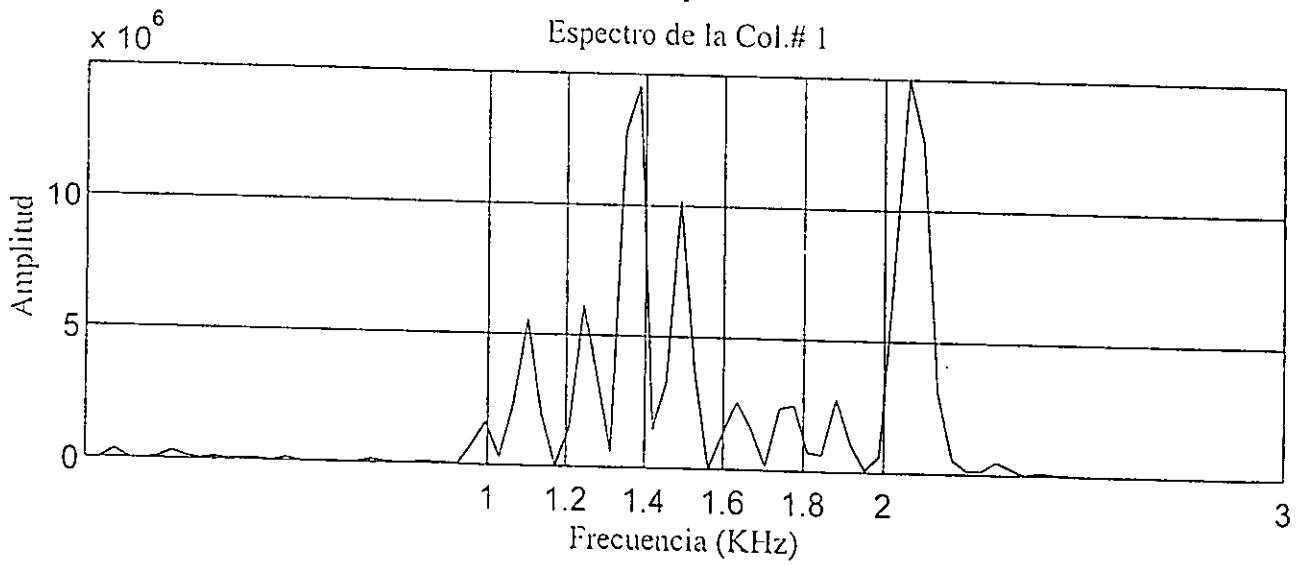
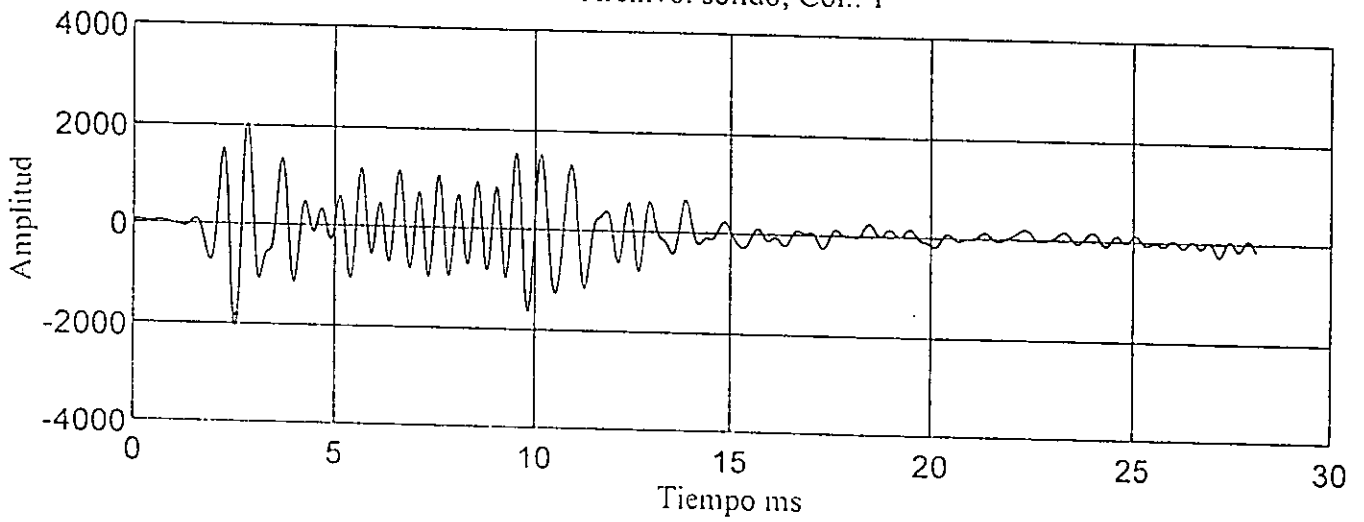
ROSSING Thomas D. *THE SCIENCE OF SOUND*. 2<sup>a</sup> Edic. Addison Wesley. U.S.A. 1989.

DAVIS Don and Carol. *STANDARDS FOR LOUDSPEAKERS MEASUREMENTS*. SOUND SYSTEMS ENGINEERING ANSI 1.5 – 1963. Cap. 3.

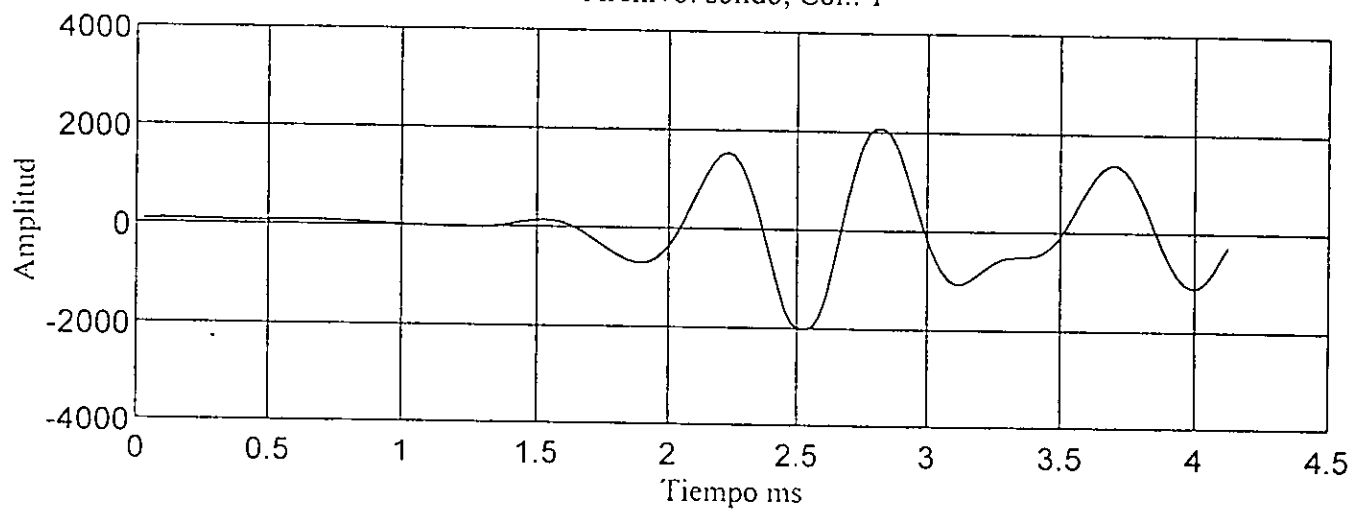
LIGHTHILL James. *WAVES IN FLUIDS*. Cambridge UNIVERSITY Great Britain. 1979.

Apéndice I.

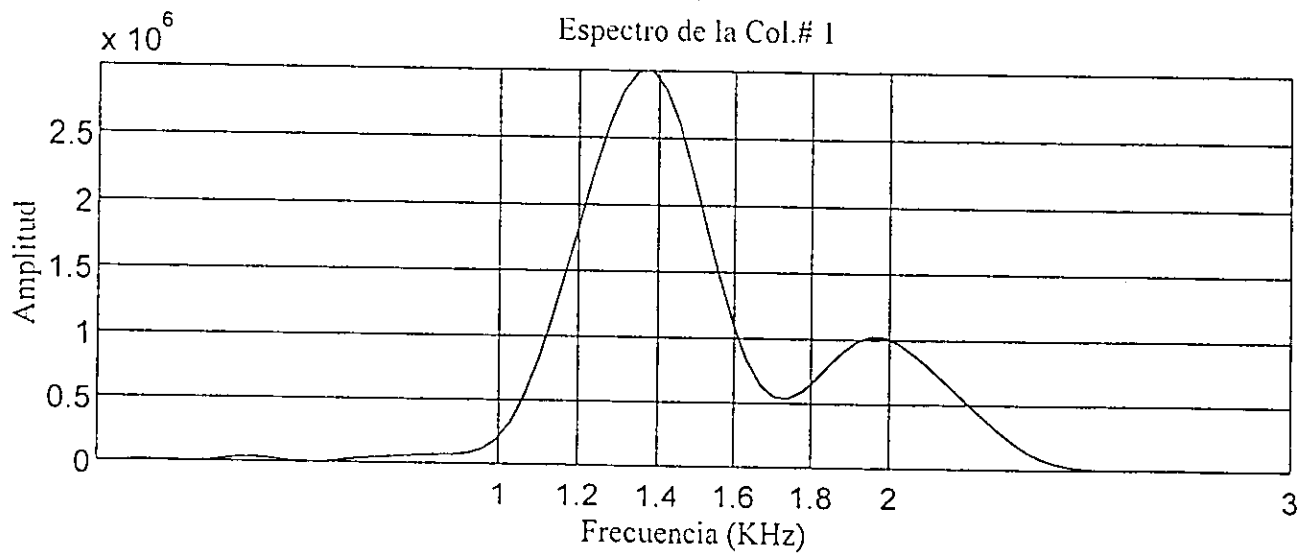
Archivo: solido; Col.: 1



Archivo: solido; Col.: 1

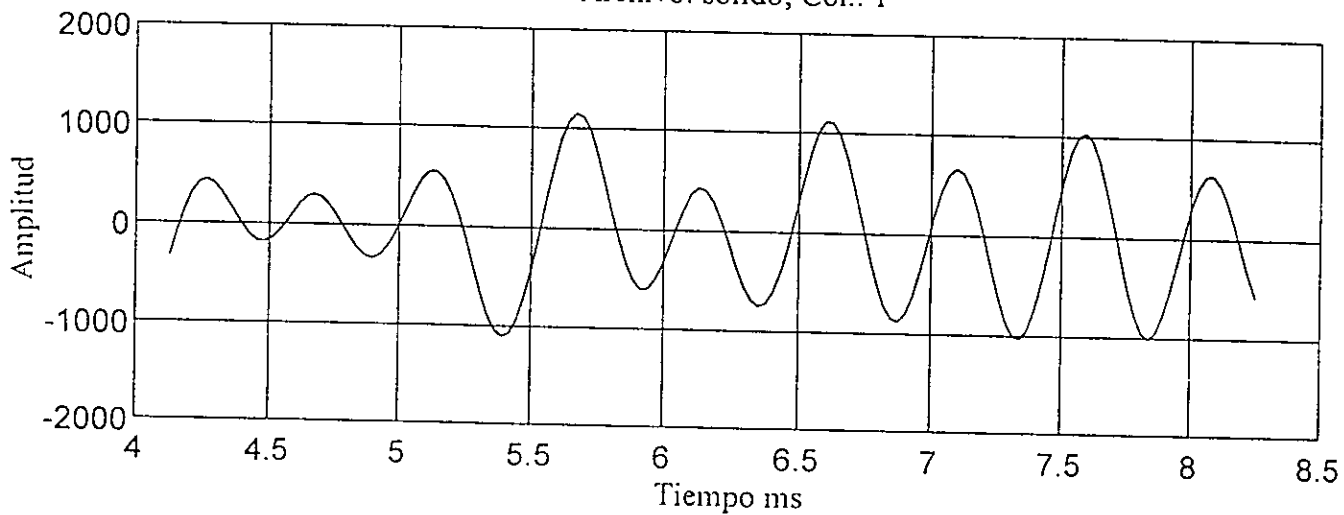


Espectro de la Col.# 1

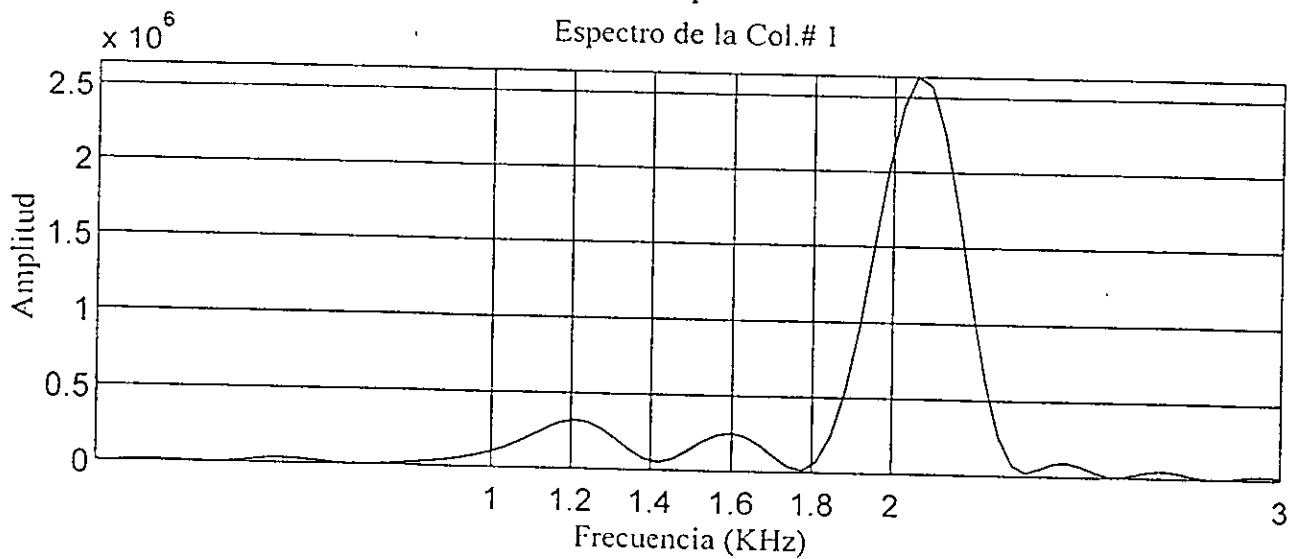




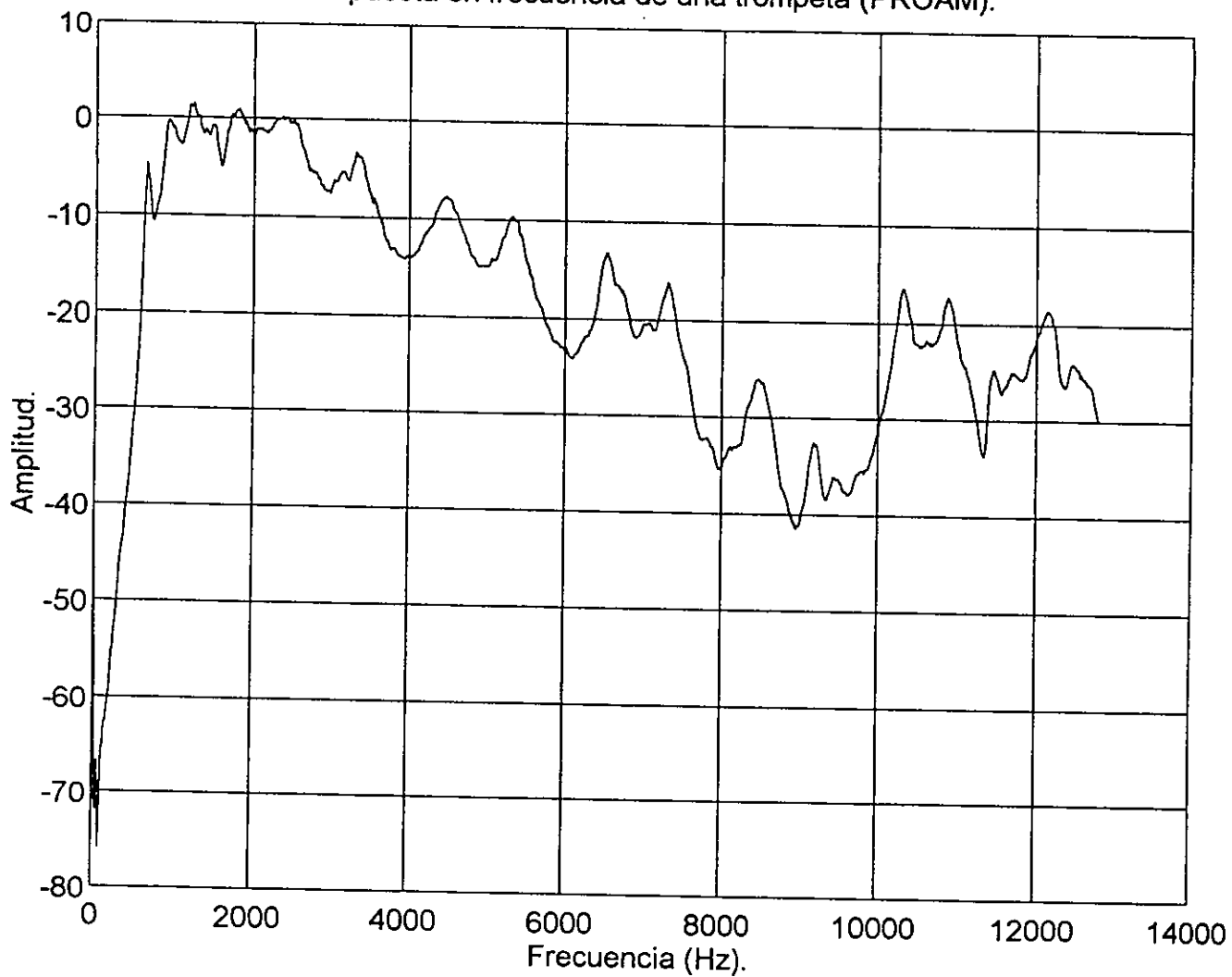
Archivo: solido; Col.: 1



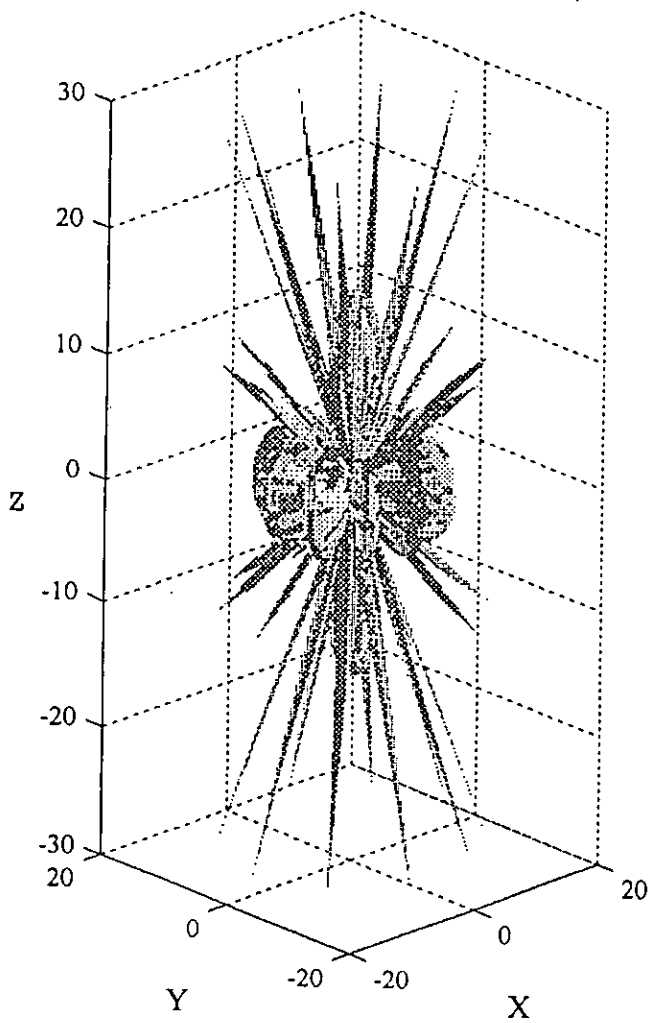
Espectro de la Col.# 1



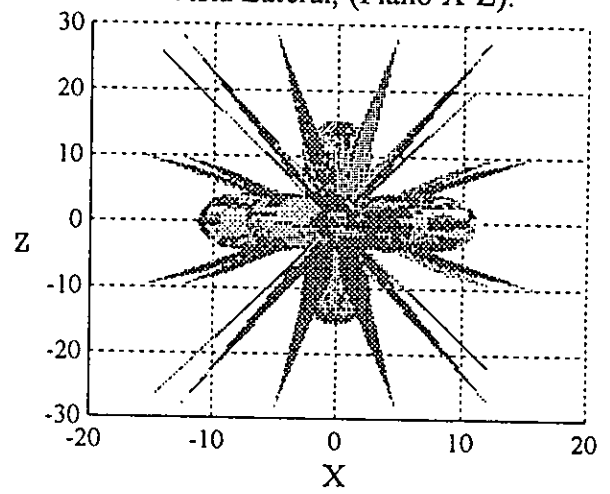
Respuesta en frecuencia de una trompeta (PROAM).



Vista Tridimensional, ( $f = 1600$  Hz).



Vista Lateral, (Plano X-Z).



Gráfica Polar, (Plano X-Z).

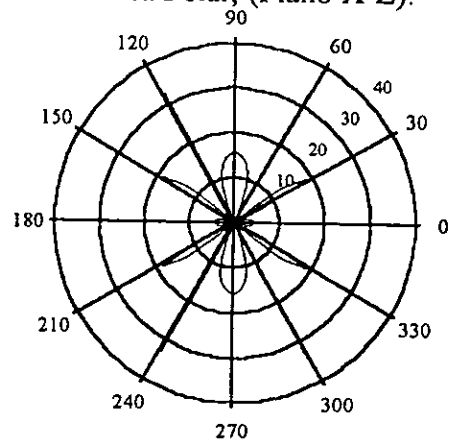
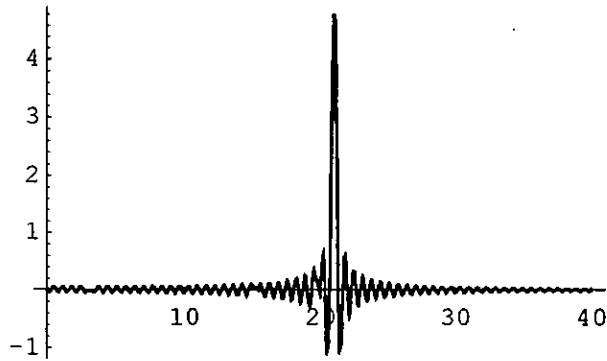


Fig. 1 Patrón de Directividad para un arreglo hexagonal de bocinas ideales a una frecuencia de 1600Hz.

```
In[68]:=
```

```
Plot[h[k], {k, 0, 40}, PlotRange -> All]
```



```
In[69]:=
```

```
ene=128
```

```
k0=21
```

```
In[71]:=
```

```
Plot[h[k], {k, 0, 40}, PlotRange -> All]
```

