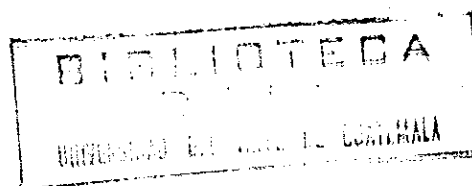


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

ESTUDIO DE LAS VIBRACIONES DE LAS
MEMBRANAS DEL OIDO

LUIS OCTAVIO CORDON



GUATEMALA

1980

**ESTUDIO DE LAS VIBRACIONES DE LAS
MEMBRANAS DEL OIDO**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

ESTUDIO DE LAS VIBRACIONES DE LAS
MEMBRANAS DEL OIDO

LUIS OCTAVIO CORDON

TRABAJO DE INVESTIGACION PRESENTADO PARA OPTAR
AL GRADO ACADEMICO DE

LICENCIADO EN FISICA

GUATEMALA

1980

DEDICO ESTE TRABAJO :

**A mis padres y
a mi esposa**

AGRADEZCO :

A todas aquellas personas que colaboraron en el desarrollo y elaboracion de esta tesis, especialmente a mi asesor MS: Fernando Noriega, a mi esposa Isabel Cofiño de Cordon, a mi cuñada Carolina Cofiño y a Telectro, S.A. que me proporciono el equipo necesario para desarrollar la tesis.

CONTENIDO

	PAGINA
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1: ANATOMIA DEL OIDO	3
1.1 OIDO EXTERNO	
1.2 OIDO MEDIO	
1.3 OIDO INTERNO	
CAPITULO 2: FISIOLOGIA DEL OIDO	8
2.1 OIDO EXTERNO	
2.2 OIDO MEDIO	
2.3 OIDO INTERNO	
2.3.1 MECANISMO DE LA TRANSDUCCION	
2.3.2 DISCRIMINACION DE FRECUENCIAS	
CAPITULO 3: FISICA Y PSICOFISICA: UNA APROXIMACION INTERDISCIPLINARIA	19
3.1 LOS SISTEMAS FISICOS QUE INTERVIENEN	
3.2 ATRIBUTOS CARACTERISTICOS DE LOS SONIDOS MUSICALES	
3.3 EL ELEMENTO TIEMPO EN LA MUSICA	
3.4 FISICA Y PSICOFISICA	
CAPITULO 4: VIBRACIONES SONORAS, TONOS PUROS, Y LA PERCEPCION DEL TONO.	23
4.1 MOVIMIENTO Y VIBRACION	
4.2 MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE	
4.3 VIBRACIONES ACUSTICAS Y SENSACIONES DE TONO PURO	
4.4 SUPERPOSICION DE TONOS PUROS: COMPASES DE PRIMER ORDEN Y LA BANCA CRITICA	
4.5 OTROS EFECTOS DE PRIMER ORDEN: TONOS DE COMBINACIONES Y TONOS ADICIVOS	
4.6 EFECTOS DE SEGUNDO ORDEN: COMPASES DE CONSONANCIAS FUERA DE TONO	
4.7 RASTREO FUNDAMENTAL	
4.8 CODIGOS ADICIVOS EN EL SISTEMA NERVIOSO PERIFERICO	
CAPITULO 5: ONDAS DE SONIDO, ENERGIA ACUSTICA Y LA PERCEPCION DEL VOLUMEN	45

- 5.1 ONDAS ELASTICAS, FUERZA, ENERGIA Y POTENCIA
- 5.2 VELOCIDAD DE PROPAGACION, LONGITUD DE ONDA Y POTENCIA ACUSTICA.
- 5.3 SUPERPOSICION DE ONDAS: ONDAS ESTACIONARIAS
- 5.4 INTENSIDAD, NIVEL DE INTENSIDAD DE SONIDO Y VOLUMEN
- 5.5 EL MECANISMO DE PERCEPCION DEL VOLUMEN Y PROCESOS RELACIONADOS

CAPITULO 6: TONOS COMPLEJOS Y PERCEPCION DEL TIMBRE 67

- 6.1 ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA CUERDA
- 6.2 ONDAS ESTACIONARIAS EN DOS DIMENSIONES: VIBRACION DE UNA MEMBRANA
- 6.3 ONDAS LONGITUDINALES ESTACIONARIAS EN UNA COLUMNA DE AIRE IDEAL
- 6.4 PERCEPCION DEL GRADO DE ALTURA Y DEL TIMBRE DE TONOS MUSICALES

CAPITULO 7: SIMULACION DE LOS MODELOS PARA APROXIMAR EL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR 85

- 7.1 INTRODUCCION
- 7.2 DESARROLLO DE LA SIMULACION
- 7.3 PROGRAMAS

CONCLUSIONES 88

APENDICE A: SIMULACION Y MODELOS 90

- A.1 SIMULACION
- A.2 MODELOS
- A.3 FUNCIONES DE UN MODELO
- A.4 CLASIFICACION DE LOS MODELOS DE SIMULACION
- A.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SIMULACION
- A.6 ESTRUCTURA DE LOS MODELOS DE SIMULACION
- A.7 CRITERIOS PARA UN BUEN MODELO

APENDICE B: MODELOS PARA APROXIMAR EL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR 98

- B.1 PROPIEDADES MECANICAS DEL OIDO MEDIO Y LA COCLEA
- B.2 MODELOS PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR
- B.3 TRANSFORMADAS INVERSAS DE LOS MODELOS
- B.4 SOBRE LAS AMPLITUDES RELATIVAS DEL DESPLAZAMIENTO
- B.5 EVALUACION DE LAS CONSTANTES DE ESCALA C1, C2 Y C3
- B.6 APLICACION A LA PERCEPCION DEL GRADO DE ALTURA

APENDICE C: DEDUCCIONES VARIAS 115

C.1 VELOCIDAD DE PROPAGACION DEL SONIDO EN EL AIRE

ECUACION : $v_L = \sqrt{\frac{P}{\rho}}$

C.2 INTENSIDAD DEL SONIDO

C.3 VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LAS ONDAS EN LA SUPERFICIE DE UNA MEMBRANA

C.4 DEDUCCION DE LAS CONDICIONES : $k_1 = \frac{n_1 \pi}{a}$ Y $k_2 = \frac{n_2 \pi}{b}$

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

EL TEMA DE ESTE TRABAJO FUE ELEGIDO PARA SATISFACER UNA INQUIETUD QUE HE TENIDO A LO LARGO DE MI CARRERA DE FISICA: CONOCER QUE LEYES FISICAS INTERVIENEN EN LA PERCEPCION DEL SONIDO Y EN QUE FORMA PUEDEN RELACIONARSE LOS RESULTADOS CUANTITATIVOS DE LA FISICA CON LOS RESULTADOS CUALITATIVOS DE LA PSICOLOGIA.

ES EVIDENTE QUE EL PROBLEMA PLANTEADO DEBE SER ENFOCADO DESDE VARIOS PUNTOS DE VISTA, PARA LOGRAR UNA APROXIMACION INTERDISCIPLINARIA A LA SOLUCION. POR ELLO EL TRABAJO EMPIEZA CON UNA DESCRIPCION BIOLÓGICA DEL MEDIO DONDE OCURRE EL FENOMENO, PASANDO LUEGO A SELECCIONAR LAS CARACTERISTICAS IMPORTANTES DE LA PERCEPCION DEL SONIDO PARA ENCONTRAR EL MODELO FISICO MAS ADECUADO. AL DESARROLLAR ESTA PARTE HE ENCONTRADO QUE EL MECANISMO MAS IMPORTANTE PARA LA PERCEPCION DEL SONIDO ES EL CILINDRO INTERNO, DONDE SE LLEVA A CABO LA TRANSDUCCION, QUE CONSISTE EN LA TRANSFORMACION DE LAS ONDAS MECANICAS PROVENIENTES DEL EXTERIOR EN IMPULSOS ELECTRICOS QUE LLEVAN LA INFORMACION AL CEREBRO. DE ESTE MECANISMO LA PARTE MAS IMPORTANTE ES LA MEMBRANA BASILAR. POR ELLO SE DEDICA UN CAPITULO Y UN APENDICE AL DESARROLLO DE UN MODELO PARA ESTUDIAR EL DESPLAZAMIENTO DE ESTA MEMBRANA.

COMO SABEMOS ES MUY DIFICIL HACER ESTUDIOS DE LA VIBRACION DE LA MEMBRANA BASILAR EN SERES VIVOS. ADEMAS EN GUATEMALA NO EXISTE EL EQUIPO NECESARIO PARA ESTE ESTUDIO. POR ESTAS RAZONES DECIDI HACER USO DE LAS COMPUTADORAS PARA SIMULAR UN MODELO DE ESTE FENOMENO, Y ASI SOBREPASAR ESTE OBSTACULO.

PARA PONER EN FORMA MAS ASEQUIBLE EL TRABAJO DECIDI DESARROLLARLO EN EL ORDEN ACTUAL, COMENZANDO POR EL CASO MAS SENCILLO QUE ES AQUEL EN EL QUE EL ESTIMULO CONSISTE EN UNA ONDA DE FRECUENCIA Y AMPLITUD CONSTANTES HASTA LLEGAR AL CASO MAS COMPLICADO EN EL QUE EL ESTIMULO ESTA FORMADO POR UNA SUPERPOSICION DE ONDAS. PARALELAMENTE SE INTRODUCEN LOS ATRIBUTOS PRINCIPALES DE UN TONO: EL GRADO DE ALTURA, EL VOLUMEN Y EL TIMBRE. LOS PRIMEROS DOS SE DETERMINAN SOBRE LA BASE DEL ESTUDIO DE TONOS PUROS DE UNA SOLA FRECUENCIA, MIENTRAS QUE EL TERCERO APARECE EN EL CASO DE ONDAS COMPLEJAS, Y DEPENDE DE LA CLASE DE MEZCLA DE SONIDOS PUROS, O COMPONENTES ARMONICOS, DE UN TONO COMPLEJO.

A LO LARGO DEL TRABAJO SE DEFINEN UNA SERIE DE CONCEPTOS EN LOS CUALES SE RELACIONA UN FENOMENO FISICO CON UNA CARACTERISTICA PSICOLOGICA, CON LO QUE SE ENTRA EN EL CAMPO DE LA PSICOFISICA, DISCIPLINA IMPORTANTE EN EL ESTUDIO DE LAS PERCEPCIONES.

SE HA SACRIFICADO BUENA PARTE DEL FORMALISMO MATEMATICO DE LA FISICA CON EL PROPOSITO DE QUE EL TRABAJO PUEDA SER USADO COMO REFERENCIA ELEMENTAL POR TODO AQUEL QUE SE INTERESA EN EL TEMA. EL

LECTOR INTERESADO EN LA PARTE FORMAL PUEDE ENCONTRAR LAS DEDUCCIONES DE LAS EXPRESIONES MAS IMPORTANTES EN EL APENDICE C. LAS DEDUCCIONES QUE NO SE ENCUENTRAN EN ESTE APENDICE, PUEDEN SER HALLADAS EN TEXTOS DE FISICA COMO LOS QUE SE MENCIONAN EN LA BIBLIOGRAFIA.

CAPITULO 1 ANATOMIA DEL OIDO

EN ESTA PARTE SE PRESENTA UNA BREVE DESCRIPCION DE LAS PARTES QUE COMPONEN EL OIDO HUMANO SEGUN EL TRABAJO DE NILSSON, LINDBERG, INGVAR, NORDFELT Y PETERSON (1975). EL OIDO EXTERNO ESTA DIVIDIDO EN TRES PARTES PRINCIPALES: 1) EL OIDO EXTERNO 2) EL OIDO MEDIO 3) EL OIDO INTERNO.

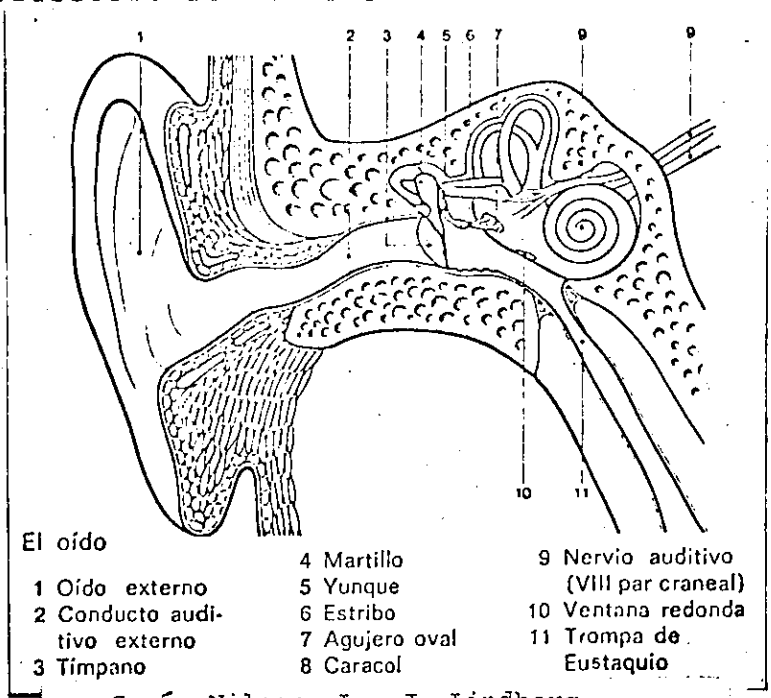
1.1 OIDO EXTERNO

EL OIDO EXTERNO HUMANO ES PEQUEÑO, APLANADO, Y EN GENERAL, INMOVIL. ESTO ULTIMO HACE QUE SE TENGA QUE USAR EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA PARA LOCALIZAR MEJOR UNA FUENTE DESCONOCIDA. BASICAMENTE EL OIDO EXTERNO ES UN PLIEGUE DE PIEL QUE RECUBRE UN CARTILAGO ELASTICO EN FORMA DE EMBUDO. LA PARTE INFERIOR O LOBULO DE LA OREJA NO CONTIENE CARTILAGO, SINO TEJIDO GRASO BLANDO. EL LOBULO DE LA OREJA ESTA MUY POBLADO DE NERVIOS, POR LO QUE ES MUY SENSIBLE AL TACTO. LA PARTE INTERNA DEL OIDO EXTERNO ES EL CONDUCTO AUDITIVO EXTERNO. ESTE CONDUCTO ES LIGERAMENTE CURVO, DE LONGITUD INFERIOR A LOS 2.5 CM. Y TERMINA EN EL OIDO MEDIO. LA PARTE EXTERNA DE ESTE CONDUCTO ESTA FORMADA POR TEJIDO CONECTIVO Y POR CARTILAGO; SU PORCION MAS PROFUNDA PENETRA EN EL HUESO. LA CURVATURA DEL CANAL IMPIDE LA PENETRACION DE OBJETOS DE RELATIVAMENTE GRAN TAMAÑO.

PARA PROTEGERSE DE LA PENETRACION DE AGENTES EXTRAÑOS COMO POLVO, INSECTOS, SUCIEDAD, ETC., LA PIEL QUE RECUBRE EL CONDUCTO POSEE UNAS GLANDULAS QUE PRODUCEN UNA CERA, LA CUAL SIRVE COMO OBSTRUCCION AL PASO DE ESTOS AGENTES. EL CONDUCTO AUDITIVO EXTERNO TERMINA EN EL TIMPANO. EL TIMPANO SEPARA EL OIDO EXTERNO DEL OIDO MEDIO Y GENERALMENTE SE LE TOMA COMO PARTE DEL OIDO MEDIO. (VER FIG. 1.1)

1.2 OIDO MEDIO

EL TIMPANO ES UNA MEMBRANA OBLICUA, SEMICIRCULAR Y MUY FINA, FORMADA POR TEJIDO CONECTIVO. LA PARTE MEDIA DE LA MEMBRANA SE HALLA LIGERAMENTE CURVADA, POR LO QUE, EN REPOSO, PRESENTA UN ASPECTO LIGERAMENTE CONICO. EL OIDO MEDIO ESTA COMPUESTO POR UNA SERIE DE PEQUEÑAS CAVIDADES SITUADAS EN EL HUESO TEMPORAL. LAS PAREDES DE ESTAS CAVIDADES ESTAN RECUBIERTAS DE MUCOSA, Y EL HUESO ESTA LLENO DE AIRE. LOS TRES HUESOS DEL OIDO MEDIO ESTAN SITUADOS EN LA CAVIDAD DE MAYOR TAMAÑO O CAVIDAD TIMPANILA, LA CUAL TIENE



Según Nilson, L., J. Lindberg, D.H. Ingvar, S. Nordfelt, y R. Petterson. Descubrir el Hombre. Salvat Editores.

FIGURA 1.1

UNA PROFUNDIDAD DE 4.4 MM., Y UN DIAMETRO DE 8 MM. SU PARED EXTERNA ESTA FORMADA POR EL TIMPANO. LA PARED INTERNA SEPARA EL OIDO MEDIO DEL INTERNO, Y ESTA FORMADA POR HUESO COMPACTO EN EL CUAL SE ENCUENTRAN DOS PEQUEÑOS ORIFICIOS. EL SUPERIOR ES LA VENTANA OVAL Y EL INFERIOR ES LA VENTANA REDONDA. LOS HUESCILLOS DEL OIDO MEDIO SON: MARTILLO, YUNQUE Y ESTRIBO. ESTOS HUESOS SON LOS UNICOS ELEMENTOS ESQUELETICOS QUE NO CRECEN, PUES SE DESAROLLAN TOTALMENTE DURANTE LA NINEZ. EL MARTILLO SE INSERTA EN EL TIMPANO; SU OTRO EXTREMO SE ARTICULA CON EL YUNQUE, Y ESTE CON EL ESTRIBO, CUYA PARTE INTERIOR CUBRE EL AGUJERO OVAL.

LA CAVIDAD TIMPANICA SE COMUNICA CON LA PARTE SUPERIOR DE LA FARINGE A TRAVES DE LA TROMPA DE EUSTAGUIO. ESTE TUBO DE APROXIMADAMENTE 3.5 CM. DE LA LONGITUD SE HALLA NORMALMENTE CERRADO, PERO SE ABRE AL TRAGAR, PERMITIENDO ASI EL PASO DE AIRE. (VER FIG. 1.2)

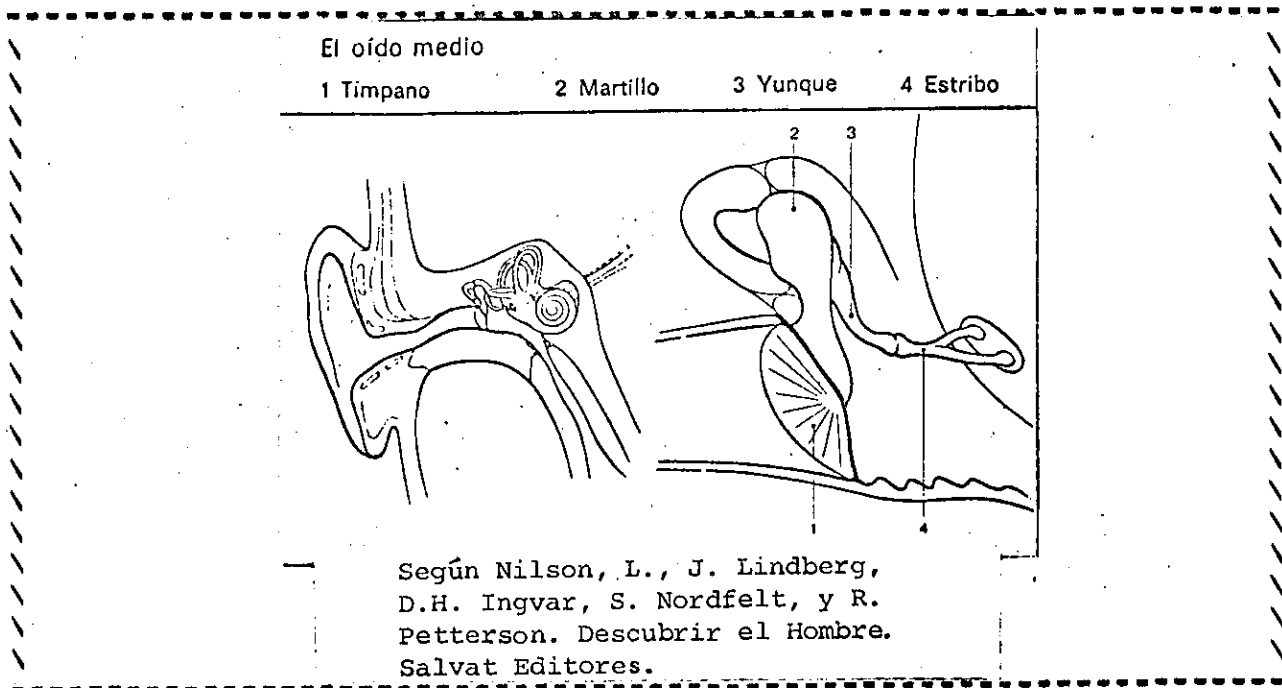


FIGURA 1.2

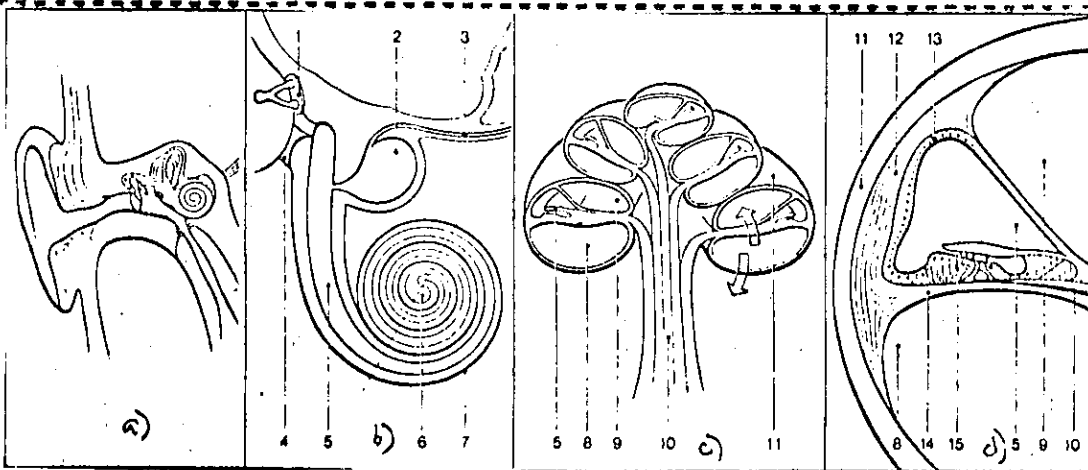
1.3 OIDO INTERNO

ES UNA CAVIDAD SITUADA EN EL HUESO TEMPORAL. LA CAVIDAD ES DE FORMA IRREGULAR, Y DIFÍCIL DE DESCRIBIR. RECIBE EL NOMBRE DE LABERINTO OSEO. SUS PAREDES ESTAN FORMADAS POR HUESO, RECUBIERTO DE EPITELIO. EL LABERINTO OSEO ESTA LLENO DE UN FLUIDO QUE RECIBE EL NOMBRE DE ENDOLINFA, EL CUAL NO LLENA COMPLETAMENTE LA CAVIDAD OSEA. GRAN PARTE DEL ESPACIO EXISTENTE ESTA OCUPADO POR UN SISTEMA DE FINOS CONDUITOS Y SACOS QUE CONSTITUYEN EL LABERINTO MEMBRANOSO, CUYAS PAREDES ESTAN FORMADAS POR TEJIDO CONECTIVO BLANDO. LA PARTE DEL LABERINTO OSEO QUE SE CONTINUA CON LA VENTANA OVAL ES UNA CAVIDAD IRREGULAR LLAMADA VESTIBULO. LA BASE DEL ESTRIBO CUBRE LA VENTANA OVAL. POR OTRO LADO LA VENTANA REDONDA SE HALLA RECUBIERTA POR UNA FINA MEMBRANA DE TEJIDO CONECTIVO. EL CARACOL O COCLEA SE INICIA EN LA PARTE ANTERIOR DEL VESTIBULO.

LA PARTE CENTRAL DEL LABERINTO MEMBRANOSO ESTA FORMADO POR DOS SACOS SITUADOS EN EL VESTIBULO. UNO DE ELLOS ES ESFERICO Y RECIBE EL NOMBRE DE SACULO Y EL OTRO ES OVALADO Y SE LE LLAMA UTRICULO. AMBOS SACOS POSEEN CELULAS RECEPTORAS Y CRISTALES DE CALCIO. UN CANAL ESTRECHO CONDUCE DEL SACULO AL CONDUCTO COCLEAR, LOCALIZADO EN EL INTERIOR DEL CARACOL. EL CONDUCTO COCLEAR ES ESTRECHO Y EN FORMA DE CUÑA. ESTA FORMADO POR TEJIDO CONECTIVO QUE FORMA UNA ESPIRAL DE 2.5 VUELTAS SIGUIENDO LA ESPIRAL OSEA DEL CARACOL. RECIBE TAMBIEN EL NOMBRE DE CARACOL MEMBRANOSO. EL TAMAÑO DE LOS DISTINTOS COMPONENTES DEL CICLO INTERNO ES SUMAMENTE PEQUEÑO. LA ALTURA DEL CONDUCTO COCLEAR, DESDE SU BASE HASTA SU VERTICE ES DE MENOS DE 5 MM. LA BASE DEL CARACOL MIDE MENOS DE 9 MM. EL DIAMETRO DEL CONDUCTO ESPIRAL QUE FORMA LA COCLEA ES DE CERCA DE 1

MM. EN LA BASE, Y SE ESTRECHA A MEDIDA QUE SE ACERCA AL VERTICE. EN SU INTERIOR, EL CONDUCTO COCLEAR ES TODAVIA MAS PEQUEÑO, YA QUE LA CUCLEA ESTA DIVIDIDA EN TRES PARTES, DE LAS CUALES EL CONDUCTO COCLEAR ES LA CENTRAL Y TAMBIEN LA DE MENOR TAMAÑO. LA BASE DEL CONDUCTO ESTA FORMADA EN PARTE POR TEJIDO OSEO Y EN PARTE POR TEJIDO BLANDO LO QUE FORMA LA MEMBRANA BASILAR.

LA MEMBRANA BASILAR FORMA EL SUELO DEL CONDUCTO COCLEAR. SE EXTIENDE DESDE LA PORCIÓN OSEA DEL SUELO DEL CONDUCTO HASTA LA PARED COCLEAR EXTERNA, DONDE SE INSERTA EN UNA FRANJA DE TEJIDO CONECTIVO RICO EN VASOS SANGUINEOS. OTRA MEMBRANA DELGADA FORMA EL TECHO DEL CONDUCTO COCLEAR. TAMBIEN ESTA MEMBRANA SE EXTIENDE DESDE LA PORCIÓN OSEA HASTA LA PARTE SUPERIOR DEL LIGAMENTO ESPIRAL. POR ESTA RAZÓN LOS CORTES TRANSVERSALES DE LA ESPIRAL DEMUESTRAN QUE SE HALLA DIVIDIDA EN TRES PARTES. DOS DE ELLAS SON AMPLIAS Y DE SECCIÓN CASI SEMICIRCULAR. EL CONDUCTO COCLEAR ES LA MENOR DE LAS TRES Y TIENE FORMA DE CUÑA. LA CÁMARA SUPERIOR SE



El oído Interno

- | | |
|---|--|
| 1 Base del estribo en la ventana oval | 7 Caracol |
| 2 Sáculo | 8 Rama timpánica |
| 3 Conducto endolinfático | 9 Rama vestibular |
| 4 Ventana redonda | 10 Nervio auditivo |
| 5 Conducto coclear | 11 Pared ósea |
| 6 El conducto coclear termina antes de alcanzar la cúpula del caracol | 12 Ligamento espiral, de tejido conectivo |
| | 13 Epitelio |
| | 14 Membrana basilar |
| | 15 Organó de Corti, con las células receptoras auditivas |

Según Nilson, L., J. Lindberg, D.H. Ingvar, S. Nordfelt, y R. Petterson. Descubrir el Hombre. Salvat Editores.

FIGURA 1.3

INICIA EN EL VESTIBULO Y CONTINUA HACIA EL VERTICE DE LA COCLEA. SE LE CONOCE COMO RAMA VESTIBULAR. EL CONDUCTO COCLEAR O RAMA MEDIA ES ALGO MAS CORTO QUE LA ESPIRAL OSEA, Y TERMINA ANTES DE LLEGAR AL VERTICE. POR ESTO, LAS DOS CAMARAS SITUADAS POR ENCIMA Y POR DEBAJO DEL CONDUCTO COCLEAR, ENTRAN UNA CON OTRA EN EL VERTICE DEL CARACOL. LA CAMARA INFERIOR O RAMA TIMPANICA VA DESDE LA VENTANA REDONDA, SITUADA EN LA PARED OSEA QUE LIMITA CON LA CAVIDAD TIMPANICA, HASTA EL VERTICE DEL CARACOL.

LA MEMBRANA BASILAR, TOTALMENTE EXTENDIDA TIENE UNA LONGITUD DE 3 CM. MIENTRAS EL DIAMETRO DEL CONDUCTO COCLEAR DISMINUYE AL ACERCARSE AL VERTICE DEL CARACOL, EL ANCHO DE LA MEMBRANA BASILAR AUMENTA, PASANDO DE 0.1 MM. EN LA BASE, A 0.5 MM. EN EL VERTICE. LAS CELULAS RECEPTORAS AUDITIVAS SE HALLAN LOCALIZADAS EN LA MEMBRANA BASILAR. JUNTO CON UN GRAN NUMERO DE CELULAS DE SOPORTE, LAS CELULAS RECEPTORAS FORMAN EL ORGANCO DE CORTI O ORGANCO ESPIRAL. OTRO COMPONENTE DEL ORGANCO DE CORTI, ES UNA FINA MEMBRANA GELATINOSA LLAMADA MEMBRANA TECTORIA, QUE CUBRE LAS CELULAS RECEPTORAS. LAS CELULAS RECEPTORAS SON DE TIPO FILIFORME, Y SUS EXTREMOS SE HALLAN INCLUIDOS EN LA MEMBRANA GELATINOSA. LAS TERMINACIONES NERVIOSAS SITUADAS EN LA BASE DE LAS CELULAS RECEPTORAS PROCEDEN DE NEURONAS QUE CONSTITUYEN LA RAMA COCLEAR DEL NERVIIO AUDITIVO. LOS CUERPOS CELULARES SE HALLAN SITUADOS EN EL CENTRO DE LA COCLEA O GANGLIO ESPIRAL, QUE SE HALLA PROTEGIDO POR TEJIDO OSEO. EN LA FIGURA 1.3, LA PARTE B) ES UN CORTE VERTICAL DEL CARACOL (QUE PODEMOS VER EN A); LA PARTE C) ES UN CORTE HORIZONTAL DEL CARACOL A).

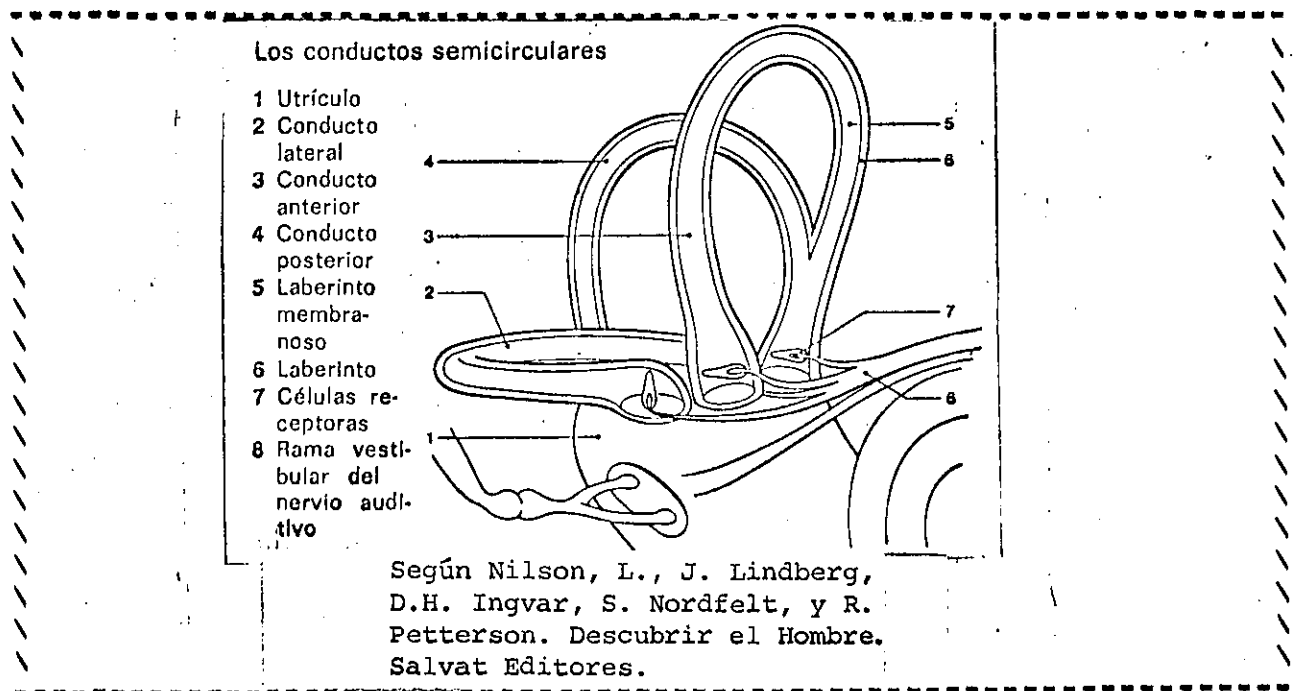


FIGURA 1.4

CAPITULO 2 FISIOLOGIA DEL OIDO

YA QUE LOS DIFERENTES ELEMENTOS QUE COMPONEN EL OIDO HAN SIDO DESCRITOS, SE ESTUDIARA CUAL ES EL PAPEL QUE CADA UNO DE ELLOS DESEMPEÑA EN LA AUDICION.

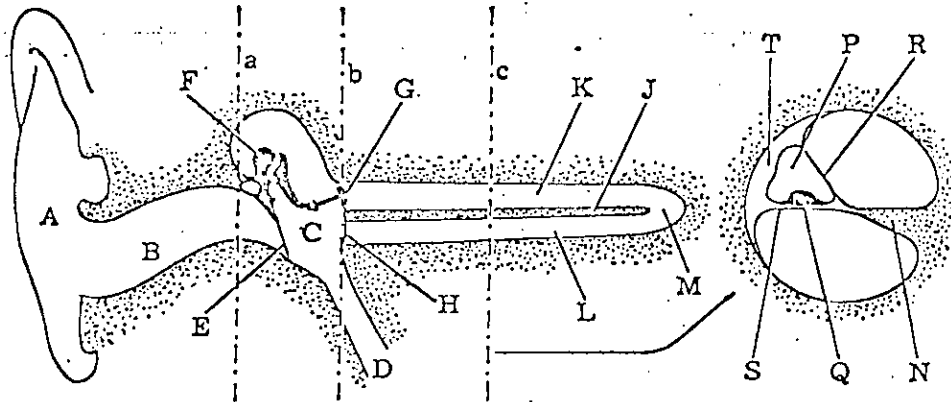
EL OIDO ES LO QUE FISICAMENTE SE LLAMA UN TRANSDUCTOR, ESTO ES, UN DISPOSITIVO CAPAZ DE TRANSFORMAR SEÑALES ACUSTICAS EN SEÑALES NERVIOSAS Y QUE, ENTRE OTRAS CARACTERISTICAS, TIENE LA PROPIEDAD DE DISCRIMINAR FRECUENCIAS, DE MODO QUE EL INDIVIDUO PUEDE DISTINGUIR LOS SONIDOS POR SU ALTURA. SON TRES LOS PROBLEMAS QUE SE TRATAN DE RESOLVER: 1) COMO TRANSDUCE EL OIDO 2) COMO DISCRIMINA LAS FRECUENCIAS Y 3) COMO CODIFICA LAS SEÑALES ACUSTICAS PARA INFORMAR SUS CARACTERISTICAS AL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL, A TRAVES DEL NERVIIO CORRESPONDIENTE. EL PROPOSITO DE ESTA SECCION ES PRECISAMENTE LA DISCUSION DE ESTOS PROBLEMAS, A EXCEPCION DEL TERCERO, PUES ESTA FUERA DEL ALCANCE DE ESTE TRABAJO. (FRUMENTO, 1972, PG. 473)

2.1 OIDO EXTERNO

EL PAPEL QUE JUEGA EL PABELLON DE LA OREJA ES PRACTICAMENTE NULO EN EL HOMBRE, NO ASI EN LOS ANIMALES, QUE TIENEN UN PABELLON BIEN DESARROLLADO EN FORMA DE BOCINA O PANTALLA, GENERALMENTE MOVIL, COMO OCURRE POR EJEMPLO CON LOS GATOS O LOS PERROS. EN ELLOS SE ENCUENTRA UNA NOTABLE DIFERENCIA DE SENSIBILIDAD PARA LOS SONIDOS PROVENIENTES DE PUNTOS DIFERENTES RESPECTO DE LA ORIENTACION DEL PABELLON. EL CONDUCTO AUDITIVO EXTERNO, POR SUS DIMENSIONES, ACTUA COMO UNA COLUMNA DE AIRE RESONANTE, O SEA UN RESONADOR; EL AIRE CONTENIDO EN EL ENTRA EN VIBRACION CON UNA FRECUENCIA PROPIA COMPRENDIDA ENTRE LOS 2,000 Y LOS 5,000 CICLOS/SEG., PRODUCIENDO UNA AMPLIFICACION DE UNOS 5 DB. A 10 DB. (PARA MAYOR ILUSTRACION VER FIG. 2.1) (FRUMENTO, 1972, PG. 473-474)

2.2 OIDO MEDIO

LA FUNCION PRINCIPAL DEL OIDO MEDIO CONSISTE EN HACER LOS AJUSTES NECESARIOS PARA TRANSMITIR EL SONIDO QUE LLEGA POR UN MEDIO GASEOSO (EL AIRE), AL MEDIO LIQUIDO CONTENIDO EN EL CARACOL QUE POSEE DIFERENTES PROPIEDADES MECANICAS. LAS ONDAS DE PRESION QUE LLEGAN POR EL CONDUCTO AUDITIVO EXTERNO PONEN EN VIBRACION LA

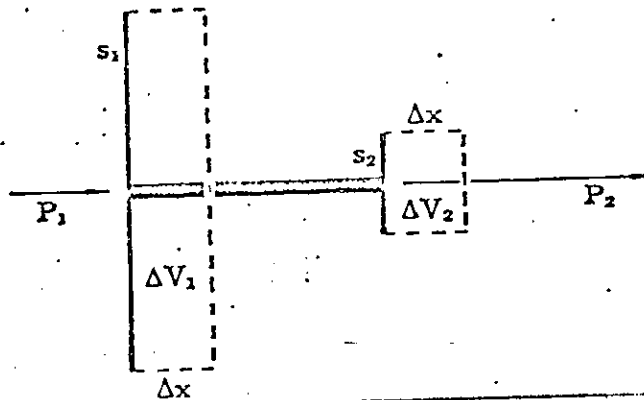


— Representación esquemática del oído. A, pabellón de la oreja; B, conducto auditivo externo; C, caja del tímpano; D, trompa de Eustaquio; E, membrana del tímpano; F, martillo; G, ventana oval; H, ventana redonda; J, tabique; K, rampa vestibular; L, rampa timpánica; M, helicotrema; N, lámina espiral; P, conducto coclear; Q, órgano de Corti; R, membrana de Reissner; S, membrana basilar; T, estria vascular.

Según Guyton, A.C. Tratado de Fisiología Medica. Editorial Interamericana.

FIGURA 2.1

MEMBRANA DEL TIMPANO, Y SUS MOVIMIENTOS SON TRANSMITIDOS A LA CADENA DE HUESECILLOS, PASTA 2,000 CICLOS/SEG, EL MARTILLO Y EL YUNQUE SE MUEVEN SOLIDARIAMENTE SOBRE UN EJE DE GIRO QUE PASA POR SU CENTRO DE GRAVEDAD; A FRECUENCIAS MAYORES LOS MOVIMIENTOS DEL YUNQUE SE ATRASAN CON RESPECTO A LOS DEL MARTILLO. (FRUMENTO, 1972)



Según Frumento, A. Biofísica. Editorial Intermedica.

FIGURA 2.2

LA AMPLITUD DEL MOVIMIENTO DE LA BASE DEL ESTRIBO CON CADA VIBRACION SONORA SOLO REPRESENTA DOS TERCIOS DE LA AMPLITUD DE MOVIMIENTO DEL MANGO DEL MARTILLO. LA AMPLITUD DE LOS MOVIMIENTOS DE LA MEMBRANA DEL TIMPANO ES DEL MISMO ORDEN QUE LA DE LOS MOVIMIENTOS DEL PIE DEL ESTRIBO, PERO COMO LA MEMBRANA TIENE UNA SUPERFICIE ENTRE 15 Y 30 VECES MAYOR QUE LA DE LA BASE DE ESE HUESECILLO, LA PRESION SE MULTIPLICA APROXIMADAMENTE POR 1.3. COMO LA SUPERFICIE DE LA MEMBRANA TIMPANICA TIENE UNOS 55 MM² MIENTRAS QUE LA SUPERFICIE DEL ESTRIBO TIENE EN PROMEDIO 3.2 MM², ESTO SIGNIFICA UNA DIFERENCIA DE: $(55/3.2) * 1.3 = 22$ VECES QUE PERMITE QUE TODA LA ENERGIA DE LA ONDA SONORA CHOCANDO CONTRA LA MEMBRANA TIMPANICA SE APLIQUE A LA PEQUENA PLACA DEL ESTRIBO CAUSANDO UNA PRESION 22 VECES MAS FUERTE SOBRE EL LIQUIDO DEL CARACOL QUE LA PRESION DE LA ONDA SONORA CONTRA EL TIMPANO. COMO EL LIQUIDO TIENE MUCHA MAYOR INERCIA QUE EL AIRE, SE COMPRENDE QUE SE NECESITEN PRESIONES MUCHO MAYORES PARA PRODUCIR UNA MISMA VIBRACION EN EL LIQUIDO, POR LO QUE LA FUNCION DE LA MEMBRANA TIMPANICA Y EL SISTEMA DE HUESECILLOS ES LA DE UN EMPAREJAMIENTO DE IMPEDANCIA ENTRE LAS ONDAS SONORAS EN EL AIRE Y LAS VIBRACIONES SONORAS DEL CARACOL. ESTE EMPAREJAMIENTO DE IMPEDANCIA ES DEL ORDEN DEL 50% AL 75% PARA FRECUENCIAS SONORAS ENTRE 300 Y 3000 CICLOS POR SEGUNDO, LO CUAL PERMITE UNA UTILIZACION CASI COMPLETA DE LA ENERGIA DE LAS ONDAS SONORAS QUE LLEGAN AL TIMPANO (GUYTON, 1971, PGS. 634-635). COMO LA MEMBRANA PRACTICAMENTE NO REFLEJA NADA DE ENERGIA Y TODO EL TRABAJO QUE LA PRESION FACE SOBRE ELLA SE TRANSMITE AL PIE DEL ESTRIBO; LOS DESPLAZAMIENTOS DE AMBAS PARTES PUEDEN SER REPRESENTADOS COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA 2.2.

EL TRABAJO QUE UNA ONDA DE PRESION P EJERCE SOBRE LA MEMBRANA ESTA DADO POR:

$$W = P_1 \cdot \Delta V \quad \text{Y COMO} \quad \Delta V = S_1 \cdot \Delta x$$

RESULTA QUE: $W = P_1 \cdot S_1 \cdot \Delta x \quad \dots \dots \dots \textcircled{I}$

USANDO UN RAZONAMIENTO ANALOGICO PARA EL PIE DEL ESTRIBO: $W = P_2 S_2 \cdot \Delta x \dots \textcircled{II}$

DE \textcircled{I} Y \textcircled{II} TENEMOS: $P_1 S_1 = P_2 S_2 \quad \dots \dots \dots \textcircled{III}$

ESTA ECUACION DEMUESTRA QUE LAS PRESIONES SON INVERSAMENTE PROPORCIONALES A LAS SUPERFICIES. LA MULTIPLICACION DE LA PRESION QUE RESULTA, ES PRECISAMENTE LA ADECUADA PARA LA TRANSMISION DEL SONIDO DE UN MEDIO COMPRESIBLE COMO EL AIRE, A UN MEDIO LIQUIDO, PRACTICAMENTE INCOMPRESIBLE. (FROMENTO, 1972, PGS. 474-475) TODO SISTEMA VIBRANTE QUE TIENE INERCIA Y QUE TIENE UN COMPONENTE ELASTICO, TAMBIEN TIENE UNA FRECUENCIA NATURAL EN LA CUAL PUEDE VIBRAR MAS FACILMENTE. ESTA ES LA QUE RECIBE EL NOMBRE DE "FRECUENCIA DE RESONANCIA". COMO EL SISTEMA DE HUESECILLOS TIENE INERCIA, Y COMO SE HALLA SUSPENDIDO DE LIGAMENTOS ELASTICOS, TIENE UNA FRECUENCIA DE RESONANCIA NATURAL DE 700 A 1400 CICLOS/SEG. SIN EMBARGO, LOS LIGAMENTOS Y OTRAS ESTRUCTURAS UNIDAS A LOS HUESECILLOS TAMBIEN SON DE TIPO VISCOSO, LO CUAL EXCITA LA RESONANCIA EXCESIVA. ESTO ES LO QUE RECIBE EL NOMBRE DE AMORTIGUAMIENTO DE LAS VIBRACIONES. DEBIDO A LO ANTERIOR LAS ONDAS

DE APROXIMADAMENTE 1200 CICLOS/SEG. PUEDEN TRANSMITIRSE A TRAVES DEL SISTEMA DE HUESECILLOS MAS FACILMENTE QUE LAS OTRAS FRECUENCIAS.

EN CUANTO AL PAPEL DE LOS MUSCULOS, COMO ESTOS SON ANTAGONISTAS, AL CONTRAERSE SIMULTANEAMENTE DAN RIGIDEZ A LA CADENA DE HUESECILLOS, DIFICULTANDO ASI LA TRANSMISION DE PRESIONES MUY ELEVADAS AL OIDO INTERNO; CUMPLIENDO ENTONCES FUNCIONES DE ATENUACION. ESTO SE LLAMA "REFLEJO DE ATENUACION". ESTE PROCESO PUEDE DISMINUIR LA INTENSIDAD DE TRANSMISION DE SONIDO HASTA 30 A 40 DECIBELES, O SEA, LA DIFERENCIA QUE HAY ENTRE UN SUSURRO Y EL SONIDO EMITIDO POR UN LOCUICH DE RADIO. LA FUNCION DE ESTE MECANISMO ES, EN PARTE, LA DE PERMITIR LA ADAPTACION DEL OIDO A LOS SONIDOS DE INTENSIDADES DIFERENTES, PERO MAS QUE NADA, LA DE PROTEGER AL CARACOL DE LESIONES POR RUIDOS EXCESIVAMENTE INTENSOS. LOS SONIDOS QUE GENERALMENTE SON BASTANTE INTENSOS COMO PARA LESIONAR LA MEMBRANA BASILAR SON PRECISAMENTE LOS DE FRECUENCIA BAJA, O SEA, LOS QUE SE ATENUAN. LA CONTRACCION DE LOS MUSCULOS DEL OIDO MEDIO TAMBIEN SE PRODUCE AL HABLAR, EVITANDO ASI LA PERCEPCION EXCESIVA DE LAS PROPIAS PALABRAS, Y DURANTE LOS CAMBIOS DE POSICION DE LA CABEZA. EN ESTE ULTIMO CASO, CONTRIBUYEN A EVITAR VIBRACIONES DE LOS HUESECILLOS QUE GENERARIAN SENSACIONES DE SONIDO. (GUYTON, 1971, PAGES. 634)

2.3 OIDO INTERNO

EN EL OIDO INTERNO SE PRODUCEN FENOMENOS MECANICOS Y PROCESOS ELECTRICOS. ENTRE LOS PRIMEROS SE ESTUDIARAN LA SECUENCIA DE LOS CAMBIOS QUE DAN LUGAR A LA TRANSDUCCION Y EL MECANISMO DE LA DISCRIMINACION DE FRECUENCIAS. LOS PROCESOS ELECTRICOS NO SE

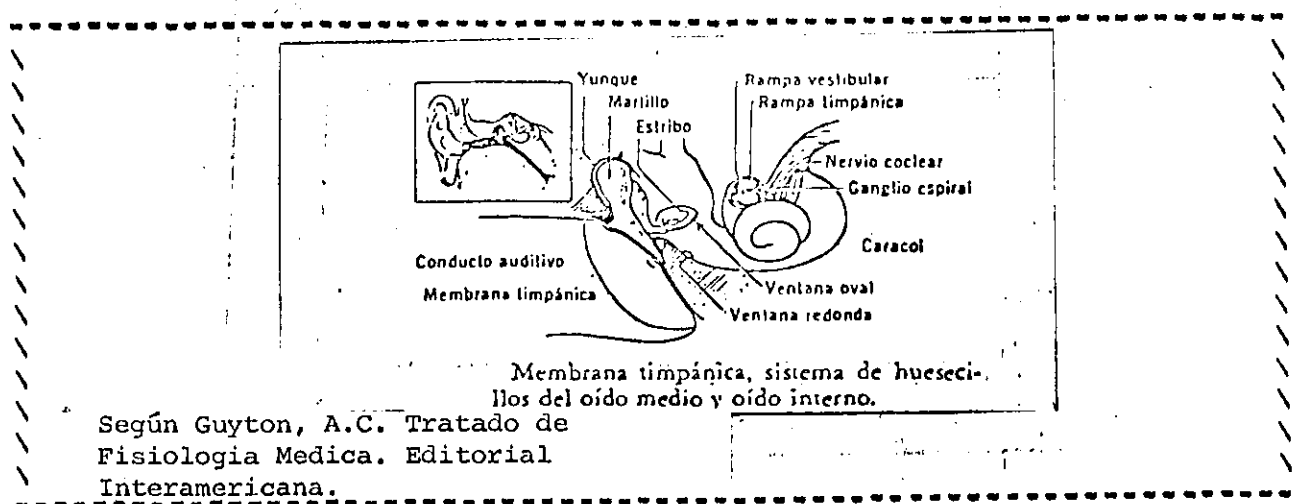


FIGURA 2.3

TRATARAN EN ESTE TRABAJO, POR ESTAR FUERA DEL ALCANCE DEL MISMO.

2.3.1 MECANISMO DE LA TRANSDUCCION.

EN LA FIGURA 2.4 SE INDICAN LAS PORCIONES FUNCIONALES DEL CARACOL PARA TRANSMISION DE LAS VIBRACIONES SONORAS. PRIMERO SE DEBE OBSERVAR QUE LA MEMBRANA VESTIBULAR NO SE HALLA INDICADA EN LA FIGURA. ESTA MEMBRANA ES TAN DELGADA Y SE MUEVE TAN FACILMENTE, QUE NO DIFICULTA EL PASE DE LAS VIBRACIONES SONORAS DE LA RAMPA VESTIBULAR A LA RAMPA MEDIA. POR LO QUE EN CUANTO A TRANSMISION DEL SONIDO, LAS DOS RAMPAS SE CONSIDERAN COMO UNA CAMARA UNICA. LA IMPORTANCIA DE LA MEMBRANA VESTIBULAR DEPENDE DE QUE CONSERVA UN LIQUIDO ESPECIAL EN LA RAMPA MEDIA QUE ES NECESARIO PARA EL FUNCIONAMIENTO NORMAL DE LAS CELULAS CILIADAS RECEPTORAS DE LOS SONIDOS.

LA VIBRACION DEL PIE DEL ESTRIBO ES TRANSMITIDA POR LA VENTANA OVAL A LA PERILINF A DE LA RAMPA VESTIBULAR QUE NACE EN ESA VENTANA. CUANDO LA BASE DEL ESTRIBO SE MUEVE EN SU VIBRACION HACIA ADENTRO DE ESA RAMPA, LA PRESION EN LA PERILINF A AUMENTA. COMO LA CAVIDAD DEL CARACOL ES RIGIDA Y EL LIQUIDO QUE LA LLENA ES INCOMPRESIBLE, EL MOVIMIENTO DE LA BASE DEL ESTRIBO HACIA ADENTRO DEBE IR ACOMPAÑADO, DE UN DESPLAZAMIENTO OPUESTO DE LA MEMBRANA DE LA VENTANA REDONDA, LA CUAL ES LA UNICA PARTE DEFORMABLE QUE HAY EN LA PARED. LA MEMBRANA DE LA VENTANA REDONDA SE MUEVE

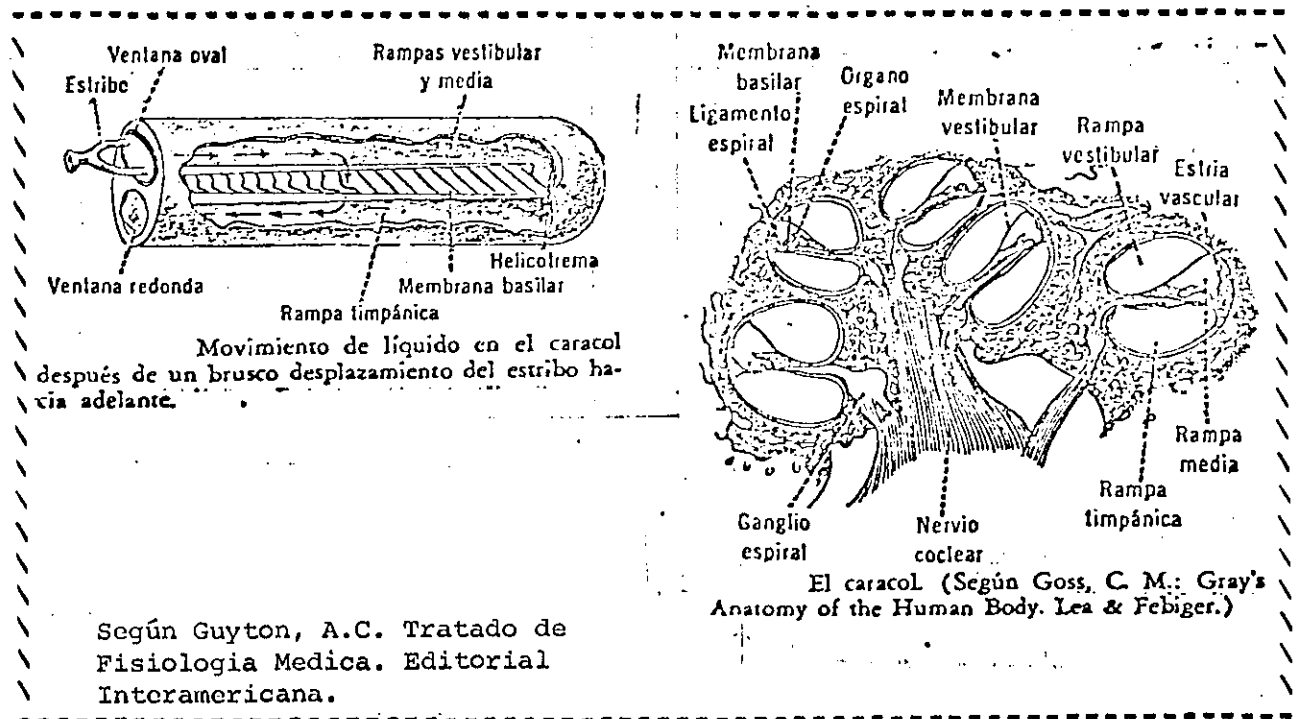


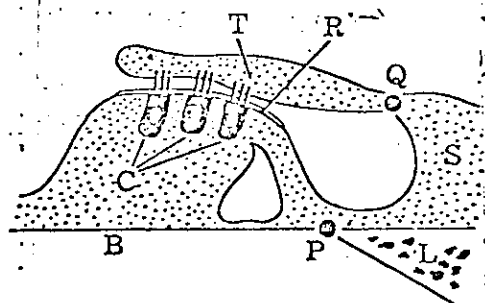
FIGURA 2.4

FIGURA 2.5

SIMULTANEAMENTE Y EN SENTIDO CONTRARIO A LA BASE DEL ESTRIBO (VER FIGURA 2.4). AL AUMENTAR LA PRESION EN EL TRAMO VESTIBULAR, EL LIQUIDO TIENDE A PASAR POR EL HELICOTREMA A LA RAMPA TIMPANICA, PERO EL TAMAÑO DEL CRIFICIO, LA INERCIA DEL LIQUIDO Y SU VISCOSIDAD, IMPIDEN QUE PASE UNA CANTIDAD SIGNIFICATIVA DE LIQUIDO EN EL POCO TIEMPO EN QUE LA PRESION ESTA AUMENTADA DURANTE LA VIBRACION.

SI EL ESTRIBO SE MUEVE HACIA ADENTRO MUY LENTAMENTE, EL LIQUIDO DE LA RAMPA VESTIBULAR SERA IMPULSADO A TRAVES DEL HELICOTREMA HACIA LA RAMPA TIMPANICA, Y ESTO HARA QUE LA VENTANA REDONDA HAGA PROMINENCIA HACIA AFUERA. AHORA, SI EL ESTRIBO VIENE HACIA ADENTRO Y HACIA AFUERA RAPIDAMENTE, LA ONDA LIQUIDA NO TIENE TIEMPO DE HACER TODO EL CAMINO HACIA EL HELICOTREMA, LA VENTANA REDONDA Y DE REGRESO, ENTRE DOS VIBRACIONES SUCCESIVAS. DEBIDO A ESTO, LA ONDA LIQUIDA TOMA UN CAMINO MAS CORTO A TRAVES DE LA MEMBRANA BASILAR PROVOCANDO SU PROPUSSION EN UNO Y OTRO SENTIDO CON CADA VIBRACION SONORA. COMO EL CONDUCTO COCLEAR EN SU CONJUNTO NO SE ENCUENTRA TENSO SINO RELATIVAMENTE FLACCIDO SE DESPLAZA HACIA LA RAMPA TIMPANICA CUANDO AUMENTA LA PRESION EN EL TRAMO VESTIBULAR, HACIENDO LUGAR PARA LA INTRODUCCION DEL PIE DEL ESTRIBO Y PROVOCANDO EL ABOMBAMIENTO DE LA MEMBRANA DE LA VENTANA REDONDA. (GUYTON, 1971, PAG. 636)

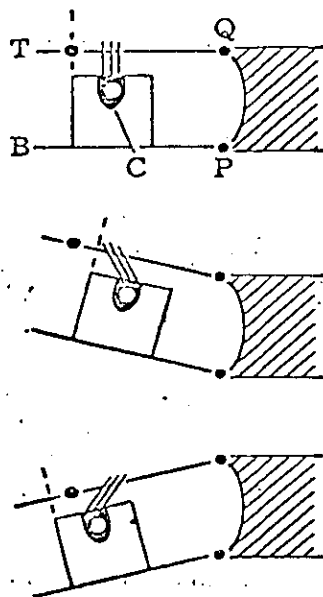
SI OBSERVAMOS EL CORTE DEL CARACOL DE LA FIGURA 2.1 COMPRENDEMOS COMO AL DESPLAZARSE EL CONDUCTO COCLEAR EN SU CONJUNTO, SE MUEVE LA MEMBRANA BASILAR SOBRE SU PUNTO DE APOYO (P). (VER FIGURA 2.6) COMO CONSECUENCIA DE LA FORMA EN QUE SE HALLAN ARTICULADAS LA MEMBRANA BASILAR Y LA TECTORIA, AL VIBRAR LA PRIMERA HACIA ARRIBA Y HACIA ABAJO SE PRODUCEN EN EL RESTO DEL APARATO LOS MOVIMIENTOS QUE SE MUESTRAN EN FORMA ESQUEMATICA EN LA FIGURA 2.7.



— Organó de Corti. B, membrana basilar; C, células ciliadas; L, lámina ósea espiral; R, membrana reticular; S, cinta surcada; T, membrana tectoria; P y Q.

Según Frumento, A. Biofísica.
Editorial Intermedica.

FIGURA 2.6



Representación esquemática de los efectos de los desplazamientos de la membrana basilar sobre los pelos de las células ciliadas

Según Frumento, A. Biofisica.
Editorial Intermedica.

FIGURA 2.7

POR FALLARSE LA MEMBRANA BASILAR (B) Y LA MEMBRANA TECTORIA (T) ARTICULADAS EN DOS PUNTOS DIFERENTES, P Y C, LA OSCILACION DEL APARATO PROVOCA UN DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA TECTORIA SOBRE LA MEMBRANA RETICULAR QUE PROVOCA LA FLEXION DE LOS PELOS DE LAS CELULAS CILIADAS (C). LA FLEXION DE ESTOS PELOS PARECE SER EL ULTIMO PASO MECANICO EN EL PROCESO DE TRANSDUCCION. ESTE PROVOCARIA EN LAS CELULAS CILIADAS LOS CAMBIOS QUE ORIGINAN FINALMENTE LOS IMPULSOS NERVIOSOS QUE LLEVAN LA INFORMACION A LO LARGO DEL NERVIU ACUSTICO. (FRUMENTO, 1972, PAGES. 475-476)

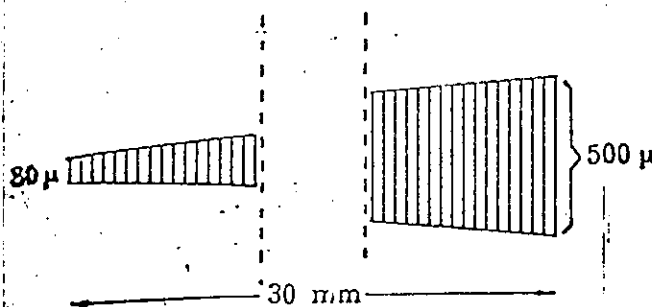
2.3.2 DISCRIMINACION DE FRECUENCIAS

LA FORMA COMO SE DISTRIBUYEN LAS FIBRAS DE LA MEMBRANA BASILAR (VER FIG. 2.8) Y LA VARIACION GRADUAL DE SU LONGITUD A LO LARGO DE LA COCLEA, EN FORMA ANALOGA A LAS CUERDAS DE UN ARPA, NOS HARIA CREER QUE LA DISCRIMINACION DE LA FRECUENCIA SE BASA SIMPLEMENTE EN QUE CADA FIBRA VIBRA ENTRANDO EN RESONANCIA, EN RESPUESTA A UNA FRECUENCIA DETERMINADA. (FRUMENTO, 1972, PAG. 476) LA MEMBRANA BASILAR ESTA FORMADA POR 20000 O MAS FIBRAS BASILARES QUE SE PROYECTAN DESDE EL CENTRO CERO DEL CARACOL, O MODIULO, A LA PARED EXTERNA. ESTAS FIBRAS SON ESTRUCTURAS ELASTICAS, RIGIDAS COMO PELOS, QUE EN SUS CABOS DISTALES NO SE HALLAN FIJAS SINO INCLUIDAS EN LA MEMBRANA, QUEDANDO LIBRES EN UN EXTREMO, DE TAL FORMA QUE

PODRIAN VIBRAR COMO LENGUETAS DE UNA ARMONICA. (GLYTON, 1971, PAG. 637)

LA LONGITUD DE LAS FIBRAS BASILARES AUMENTA PROGRESIVAMENTE DESDE LA BASE DEL CARACOL HASTA EL HELICOTREMA, DESDE APROXIMADAMENTE 80 EN LA BASE HASTA 500 EN EL HELICOTREMA, CON UNA LONGITUD APROXIMADA DE 30 MM. (LA MEMBRANA BASILAR.) ESTE CAMBIO DE LONGITUD PERMITE QUE LAS FIBRAS MAS CORTAS CERCA DEL CARACOL VIBREN CON UNA FRECUENCIA MAS ELEVADA, MIENTRAS QUE LAS QUE SE HALLAN CERCA DEL HELICOTREMA VIBRAN CON UNA FRECUENCIA MAS BAJA. A CADA UNA DE ESTAS FIBRAS CORRESPONDERIA UN LUGAR FIJO DE LA MEMBRANA BASILAR SEGUN EL MODELO ANTES EXPLICADO. EN UN MOMENTO SE SUSTUVO REALMENTE ESTA TEORIA, LA CUAL SE CLASIFICA DENTRO DEL GRUPO DE LAS LLAMADAS "TEORIAS DE LUGAR RESONANTE" (POR ATRIBUIR UN LUGAR DE RESONANCIA A CADA FRECUENCIA). LA OSCILACION DEL ESTRIBO ORIGINA ONDAS QUE SE PROPAGAN A LO LARGO DE LA MEMBRANA Y CUYA AMPLITUD VA CRECIENDO HASTA LLEGAR A UN MAXIMO, A PARTIR DEL CUAL DISMINUYE RAPIDAMENTE Y SE EXTINGUE EN UN BREVE ESPACIO.

LA POSICION DEL MAXIMO Y DEL CORTE QUE LE SIGUE DEPENDE DE LA FRECUENCIA DE LA VIBRACION DE MODO QUE SE DESPLAZA HACIA EL APICE, ES DECIR, HACIA LA ZONA EN QUE EL ANCHO DE LA MEMBRANA BASILAR ES MAYOR, A MEDIDA QUE LA FRECUENCIA DECRECE. ESTO SE HARA MAS COMPRENSIBLE VIENDO LA FIGURA 2.9. EN (I) SE MUESTRAN LOS DESPLAZAMIENTOS DE LA MEMBRANA BASILAR QUE SEGUIRIAN A LOS MOVIMIENTOS DEL ESTRIBO (E), SUPONIENDO POR EL MOMENTO QUE LA ONDA SE PROPAGA CON LA MISMA AMPLITUD EN TODA LA LONGITUD DE LA MEMBRANA. LA PRIMERA PORCION DE LA MEMBRANA SE MUEVE EN FORMA PRACTICAMENTE SINCRONICA CON EL ESTRIBO, Y DE AHI EN ADELANTE EL MOVIMIENTO SE VA ATRASANDO RESPECTO DE LA PARTE INICIAL. EL RESULTADO ES LA PROPAGACION DE UN MOVIMIENTO ONDULATORIO, QUE SE



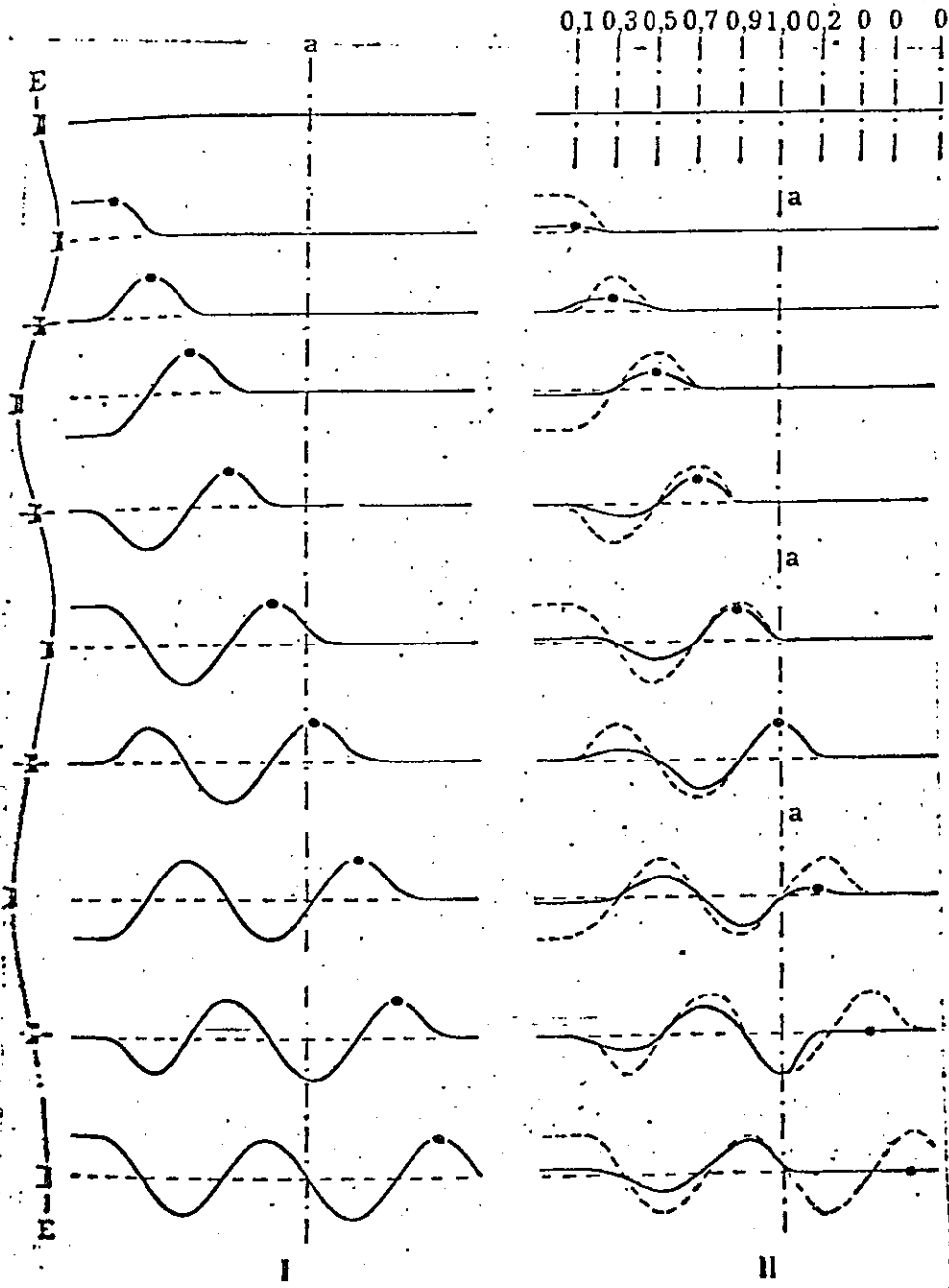
Representación esquemática de la membrana basilar.

Según Frumento, A. Biofísica.
Editorial Intermedica.

FIGURA 2.8

HA PRETENDIDO DESTACAR EN LA FIGURA SEÑALANDO CON LOS PUNTOS GRUESOS LAS PORCIONES SUCCESIVAS QUE OCUPA EL PRIMER MAXIMO AL DESPLAZARSE.

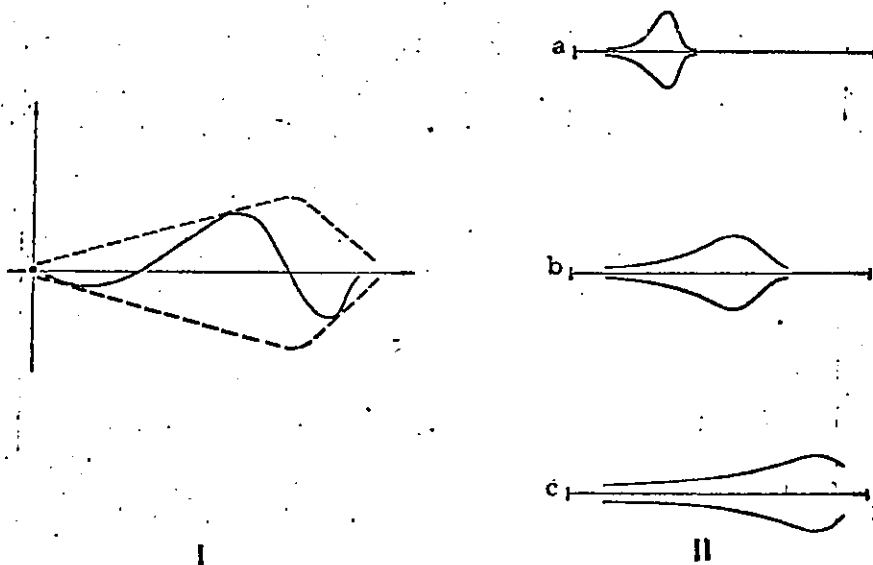
SUPONGAMOS AHORA QUE LA SECCION "A" REPRESENTA LA ZONA DE LA MEMBRANA QUE VIBRA CON MAYOR AMPLITUD PARA ESTA FRECUENCIA. PARA OBTENER UNA IMAGEN REAL DE LA FORMA DE LOS DESPLAZAMIENTOS, SE MUESTRAN EN LA PARTE II DE LA MISMA FIGURA, LAS ONDAS QUE RESULTAN SI LAS AMPLITUDES REPRESENTADAS EN I PARA CADA PUNTO DE LA MEMBRANA SON MULTIPLICADAS POR UN FACTOR VARIABLE. EN ESTE CASO, ESTE FACTOR ES UN MAXIMO EN LA SECCION "A", DECRECE GRADUALMENTE HACIA LA IZQUIERDA Y DISMINUYE EN FORMA BRUSCA HACIA LA DERECHA, ADOPTANDO LOS VALORES QUE SE SEÑALAN EN II EN CADA UNA DE LAS SECCIONES. LOS VALORES DE ESTOS FACTORES SON ARBITRARIOS, LO MISMO SIRVEN PARA DESCRIBIR CUALITATIVAMENTE EN QUE FORMA SE PRODUCE EL MAXIMO COMO EL CORTE QUE LE SIGUE. AL PROPAGARSE, LOS MAXIMOS (SEÑALADOS CON PUNTOS GRUESOS) Y LOS MINIMOS DESCRIBEN CURVAS QUE SON LAS ENVOLVENTES DE LAS ONDAS. (VER FIGURA 2.10 I)



Esquema explicativo de las variaciones de la amplitud de la oscilación al propagarse a lo largo de la membrana basilar

Según Frumento, A. Biofísica.
Editorial Intermedica.

FIGURA 2.9



Envolvente de la vibración de la membrana basilar.
a, b, c, envolventes correspondientes a frecuencias decrecientes.

Según Frumento, A. Biofísica.
Editorial Intermedica.

FIGURA 2.10

EN LA FIGURA 2.10 II SE MUESTRAN ALGUNAS ENVOLVENTES: A, B, C; PROPIAS DE FRECUENCIAS DECRECIENTES DE IZQUIERDA (BASE) A DERECHA (APICE). ESTA INTERPRETACION ES TAMBIEN UNA TEORIA DE LUGAR, PERO NO RESONANTE. AUNQUE ESTE MODELO ES RESULTADO DE OBSERVACIONES, NO EXPLICA LA SUBSISTENCIA DE LA DISCRIMINACION CUANDO, EN ESTADOS PATOLOGICOS, ESTA ANCLADA LA FUNCION DEL CICO MEDIO Y LAS VIBRACIONES LLEGAN AL CICO INTERNO POR VIA OSEA. (FRUMENTO, 1972, PAGES. 477-479)

CAPITULO 3
FISICA Y PSICOFISICA: UNA APROXIMACION INTERDISCIPLINARIA

3.1 LOS SISTEMAS FISICOS QUE INTERVIENEN:

IMAGINESE EN UN TEATRO OYENDO A UN SOLISTA TOCAR. SI SE IDENTIFICAN LOS SISTEMAS QUE SON DE RELEVANCIA PARA LA "MUSICA" QUE SE OYE, PRIMERO, OBTIVAMENTE, SE TENDRA AL MUSICO Y AL INSTRUMENTO QUE "PRODUCE" LA MUSICA; SEGUNDO, SE TENDRA AL AIRE QUE HAY EN EL TEATRO, EL CUAL TRANSMITE EL SONIDO EN TODAS DIRECCIONES; TERCERO, ESTA USTED, EL OYENTE. EN OTRAS PALABRAS, SE TIENE LA CADENA DE SISTEMAS: INSTRUMENTO ==> AIRE ==> OYENTE. ¿QUE PASA MIENTRAS LA MUSICA ES TOCADA? UN CIERTO TIPO Y FORMA DE VIBRACION LLAMADA SONIDO, LA CUAL SE PROPAGA DE UN PUNTO A OTRO EN FORMA DE ONDAS Y A LA CUAL NUESTRO OIDO ES SENSIBLE.

LOS FISICOS USAMOS TERMINOS MAS GENERALES PARA MENCIONAR LOS TRES SISTEMAS ANTES EXPLICADOS. SE LLAMAN: FUENTE ==> MEDIO ==> RECEPTOR. ESTA CADENA DE SISTEMAS ES COMUN PARA EL ESTUDIO DE OTRA GRAN CANTIDAD DE PROCESOS FISICOS: LUZ, RADIOACTIVIDAD, ELECTRICIDAD, GRAVITACION, ETC. LA FUENTE EMITE, EL MEDIO TRANSMITE, EL RECEPTOR DETECTA, REGISTRA, O, EN GENERAL ES AFECTADO EN ALGUNA FORMA ESPECIFICA. LO QUE ES EMITIDO, TRANSMITIDO Y DETECTADO ES ENERGIA (EN UNA DE SUS MULTIPLES FORMAS, DEPENDIENDO DEL CASO PARTICULAR QUE SE TRABAJE). EN EL CASO DE ONDAS SONORAS, EL MEDIO ES ELASTICO, YA QUE INVOLUCRA OSCILACIONES DE PRESION, LAS CUALES SON TANTO COMPRESIONES COMO EXPANSIONES DE LAS MOLECULAS DEL AIRE.

DE ESTA MISMA FORMA SE PUEDEN IR DESGLOSANDO LAS COMPONENTES DE LA FUENTE, EL MEDIO Y EL RECEPTOR.

COMO UN RESUMEN SE PUEDE OBSERVAR LA TABLA 3.1.

3.2 ATRIBUTOS CARACTERISTICOS DE LOS SONIDOS MUSICALES:

DESDE HACE TIEMPO SE ACEPTA QUE HAY TRES SENSACIONES PRIMARIAS ASOCIADAS CON UN SONIDO MUSICAL DADO: GRADO DE ALTURA, VOLUMEN Y TIMBRE. ESTAS CARACTERISTICAS MUSICALES ESTAN ASOCIADAS A CARACTERISTICAS FISICAS, DE LA MANERA QUE SE MENCIONA A CONTINUACION.

GRADO DE ALTURA: EL GRADO DE ALTURA DE UN SONIDO ESTA RELACIONADO PRINCIPALMENTE CON LA FRECUENCIA DE LAS ONDAS QUE INCIDEN EN EL OIDO. EL RANGO DE FRECUENCIAS QUE EL OIDO PUEDE DETECTAR OSCILA ENTRE 16 Y 20,000 CICLOS POR SEGUNDO O HERTZ.

	Sistema	Función
Fuente	Mecanismo de Excitación	Suplir Energía
	Elemento Vibrante	Determinar las características del tono fundamental.
	Resonador	Convierte en oscilaciones de presión de aire (ondas sonoras), determina las características finales del tono.
Medio	Medio Propio	Propagar el sonido
	Fronteras	Reflejan, absorben, reverberan
Receptor	Tímpano	Convierte en oscilaciones mecánicas.
	Oído Interno	Ordena primariamente las frecuencias, convierte en impulsos nerviosos.
	Sistema nervioso	Procesa, exhibe, identifica, almacena y transfiere a otros centros del cerebro.

Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

TABLA 3.1

VOLUMEN: EL VOLUMEN ESTA RELACIONADO PRINCIPALMENTE CON LA AMPLITUD Y FLUJO DE ENERGIA DE LA ONDA SONORA. EN OTRAS PALABRAS, EL VOLUMEN ESTA RELACIONADO CON LA CANTIDAD DE PRESION EJERCIDA SOBRE EL OIDO. CUANDO LA AMPLITUD O LA PRESION AUMENTA, LA SENSACION ES MAS INTENSA, Y VICEVERSA.

TIMBRE: LA MODALIDAD DE UN TONO, MEDIANTE EL CUAL ES POSIBLE RECONOCER LA FUENTE SONORA, SE LLAMA TIMBRE. DE ESTA MANERA IDENTIFICAMOS EL VIOLIN, EL SAXOFON, O LA VOZ DE UN TENOR. SE EMPLEAN MUCHAS PALABRAS PARA REFERIRSE A LA CALIDAD DEL TIMBRE, ENTRE LAS CUALES PODEMOS CITAR: ASPERO, SLAVE, HUECO, LLENO, FINO, RICO, DORADO, PENETRANTE, ETC.

3.3 EL ELEMENTO TIEMPO EN LA MUSICA:

UN SONIDO CONTINUO CON FRECUENCIA, INTENSIDAD, Y ESPECTRO CONSTANTE ES MOLESTO. DESPUES DE UN RATO NUESTRO CONSCIENTE YA NO LO REGISTRA. SOLAMENTE CUANDO EL SONIDO ES ELIMINADO SE LOGRA DETECTAR NUEVAMENTE SU EXISTENCIA. LA MUSICA ESTA CONSTITUIDA DE TONOS CUYAS CARACTERISTICAS FISICAS CAMBIAN DE CIERTA MANERA CON EL TIEMPO. ES SOLAMENTE ESTA DEPENDENCIA DEL TIEMPO LA QUE HACE UN SONIDO "MUSICAL" EN EL VERDADERO SENTIDO DE LA PALABRA. DE AGUI EN ADELANTE SE LLAMARA MENSAJE MUSICAL A UNA SECUENCIA TEMPORAL DE TONOS INDIVIDUALES, O SUPERPOSICION DE TONOS. DICHO MENSAJE MUSICAL VA A NO VA A TENER ALGUN SIGNIFICADO (ALGUNAS VECES LLAMADO "GESTALT" TOTAL), DEPENDIENDO DE SI LE ASIGNAMOS ALGUN VALOR COMO RESULTADO DE UNA SERIE DE OPERACIONES CEREBRALES DE ANALISIS, COMPARACION CON MENSAJES PREVIAMENTE ALMACENADOS, ALMACENAMIENTO EN MEMORIA Y ASOCIACIONES. UNA MELODIA ES EL EJEMPLO CLASICO DE UN MENSAJE MUSICAL. ALGUNOS ATRIBUTOS DE "SIGNIFICADO" EN UN MENSAJE MUSICAL SON ELEMENTOS CLAVES EN MUSICA: TONALIDAD (DOMINACION DE UN SOLO TONO EN UNA SECUENCIA), EL SENTIMIENTO DEL RETORNAR A LO TONICO, MODULACION, Y RITMO.

HAY TRES ESCALAS DE TIEMPO DISTINTAS EN LAS CUALES OCURREN VARIACIONES DE TIEMPO DE RELEVANCIA PSICOACUSTICA. PRIMERO, SE TIENE LA ESCALA DE TIEMPO MICROSCOPICA, EN LA CUAL OCURREN LAS VIBRACIONES REALES DE UNA CADA SONORA, CUBRIENDO EL RANGO DESDE CERCA DE 7×10^{-5} A 0.5 SEGUNDOS. DE AGUI HAY UN RANGO INTERMEDIO LOCALIZADO CERCA DE UN DECIMO DE SEGUNDO, EN EL CUAL OCURREN ALGUNOS CAMBIOS TRANSITORIOS COMO UN ALZA O UN DECAIMIENTO DE TONO, REPRESENTANDO LAS VARIACIONES DEL TIEMPO DE LAS CARACTERISTICAS MICROSCOPICAS. FINALMENTE, SE TIENE LA ESCALA DE TIEMPO MACROSCOPICA, CON UN RANGO QUE VA DE 0.1 SEGUNDOS EN ADELANTE Y QUE CORRESPONDE A LAS DURACIONES, SUCCESIONES Y RITMOS DE LOS TONOS MUSICALES COMUNES. ES IMPORTANTE EL NOTAR QUE CADA ESCALA DE TIEMPO TIENE LO QUE SE LLAMA SU CENTRO DE PROCESAMIENTO PARTICULAR ASOCIADO A UNA FUNCION ESPECIFICA EN EL SISTEMA AUDITIVO.

3.4 FISICA Y PSICOFISICA:

SE ESTABLECE COMO UNO DE LOS OBJETIVOS DE LA FISICA: (ROEDERER, 1975): "PROVEER METODOS POR MEDIO DE LOS CUALES SE PUEDE PREDECIR CUANTITATIVAMENTE LA EVOLUCION DE UN SISTEMA FISICO DADO, BASADOS EN LAS CONDICIONES EN LAS CUALES EL SISTEMA SE ENCONTRABA AL INICIO".

PARA ESTABLECER LAS LEYES FISICAS QUE GOBIERNAN UN SISTEMA DADO, SE DEBE PRIMERO RESERVAR EL SISTEMA Y HACER MEDIDAS CUANTITATIVAS DE LAS MAGNITUDES FISICAS PARA ENCONTRAR SUS INTERRELACIONES EXPERIMENTALMENTE. UNA LEY FISICA EXPRESA UNA CIERTA RELACION QUE ES COMUN A MUCHOS SISTEMAS FISICOS DIFERENTES

Y QUE ES INDEPENDIENTE DE CIRCUNSTANCIAS PARTICULARES.

LA PSICOFISICA OPERA DE UNA MANERA QUE ES EN MUCHOS ASPECTOS SIMILAR A LA FISICA CUANTICA. HABLANDO EN GENERAL, AL IGUAL QUE LA FISICA, LA PSICOFISICA TRATA DE HACER PREDICCIONES SOBRE LA RESPUESTA DE UN SISTEMA ESPECIFICO SUJETO A CIERTAS CONDICIONES INICIALES. EL SISTEMA QUE SE ESTA CONSIDERANDO ES EL CEREBRO Y LOS SISTEMAS NERVIOSOS PERIFERICOS ASOCIADO Y ENDOCRINO. LAS CONDICIONES SON DETERMINADAS POR EL ESTIMULO SENSORIAL, Y LA EVOLUCION ES MANIFESTADA POR LAS REACCIONES FISIOLOGICAS INDIVIDUALES O POR TODO EL COMPORTAMIENTO COMPLEJO DEL ORGANISMO DIRIGIDO POR EL CEREBRO. COMO LA FISICA, LA PSICOFISICA PUEDE HACER SUPOSICIONES SIMPLIFICANTES Y CONSTRUIR MODELOS (PRINCIPALMENTE PARA LA OPERACION DE LOS SISTEMAS NERVIOSOS Y NEUROPSICOLOGICO) ANTES DE AVENTURARSE EN LAS PREDICCIONES.

EN UNA FORMA DIFERENTE A LA FISICA CLASICA, PERO ESTRICTAMENTE SIMILAR A LA FISICA CUANTICA, LAS PREDICCIONES PSICOFISICAS NO PUEDEN NI DEBEN ESPERARSE EXACTAS O UNICAS (SOLAMENTE SE PUEDEN ESTABLECER VALORES PROBABILISTICOS). ADEMAS, EN LA PSICOFISICA, MUCHAS MEDICIONES PUEDEN SUSTANCIALMENTE PERTURBAR EL SISTEMA QUE ESTA SIENDO OBSERVADO, Y POCO PUEDE HACERSE PARA EVITAR COMPLETAMENTE ESTA PERTURBACION.

FINALMENTE SE VIENEN A MOSTRAR LAS DIFERENCIAS MAS CRUCIALES ENTRE LA FISICA Y LA PSICOFISICA: (1) MEDICIONES REPETIDAS DE LA MISMA CLASE PUEDEN CONDICIONAR LA RESPUESTA DEL SISTEMA PSICOFISICO BAJO OBSERVACION: EL CEREBRO TIENE LA HABILIDAD DE APRENDER, CAMBIANDO GRADUALMENTE EL CURSO DE LA PROBABILIDAD DE RESPUESTA A UN ESTIMULO DADO. (2) EL SER HUMANO NO PUEDE SER SOMETIDO A UN EXPERIMENTO CONTROLADO, YA QUE SUS REACCIONES RESULTAN IMPREDECIBLES.

CAPITULO 4 VIBRACIONES SONORAS, TONOS PUROS, Y LA PERCEPCION DEL TONO.

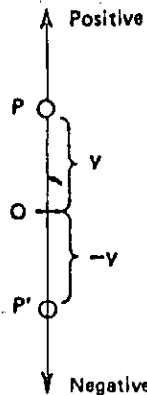
SE OYE UN SONIDO CUANDO EL TIMPANO ES PUESTO EN UN TIPO CARACTERISTICO DE MOVIMIENTO PERIODICO LLAMADO VIBRACION. ESTA VIBRACION ES CAUSADA POR OSCILACIONES DE BAJA PRESION DEL AIRE QUE ESTA EN EL CANAL AUDITIVO, ASOCIADAS A UNA ONDA DE SONIDO INCIDENTE. EN ESTA ETAPA ES CONVENIENTE NO ENTRAR EN DETALLES ACERCA DE COMO SE PONE EN MOVIMIENTO EL TIMPANO. ES SUFICIENTE CONSIDERAR QUE, PARA FRECUENCIAS BAJAS, LOS TIMPANCOS SIGUEN FIELMENTE EL MOVIMIENTO DE LOS DIAFRAGMAS DE DOS AUDIFONOS IMAGINARIOS COLOCADOS SOBRE LAS OREJAS.

4.1 MOVIMIENTO Y VIBRACION

"MOVIMIENTO" SIGNIFICA "CAMBIO DE POSICION" DE UN CUERPO DADO CON RESPECTO A UN CUERPO DE REFERENCIA. SI EL OBJETO EN MOVIMIENTO ES MUY PEQUEÑO CON RESPECTO AL OBJETO DE REFERENCIA O CON RESPECTO A LAS DIMENSIONES DEL ESPACIO QUE RECORRE, DE TAL MANERA QUE SU FORMA ES PRACTICAMENTE IRRELEVANTE, ENTONCES EL PROBLEMA SE REDUCE A LA DESCRIPCION DEL MOVIMIENTO DE UN PUNTO EN EL ESPACIO. ESTA ES LA RAZON POR LA CUAL UN CUERPO TAN PEQUEÑO ES FRECUENTEMENTE DENOMINADO PUNTO MATERIAL O PARTICULA. POR OTRO LADO, SI EL OBJETO NO ES PEQUEÑO, PERO SABEMOS DE ANTEMANO QUE TODOS LOS PUNTOS DEL CUERPO ESTAN RESTRINGIDOS A MOVERSE EN TRAYECTORIAS PARALELAS, ESTO ES, SIGUIENDO UNA TRASLACION RECTILINEA, TAMBIEN BASTARA CON ESPECIFICAR EL MOVIMIENTO DE UNA SOLA PARTICULA DEL CUERPO. ESTE ES UN CASO DE MOVIMIENTO EN UNA DIMENSION, Y LA POSICION DE UN PUNTO DADO DEL CUERPO (Y, POR CONSIGUIENTE, DE TODO EL CUERPO) ESTA COMPLETAMENTE ESPECIFICADA POR UN SOLO NUMERO: LA DISTANCIA ENTRE ÉL Y UN PUNTO DE REFERENCIA FIJO.

CUALQUIER PUNTO FIJO PUEDE SERVIR COMO PUNTO DE REFERENCIA, AUNQUE, POR CONVENIENCIA, A VECES SE SELECCIONARA UNO EN ESPECIAL (TAL COMO LA POSICION DE EQUILIBRIO EN UN CASO DE MOVIMIENTO OSCILATORIO). LA POSICION DE UN PUNTO MATERIAL P ES INDICADA POR LA DISTANCIA "Y" AL PUNTO DE REFERENCIA O (FIG.4.1) "Y" ES LLAMADA EL DESPLAZAMIENTO DE P CON RESPECTO A O, O LA COORDENADA DE P. ES NECESARIO USAR TANITO NUMEROS POSITIVOS COMO NEGATIVOS PARA DISTINGUIR ENTRE LAS DOS DIRECCIONES CON RESPECTO A O.

EL PUNTO P ESTA EN MOVIMIENTO CON RESPECTO A O CUANDO SU POSICION CAMBIA CON EL TIEMPO. EL TIEMPO SERA DENOTADO CON LA LETRA "t". ESTE ULTIMO TAMBIEN REQUIERE QUE ESPECIFIQUEMOS UN INSTANTE DE TIEMPO DE REFERENCIA EN DONDE $t = 0$.



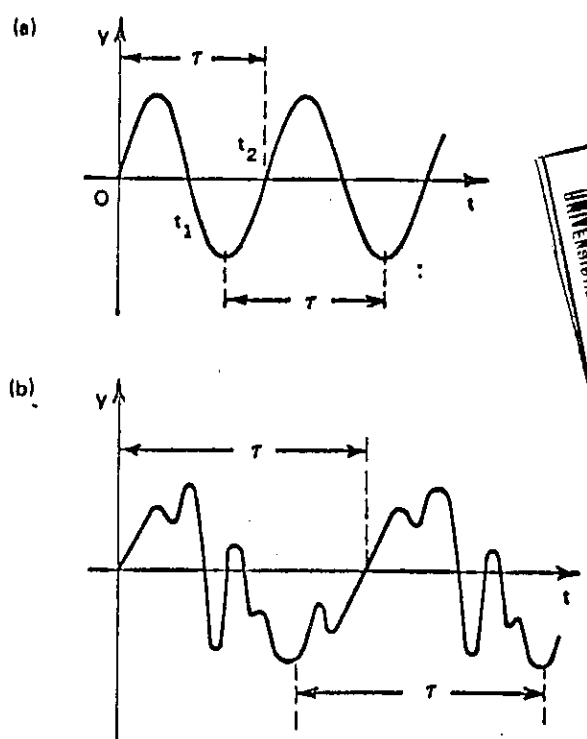
Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 4.1

HAY CIERTA CLASE DE MOVIMIENTOS EN LA CUAL EL PUNTO SIGUE UN PATRON QUE SE REPITE EN EL TIEMPO. ESTE ES EL MOVIMIENTO PERIODICO O VIBRATORIO. ES EL TIPO DE MOVIMIENTO DE MAYOR IMPORTANCIA EN LA FISICA DE LA MUSICA. EL INTERVALO DE TIEMPO DESPUES DEL CUAL SE REPITE EL PATRON DE MOVIMIENTO SE LLAMA PERIODO (FIG. 4.2 A). LO DENOTAMOS CON LA LETRA GRIEGA γ . EL PATRON DE MOVIMIENTO QUE OCURRE DURANTE UN PERIODO SE LLAMA CICLO.

HAY INSTRUMENTOS MECANICOS Y ELECTRONICOS QUE PUEDEN DIBUJAR AUTOMATICAMENTE LA GRAFICA DE UN MOVIMIENTO PERIODICO. SIN EMBARGO, EL INSTRUMENTO MECANICO NO ES PRACTICO PARA REGISTRAR VIBRACIONES ACUSTICAS, PUES ESTAS TIENEN PERIODOS TAN CORTOS QUE ES IMPOSIBLE DESPLAZAR UNA PLUMA LO SUFICIENTEMENTE RAPIDO COMO PARA REPRODUCIR ESTE TIPO DE VIBRACION. LO ADECUADO AL CASO ES UN INSTRUMENTO ELECTRONICO QUE REGISTRA SEÑALES DE MUY PEQUEÑA DURACION Y QUE SE LLAMA OSCILOSCOPICO.

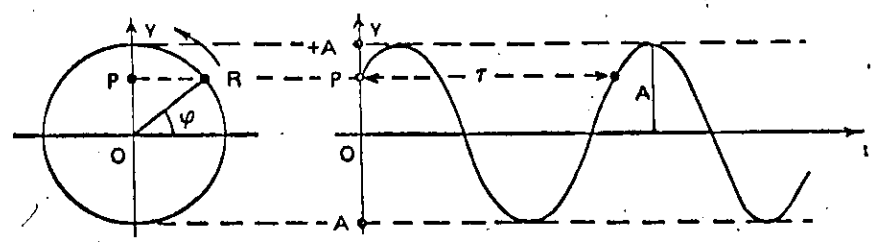
4.2 MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE



Según Roederer, J.G. Introduction to the
 Physics and Psychophysics of Music.
 Springer-Verlag.

FIGURA 4.2

EL TIPO MAS SIMPLE DE MOVIMIENTO PERIODICO PUEDE SER REPRESENTADO COMO LA PROYECCION DE UN MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME SOBRE EL DIAMETRO DE UN CIRCULO (FIG. 4.3). A MEDIDA QUE EL PUNTO DA VUELTA UNIFORMEMENTE (CON PERIODO T , I.E., UNA CADA T SEGUNDOS), EL PUNTO DE PROYECCION P SE MUEVE HACIA ARRIBA Y HACIA ABAJO A LO LARGO DEL EJE "Y", CON LO QUE SE LLAMA MOVIMIENTO



Según Roederer, J.G. Introduction to the
 Physics and Psychophysics of Music.
 Springer-Verlag.

FIGURA 4.3

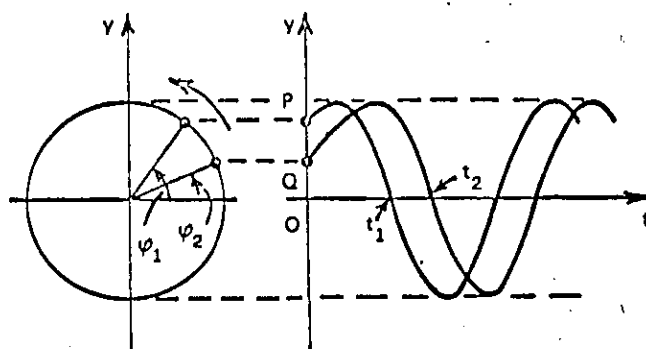
ARMONICO SIMPLE (VER GRAFICA AL LADO DERECHO DE LA FIG. 4.3). TAMBIEN SE LE LLAMA MOVIMIENTO SINUSOIDAL PUES PUEDE SER REPRESENTADA ANALITICAMENTE POR MEDIO DE LA FUNCION TRIGONOMETRICA SENO. EL DESPLAZAMIENTO MAXIMO (HACIA ARRIBA O HACIA ABAJO) ES LA AMPLITUD. EL ANGULO ϕ ES LLAMADO FASE DEL MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE. AL CONSIDERAR DOS MOVIMIENTOS CON DISTINTAS POSICIONES INICIALES, SE OBTIENEN DOS POSICIONES ANGULARES ϕ_1 Y ϕ_2 QUE DESCRIBEN LA POSICION DE LOS PUNTOS SOBRE EL CIRCULO, ASOCIADOS A LOS MOVIMIENTOS REALES (VER FIG. 4.4). LA DIFERENCIA $\phi_1 - \phi_2$, QUE PERMANECE CONSTANTE EN ESTE CASO, ES DENOMINADA DIFERENCIA DE FASE ENTRE LOS DOS MOVIMIENTOS ARMONICOS.

EN RESUMEN, UNA VIBRACION PURA O ARMONICA ESTA ESPECIFICADA POR LOS VALORES DE TRES PARAMETROS: EL PERIODO T , LA AMPLITUD A Y LA FASE ϕ (FIG. 4.3). TODOS ELLOS, ESPECIALMENTE LOS PRIMEROS DOS, JUEGAN UN PAPEL PRINCIPAL EN LA PERCEPCION DE SONIDOS MUSICALES. ADEMAS DE OCURRIR PRACTICAMENTE EN TODO EL UNIVERSO, EL MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE ES EL MOVIMIENTO PERIODICO MAS IMPORTANTE PUES SE PUEDE DEMOSTRAR QUE CUALQUIER TIPO DE MOVIMIENTO PERIODICO PUEDE SER DESCRITO COMO UNA SUMA DE VIBRACIONES ARMONICAS SIMPLES.

4.3 VIBRACIONES ACUSTICAS Y SENSACIONES DE TONO PURO.

EN GENERAL, EL OIDO ES UN INSTRUMENTO EXTREMADAMENTE SENSITIVO: SE PUEDEN DETECTAR AMPLITUDES MUY PEQUEÑAS DE VIBRACIONES DEL TIMPANO (HASTA DE 10^{-7} CM) Y PERIUDOS DE VIBRACIONES MUY CORTOS (HASTA DE 7×10^{-5} SEG.)

ES CONVENIENTE INTRODUCIR UNA CANTIDAD QUE ES USADA MAS QUE EL PERIODO T : LA FRECUENCIA, QUE SE DEFINE COMO $f = 1/T$. FISICAMENTE



Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 4.4

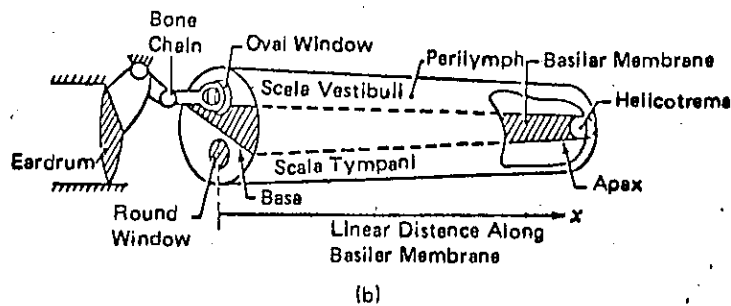
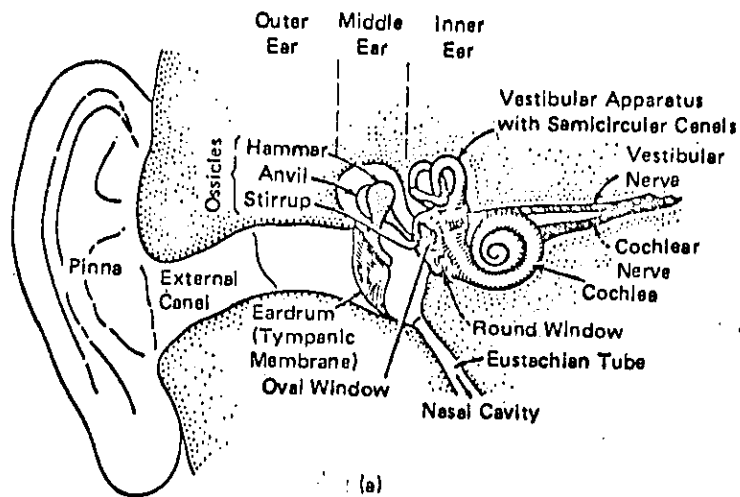
REPRESENTA EL NUMERO DE REPETICIONES DEL PATRON DE VIBRACION, O CICLOS, POR UNIDAD DE TIEMPO. LA RAZON PARA PREFERIR f A T ES QUE LA FRECUENCIA AUMENTA CUANDO EL SUJETO PERCIBE UN AUMENTO EN LA ALTURA DEL TONO. SI T SE MIDE EN SEGUNDOS, f SE EXPRESA EN CICLOS POR SEGUNDO. ESTA UNIDAD ES LLAMADA HERTZ (HZ), EN HONOR DE HEINRICH HERTZ, FAMOSO FISICO ALEMAN.

CUANDO EL SONIDO CAUSA UN MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE EN EL TIMPANO, CON CARACTERISTICAS CONSTANTES (FRECUENCIA, AMPLITUD, FASE), SE OYE LO QUE SE DENOMINA "TONO PURO". LOS TONOS Puros TIENEN QUE SER GENERADOS CON OSCILADORES ELECTRONICOS. NO HAY NINGUN INSTRUMENTO MUSICAL DE OTRO TIPO QUE LOS PRODUZCA. AUN PARA TONOS Puros GENERADOS ELECTRONICAMENTE NO HAY NINGUNA GARANTIA QUE LLEGUEN EN ESTADO PURO AL OIDO.

AL OIR UN TONO PURO CUYA FRECUENCIA Y AMPLITUD PUEDE SER CAMBIADA A VOLUNTAD, SE VERIFICA QUE EXISTE UNA CORRESPONDENCIA ENTRE TONO Y FRECUENCIA, Y ENTRE VOLUMEN Y AMPLITUD.

UN HECHO NOTABLE ES QUE PARA UN SONIDO DE FRECUENCIA DADA, LAS OSCILACIONES MAXIMAS DE LA MEMBRANA BASILAR OCURREN SOLO EN UNA REGION LIMITADA DE LA MEMBRANA, CUYA LOCALIZACION DEPENDE DE LA FRECUENCIA DEL TONO. EN OTRAS PALABRAS, PARA CADA FRECUENCIA HAY UNA REGION DE SENSIBILIDAD MAXIMA, O REGION DE RESONANCIA, EN LA MEMBRANA BASILAR. ENTRE MAS BAJA ES LA FRECUENCIA DEL TONO, MAS CERCANA AL APEX ESTA LA REGION DE CELULAS CAPILARES ACTIVADAS (DONDE LA MEMBRANA ES MAS FLEXIBLE) (VER FIG. 4.5 B), MIENTRAS QUE ENTRE MAS ALTA ES LA FRECUENCIA, MAS CERCANAS A LA VENTANA OVAL SE LOCALIZAN DICHAS CELULAS, ESTO ES, DONDE LA MEMBRANA ES MAS RIGIDA. LA POSICION ESPACIAL x DE LAS CELULAS CAPILARES Y DE LAS NEURONAS ASOCIADAS A ELLAS, A LO LARGO DE LA MEMBRANA BASILAR (FIG. 4.5 B), DETERMINA LA SENSACION PRIMARIA DEL TONO.

LA FIGURA 4.6 MUESTRA COMO VARIA LA POSICION x (MEDIDA DESDE LA BASE, FIG. 4.5 B) DE LA REGION DE SENSIBILIDAD MAXIMA CON LA FRECUENCIA DE UN TONO PURO SINUSOIDAL, PARA UNA PERSONA ADULTA PROMEDIO (VON BIKESY, 1960). SE PUEDEN EXTRAER VARIAS CONCLUSIONES IMPORTANTES. ANTES QUE NADA ES DE NOTARSE QUE EL RANGO DE FRECUENCIAS MAS IMPORTANTE EN SENTIDO MUSICAL (APROXIMADAMENTE 20-4,000 HZ) CUBRE CASI DOS TERCIOS DE LA EXTENSION DE LA MEMBRANA BASILAR (DE 12 A 35 MM. DE LA BASE). SEGUIDAMENTE, ES SIGNIFICATIVO EL HECHO DE QUE CUANDO LA FRECUENCIA DE UN TONO SE DUPLICA, LA REGION DE RESONANCIA CORRESPONDIENTE SE DESPLAZA UNA CANTIDAD MAS O MENOS CONSTANTE DE 3.5 A 4 MM., SIN IMPORTAR EL RANGO DE FRECUENCIAS EN EL QUE OCURRE LA DUPLICACION. EN GENERAL, SIEMPRE QUE LA FRECUENCIA ES MULTIPLICADA POR UN FACTOR DADO, LA POSICION x DE LA REGION DE RESONANCIA NO ES MULTIPLICADA SINO SIMPLEMENTE TRASLADADA CIERTA DISTANCIA.



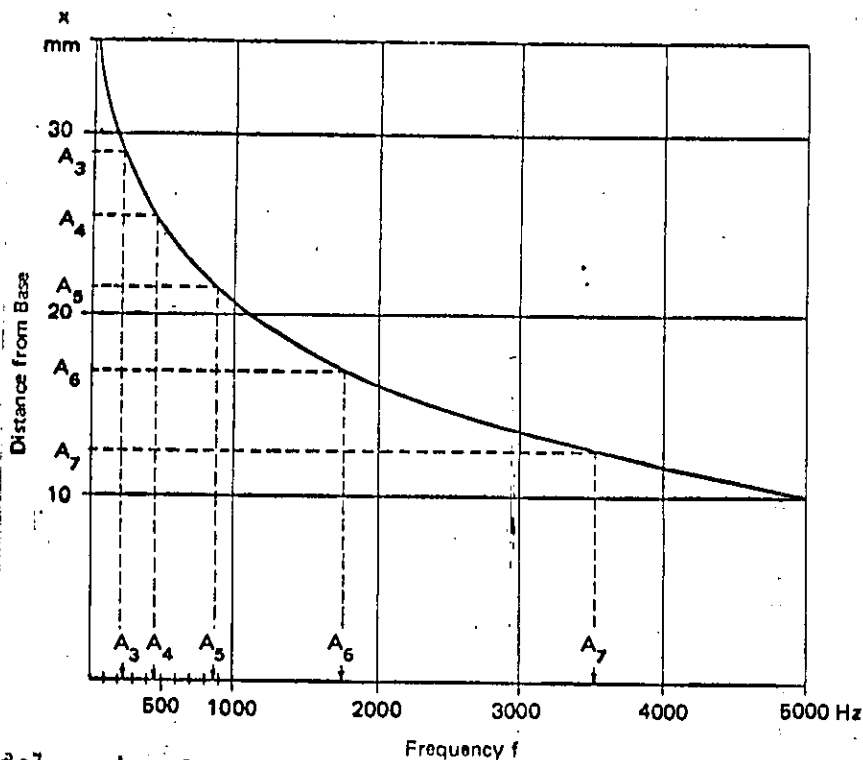
(a) Vista esquemática del oído (Flanagan 1972, Fig. 4) (no a escala); (b) la coclea mostrada estirada (gran

simplificación) Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 4.5

LOS RESULTADOS MENCIONADOS PROVIENEN DE MEDICIONES FISIOLÓGICAS EFECTUADAS SOBRE ANIMALES MUERTOS PERO BIEN CONSERVADOS (VON HEKESY, 1960). ACTUALMENTE ESTAS MEDICIONES PUEDEN SER LLEVADAS A CABO EN COCLEAS VIVAS, A TRAVÉS DEL EFECTO MOSSBAUER. UNA MASA DIMINUTA DE SUSTANCIA RADIOACTIVA (COBALTO 57) ES IMPLANTADA EN LA MEMBRANA BASILAR. LOS PEQUEÑÍSIMOS DESPLAZAMIENTOS DE LA MEMBRANA PUEDEN, ENTONCES, SER DETECTADOS INDIRECTAMENTE MIDIENDO LA TRASLACION (EFECTO DOPPLER) QUE SUFRE LA FRECUENCIA DE LOS RAYOS GAMMA EMITIDOS POR LA SUSTANCIA (RHODE Y ROBLES, 1974).

EN ADELANTE SERA NECESARIO CONSIDERAR LA MAGNITUD PSICOFÍSICA LLAMADA GRADO DE ALTURA, ASOCIADA A UN TONO PURO DE FRECUENCIA f . AL PERCIBIR DOS TONOS Puros DE LA MISMA INTENSIDAD SUCESIVAMENTE, UN INDIVIDUO PROMEDIO ES CAPAZ DE ESTABLECER UN ORDEN RELATIVO ENTRE LOS GRADOS DE ALTURA DE LOS TONOS. EXISTE, SIN EMBARGO UN



Posición del máximo de resonancia sobre la membrana basilar (después de Von Bekesy 1960) para un tono puro de frecuencia f (escalas lineales). Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 4.6

LIMITE NATURAL A LA CAPACIDAD DE ESTABLECER UN ORDEN: CUANDO LA DIFERENCIA ENTRE LAS FRECUENCIAS DE LOS DOS TONOS ES DEMASIADO PEQUEÑA (POR DEBAJO DE CIERTO VALOR FIJO), EL INDIVIDUO JUZGA QUE AMBOS TONOS TIENEN EL MISMO GRADO DE ALTURA. ESTO MISMO SUCEDE AL TRATAR DE ASOCIAR UN ORDEN A TODA MAGNITUD PSICOFISICA. CUANDO LA VARIACION DEL ESTIMULO FISICO ORIGINAL SE ENCUENTRA DENTRO DE CIERTO "LIMEN DE DIFERENCIA", O DIFERENCIA APENAS NOTABLE (DAN), LA SENSACION ASOCIADA SE JUZGA COMO LA MISMA. EN EL MOMENTO EN EL QUE LA VARIACION EXCEDE A LA DAN, SE DETECTA UN CAMBIO EN LA SENSACION.

EL GRADO DE SENSITIVIDAD A CAMBIOS EN LA FRECUENCIA DEL MECANISMO DE PERCEPCION DEL GRADO DE ALTURA PRIMARIO, O CAPACIDAD DE RESOLUCION DE FRECUENCIAS, DEPENDE DE LA FRECUENCIA, INTENSIDAD Y DURACION DEL TONO QUE ESTA SIENDO PERCIBIDO - Y DE LO SUBITO DEL CAMBIO DE FRECUENCIA. VARIA MUCHO DE PERSONA A PERSONA; ES FUNCION DEL ENTRENAMIENTO MUSICAL QUE SE TENGA Y, DESAFORTUNADAMENTE, DEPENDE CONSIDERABLEMENTE DEL METODO DE MEDICION (PRUEBA PSICOLOGICA) QUE SE UTILICE. LA FIGURA 4.7 MUESTRA LA DAN PROMEDIO DE FRECUENCIA PARA TONOS PURES DE

INTENSIDAD CONSTANTE (80 DECIBELES), CUYA FRECUENCIA HA SIDO MODULADA CONTINUA Y LENTAMENTE HACIA ARRIBA Y HACIA ABAJO (ZWICKER, FLOITORP, Y STEVENS, 1957).

DESDE EL COMIENZO DE LA PSICOFISICA, LOS PSICOLOGOS SE HAN SENTIDO TENTADOS A CONSIDERAR EL MINIMO CAMBIO PERCEPTIBLE EN LA SENSACION CAUSADO POR UN DAN DE ESTIMULO, COMO LA UNIDAD "NATURAL" CON LA CUAL "MEDIR" LA CORRESPONDIENTE MAGNITUD PSICOFISICA. EL MINIMO CAMBIO PERCEPTIBLE EN EL GRADO DE ALTURA HA SIDO USADO PARA CONSTRUIR UNA ESCALA SUBJETIVA DEL GRADO DE ALTURA DE UN TONO (STEVENS, VOLKMAN, AND NEWMANN, 1937).

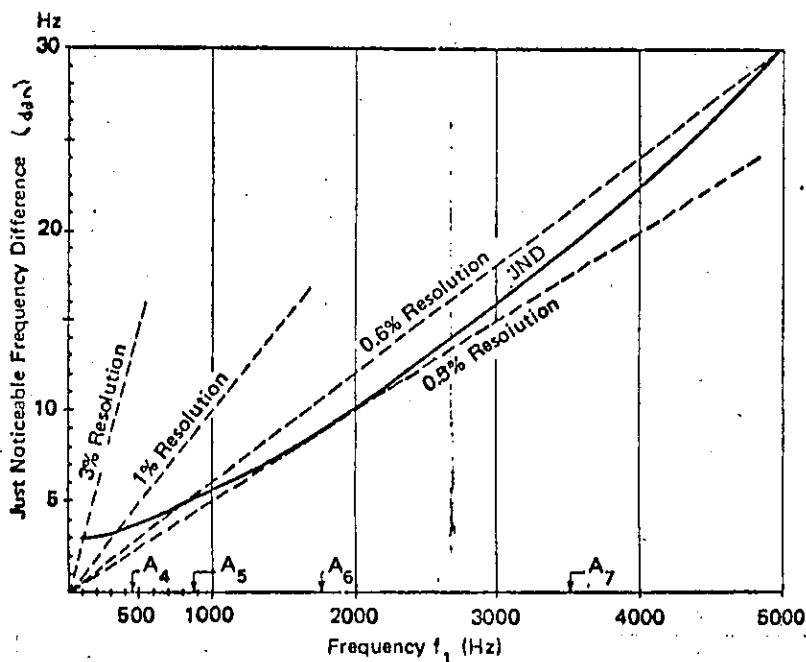
EN RESUMEN, LA FUNCION PRIMARIA DEL OIDO INTERNO (COCLEA) CONSISTE EN CONVERTIR EL PATRON DE VIBRACION EN EL ESPACIO (A LO LARGO DE LA MEMBRANA BASILAR) Y ESTO, A SU VEZ, SE CONVIERTE EN UN PATRON ESPACIAL DE ACTIVIDAD NEURAL. LA DESCRIPCION TEORICA DE ESTE MECANISMO ES LLAMADA LA TEORIA DE LUGAR DEL OIDO. SE VERA LUEGO QUE ESTA ES UNA TEORIA BUENA PERO INCOMPLETA.

4.4 SUPERPOSICION DE TONOS PUROS: COMPASES DE PRIMER ORDEN Y LA BANDA CRITICA

EN ESTA SECCION SE ANALIZARAN LAS CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES DE LA SUPERPOSICION DE DOS TONOS PUROS Y APARECERAN, COMO CONSECUENCIA, ALGUNOS CONCEPTOS BASICOS DE LA FISICA DE LA MUSICA Y DE LA PSICOACUSTICA.

HAY DOS CLASES DE EFECTOS DE SUPERPOSICION, DEPENDIENDO DE DONDE SEAN PROCESADOS EN EL SISTEMA AUDITIVO DEL OYENTE. SI EL PROCESAMIENTO ES MECANICO, ES DECIR, SI OCURRE EN EL FLUIDO COCLEAR, A LO LARGO DE LA MEMBRANA BASILAR, LOS EFECTOS SE DENOMINAN EFECTOS DE SUPERPOSICION DE PRIMER ORDEN, PRINCIPALMENTE PORQUE SON CLARAMENTE DISTINGUIBLES Y FACILES DE SER SOMETIDOS A EXPERIMENTACION PSICOACUSTICA. LOS EFECTOS DE SUPERPOSICION DE SEGUNDO ORDEN SON EL RESULTADO DE PROCESAMIENTO NEURAL Y SON MAS DIFICILES DE DETECTAR, DESCRIBIR Y MEDIR. POR ESTA RAZON SE ESTUDIARAN AQUI SOLO LOS PRIMEROS EFECTOS.

EL SIGNIFICADO FISICO DE LA SUPERPOSICION DE SONIDO SE OBSERVA A TRAVES DE LAS SIGUIENTES ETAPAS: EL TIMPANO SE MUEVE HACIA ADENTRO Y HACIA AFUERA SEGUN LAS VARIACIONES DE PRESION DEL AIRE DENTRO DEL CANAL AUDITIVO; SI SE LE HACE OSCILAR CON UN MOVIMIENTO ARMONICO PURO DE FRECUENCIA Y AMPLITUD DADAS, EL SUJETO "OYE" UN TONO PURO CON CIERTO VOLUMEN Y GRADO DE ALTURA; SI SE PRODUCEN DOS TONOS PUROS DE DIFERENTES CARACTERISTICAS SIMULTANEAMENTE (P.EJ., OYENDO DOS FUENTES INDEPENDIENTES AL MISMO TIEMPO), EL TIMPANO REACCIONA COMO SI ESTUVIERA EJECUTANDO DOS ORDENES DISTINTAS AL MISMO TIEMPO. EL MOVIMIENTO RESULTANTE ES LA SUMA DE LOS MOVIMIENTOS INDIVIDUALES QUE SE DARIAN SI CADA SONIDO PURO ESTUVIERA PRESENTE POR SI SOLO, EN AUSENCIA DEL OTRO. EL

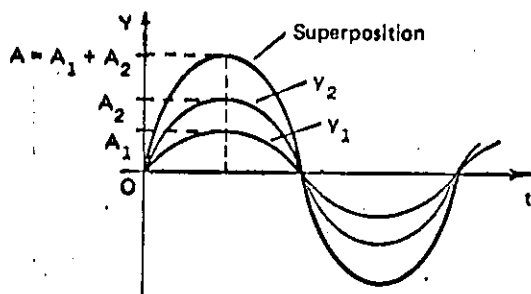


Diferencia apenas notable (DAN) en frecuencia para un tono puro de frecuencia f_1 (escala lineales), determinada con una señal lenta de frecuencia modulada (después de Zwicker, Flottorp, y Stevens 1957). Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 4.7

TAMPANCO NO ES EL ÚNICO COMPONENTE DEL OÍDO QUE SE COMPORTA ASÍ. TAMBIÉN EL MEDIO Y TODAS LAS DEMÁS COMPONENTES VIBRANTES PRESENTAN EL MISMO COMPORTAMIENTO, SIEMPRE QUE LAS AMPLITUDES NO SEAN MUY GRANDES. ESTE EFECTO SE LLAMA SUPERPOSICIÓN LINEAL DE DOS VIBRACIONES.

ES CONVENIENTE ANALIZAR, PRIMERO, LA SUPERPOSICIÓN DE DOS MOVIMIENTOS ARMÓNICOS SIMPLES DE IGUAL FRECUENCIA E IGUAL FASE (DIFERENCIA DE FASE CERO). SE PUEDE DEMOSTRAR GRÁFICA (FIG. 4.8) Y ANALÍTICAMENTE QUE, EN ESTE CASO, OBTENEMOS DE NUEVO UN MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE DE LA MISMA FRECUENCIA Y DE LA MISMA FASE, PERO CON UNA AMPLITUD QUE ES LA SUMA DE LAS AMPLITUDES DE LAS DOS VIBRACIONES COMPONENTES. SI LAS DOS OSCILACIONES COMPONENTES DE FRECUENCIA DADA TIENEN FASES DIFERENTES, SU SUPERPOSICIÓN TAMBIÉN VA A SER UN MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE DE LA MISMA FRECUENCIA PERO SU AMPLITUD NO VA A SER LA SUMA DE LAS AMPLITUDES COMPONENTES. EN PARTICULAR, SI LAS AMPLITUDES DE LAS VIBRACIONES COMPONENTES SON IGUALES Y SI SU DIFERENCIA DE FASE ϕ ES DE 180° , LAS OSCILACIONES SE ANULAN ENTRE SÍ Y NO SE OÍRA NINGUN SONIDO. ESTE FENÓMENO SE LLAMA INTERFERENCIA DESTRUCTIVA Y JUEGA UN PAPEL IMPORTANTE, POR EJEMPLO, EN EL DISEÑO ACÚSTICO DE



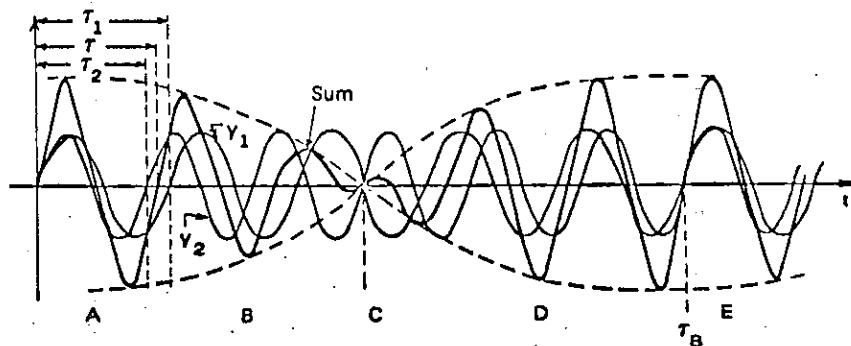
Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 4.8

UN SALON.

EL SIGUIENTE CASO CONSISTE EN CONSIDERAR DOS TONOS SIMPLES DE LA MISMA AMPLITUD PERO CON FRECUENCIAS f_1 Y f_2 , LIGERAMENTE DISTINTAS. AL CONSIDERAR LA DIFERENCIA DE FRECUENCIAS Δf , QUE ES MUY PEQUEÑA, PODEMOS EXPRESAR $f_2 = f_1 + \Delta f$. EL PATRON DE VIBRACION DEL TIMPANO VIENE DADO POR LA SUMA DE LOS PATRONES DE CADA TONO COMPONENTE. (FIG. 4.9) EL RESULTADO DE LA SUPERPOSICION (LA CURVA MAS OSCURA) ES UNA OSCILACION DE PERIODO Y FRECUENCIA INTERMEDIOS ENTRE f_1 Y f_2 , Y DE AMPLITUD QUE SE MODULA LENTAMENTE. LA TRASLACION CONTINUA Y LENTA DE FASE ES RESPONSABLE DE LA AMPLITUD CAMBIANTE DE LA OSCILACION RESULTANTE; LAS CURVAS DISCONTINUAS DE LA FIG. 4.9 REPRESENTAN LAS ENVOLVENTES DE LA AMPLITUD DE LA VIBRACION RESULTANTE.

AL ESTUDIAR LA SENSACION DEL TONO RESULTANTE OBSERVAMOS QUE EL TIMPANO TIENE UN SOLC PATRON DE VIBRACION DE AMPLITUD VARIABLE. UN FENOMENO MUY INTERESANTE OCURRE EN EL FLUIDO COCLEAR: EN LA VENTANA OVAL, EL PATRON DE VIBRACION UN POCO COMPLICADO QUE HA SIDO MENCIONADO, DA ORIGEN A DOS REGIONES DE RESONANCIA EN LA MEMBRANA BASILAR. SI LA DIFERENCIA DE FRECUENCIAS Δf ENTRE LOS DOS TONOS COMPONENTES ES SUFICIENTEMENTE GRANDE, LAS DOS REGIONES DE RESONANCIA CORRESPONDIENTES ESTAN SUFICIENTEMENTE SEPARADAS ENTRE SI. CADA UNA OSCILA CON UNA FRECUENCIA CORRESPONDIENTE A LA DEL TONO COMPONENTE (LAS DOS CURVAS DELGADAS DE LA FIG. 4.9), Y EL SUJEJO OYE DOS TONOS SEPARADOS DE VOLUMEN CONSTANTE, CON GRADOS DE ALTURA CORRESPONDIENTES A LOS DE LOS TONOS ORIGINALES. ESTA PROPIEDAD DE LA COCLEA SE LLAMA DISCRIMINACION DE FRECUENCIAS. POR OTRO LADO, SI LA DIFERENCIA DE FRECUENCIAS Δf ES MENOR QUE CIERTA CANTIDAD FIJA, LAS REGIONES DE RESONANCIA SE TRASLAPAN, Y EL SUJEJO OYE UN SOLO TONO DE GRADO DE ALTURA INTERMEDIO CON VOLUMEN MODULADO. ESTO ULTIMO ES CONSECUENCIA DE LA MODULACION DE LA AMPLITUD DEL PATRON DE VIBRACION (LA ENVOLVENTE MOSTRADA EN LA FIG. 4.9). ESTE FENOMENO SE LLAMA COMPAS DE PRIMER ORDEN, Y CORRESPONDE AL COMPAS ORDINARIO QUE CUALQUIER MUSICO CONCEBIE.



Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 4.9

LA FRECUENCIA DEL PATRÓN DE VIBRACION RESULTANTE A PARTIR DE DOS TONOS DE FRECUENCIAS f_1 Y f_2 MUY SIMILARES ES IGUAL AL VALOR PROMEDIO:

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{f_1 + f_2 + \Delta f}{2} = \frac{2f_1}{2} + \frac{\Delta f}{2} = f_1 + \frac{\Delta f}{2}$$

EL INTERVALO DE TIEMPO T_B (FIG. 4.9), DESPUES DEL CUAL LA AMPLITUD RESULTANTE ALCANZA SU VALOR INICIAL, ES LLAMADO EL PERIODO DEL COMPAS. LA FRECUENCIA DEL COMPAS $f_b = 1/T_B$ VIENE DADA POR LA DIFERENCIA

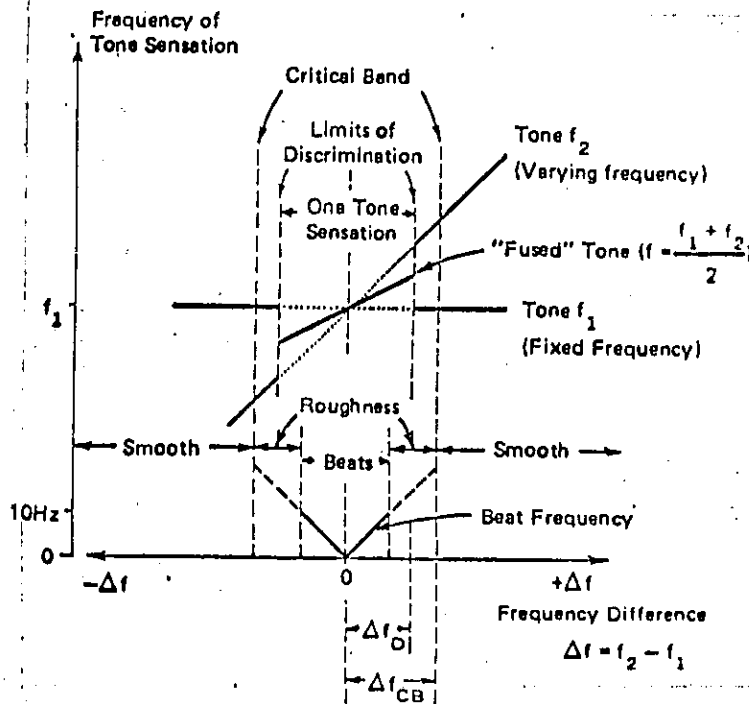
$$f_b = |f_2 - f_1| = |\Delta f|$$

ES INDIFERENTE SI f_2 ES MAYOR QUE f_1 , O VICEVERSA. ENTRE MAS CERCANAS ESTEN LAS FRECUENCIAS f_1 Y f_2 , MAS LENTOS RESULTARAN LOS COMPASES. SI f_2 SE HACE IGUAL A f_1 , LOS COMPASES DESAPARECEN COMPLETAMENTE: AMBOS TONOS COMPONENTES SUENAN AL UNISONO.

AL UNISONO SE OYE UN SOLO TONO DE GRADO DE ALTURA CORRESPONDIENTE A f_1 Y VOLUMEN QUE DEPENDE DE LA DIFERENCIA DE FASE PARTICULAR ENTRE LOS DOS TONOS SIMPLES. CUANDO LA FRECUENCIA f_2 ES AUMENTADA LIGERAMENTE, SE CONTINUA OYENDO UN SOLO TONO, PERO CON GRADO DE ALTURA LIGERAMENTE MAYOR, CORRESPONDIENDO CON LA FRECUENCIA PROMEDIO $f = f_1 + (\Delta f/2)$. EL VOLUMEN DE ESTE TONO TIENE COMPASES DE FRECUENCIA Δf . ESTOS COMPASES AUMENTAN EN FRECUENCIA A MEDIDA QUE f_2 SE ALEJA DE f_1 (Δf AUMENTA). MIENTRAS Δf SEA MENOR QUE APROXIMADAMENTE 10 Hz, ESTOS COMPASES SE PERCIBEN MUY CLARAMENTE. CUANDO LA DIFERENCIA DE FRECUENCIAS Δf EXCEDE LOS 15 HZ, LA SENSACION DE COMPAS DESAPARECE, DANDO LUGAR A CIERTA MOLESTIA CARACTERISTICA EN LA SENSACION RESULTANTE DE TONO. CUANDO Δf SOBREPASA EL LLAMADO LIMITE DE DISCRIMINACION DE FRECUENCIAS Δf_c (QUE NO DEBIERA SER CONFUNDIDO CON EL "CAN"),

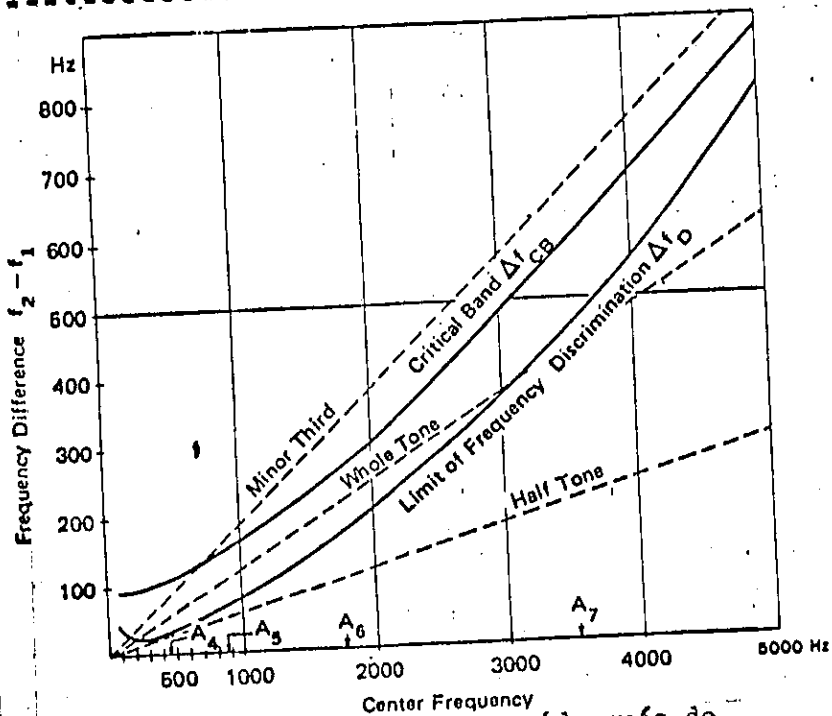
SUBITAMENTE DISTINGUIMOS DOS TONOS SEPARADOS, CON GRADOS DE ALTURA CORRESPONDIENTES A f_1 Y A f_2 . EN ESE MOMENTO, AMBAS REGIONES DE RESONANCIA SOBRE LA MEMBRANA BASILAR SE HAN SEPARADO ENTRE SI LO SUFICIENTE COMO PARA DAR DOS SEÑALES DE GRADOS DE ALTURA DISTINTOS. SIN EMBARGO, EN ESE LIMITE LA SENSACION DE MOLESTIA PERSISTE, ESPECIALMENTE EN EL RANGO DE BAJOS GRADOS DE ALTURA. SOLO DESPUES DE SOBREPASAR UNA DIFERENCIA DE FRECUENCIA AUN MAS GRANDE Δf_{CB} , LLAMADA LA BANDA CRITICA, DESAPARECE LA SENSACION DE FALTA DE ARMONIA, Y AMBOS TONOS PUROS SUENAN ARMONIOSOS Y AGRADABLES.

LA FIGURA 4.10 ES UN INTENTO (NO A ESCALA) DE DESCRIBIR LOS RESULTADOS MENCIONADOS DE MANERA COMPRESIBLE. LAS LINEAS GRESAS REPRESENTAN LAS FRECUENCIAS DE LOS TONOS (O COMPASES) QUE EN REALIDAD SE OYEN. EL TONO FUSIONADO CORRESPONDE A LA SENSACION DE TONO (DE FRECUENCIA INTERMEDIA) QUE ES PERCIBIDA MIENTRAS f_2 SE ENCUENTRE ENTRE LOS LIMITES DE DISCRIMINACION DE FRECUENCIAS ASOCIADOS A f_1 .



Representación esquemática de la frecuencia (líneas gruesas) correspondiente a las sensaciones de tono producidas por la superposición de dos tonos puros de frecuencias cercanas f_1 y $f_2 = f_1 + \Delta f$. Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 4.10



Ancho de banda crítica Δf_{CB} (después de Zwicker, Flottorp, y Stevens, 1957) y límite de discriminación de frecuencias Δf_D (Plomp, 1964) como una función de la frecuencia central de un estímulo bitonal (escalas lineales). La diferencia de frecuencias correspondiente a tres intervalos musicales se muestra para comparación. Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 4.11

EL LIMITE PARA LA DISCRIMINACION DE GRADOS DE ALTURA Y LA BANDA CRITICA DEPENDEN FUERTEMENTE DE LA FRECUENCIA PROMEDIO $(f_1 + f_2)/2$ DE DOS TONOS (LLAMADA "FRECUENCIA CENTRAL" DEL ESTIMULO BI-TONAL). LA FIGURA 4.11 MUESTRA LA DEPENDENCIA DE LA DISCRIMINACION DE GRADOS DE ALTURA Δf_D (PLOMP, 1964) Y LA BANDA CRITICA Δf_{CB} (ZWICKER, FLOTTORP Y STEVENS, 1957) SOBRE LA FRECUENCIA CENTRAL DE LOS TONOS COMPONENTES. COMO REFERENCIA, LAS DIFERENCIAS DE FRECUENCIAS QUE CORRESPONDEN A LOS INTERVALOS MUSICALES DE UN SEMITONO, UN TONO ENTERO Y UNA TERCIA MENOR SE MUESTRAN CON LAS LINEAS DISCONTINUAS. POR EJEMPLO, DOS TONOS EN LA VEJINIDAD DE LOS 2,000 HZ DEBEN ESTAR SEPARADOS POR LO MENOS 200 HZ PARA QUE PUEDAN SER DISCRIMINADOS, Y MAS DE 300 HZ PARA QUE SUENEN "ARMONIOSAMENTE".

AL COMPARAR LA FIGURA 4.11 CON LA FIGURA 4.7, SE NOTA QUE EL LIMITE PARA LA DISCRIMINACION DE FRECUENCIAS Δf_D ES APROXIMADAMENTE 30 VECES MAYOR QUE EL "DAN" PARA RESOLUCION DE FRECUENCIAS. EN OTRAS PALABRAS, ES POSIBLE DETECTAR CAMBIOS DE FRECUENCIA INFINITESIMALES DE UN SOLO TONO PURO, PERO ES NECESARIO

TENER UNA DIFERENCIA DE FRECUENCIAS APRECIABLE ENTRE DOS TONOS Puros SIMULTANEOS PARA PODER OIR CADA COMPONENTE AISLADAMENTE.

ESTOS RESULTADOS TIENEN CIERTAS IMPLICACIONES PARA LA TEORIA DEL OIDO. LA EXISTENCIA DE UN LIMITE FINITO PARA LA DISCRIMINACION DE TONOS ES UNA INDICACION DE QUE LA REGION ACTIVADA EN LA MEMBRANA BASILAR QUE CORRESPONDE A UN TONO PURO DEBE TENER UNA EXTENSION ESPACIAL FINITA. EL HECHO DE QUE LA SENSACION DE MOLESTIA PERSISTA AUN DESPUES DEL LIMITE DE DISCRIMINACION ES UNA INDICACION DE QUE LAS DOS REGIONES ACTIVADAS TODAVIA SE TRASLAPAN O INTERACTUAN EN CIERTA MEDIDA, POR LO MENOS HASTA QUE SE ALCANZA LA DIFERENCIA DE FRECUENCIAS DE LA BANDA CRITICA.

RESULTA INTERESANTE PREGUNTARSE LO SIGUIENTE: DADO QUE LA REGION ACTIVADA EN LA MEMBRANA BASILAR POR UN TONO PURO DE UNA FRECUENCIA ESTA DISTRIBUIDA ESPACIALMENTE, CUBRIENDO UN RANGO FINITO Δx A LO LARGO DE LA MEMBRANA, ¿CÓMO ES POSIBLE QUE SE OIGA UN SOLO GRADO DE ALTURA EN VEZ DE UNA SERIE COMPLETA DE GRADOS DE ALTURA QUE CORRESPONDERIAN A LAS DIVERSAS POSICIONES DENTRO DE Δx QUE HAN SIDO ACTIVADAS? BASICAMENTE LO QUE SUCEDE ES QUE SE LLEVA A CABO UN PROCESO DE LO QUE PUEDE LLAMARSE BUSQUEDA DE PRECISION DESPUES DE QUE LAS SEÑALES DE LA REGION ESTIMULADA SOBRE LA MEMBRANA BASILAR ENTRAN EN LA RED NERVIOSA. EN ESTE PROCESO, LA ACTIVIDAD QUE RESULTA DE TODOS LOS PUNTOS DE LA REGION Δx ES ENFOCADA O ENCAUZADA HACIA UN NUMERO MAS LIMITADO DE NEURONAS, MIENTRAS QUE LAS DEMAS NEURONAS SON INHIBIDAS, LO CUAL ES UN PROCESO INHERENTE A LA FISIOLOGIA CEREBRAL.

LA IMPORTANCIA DE LA BANDA CRITICA CONSISTE EN QUE REPRESENTA UN TIPO DE UNIDAD DE RECOLECCION E INTEGRACION DE INFORMACION SOBRE LA MEMBRANA BASILAR. EL HECHO EXPERIMENTAL DE QUE LA EXTENSION DE LA FRECUENCIA DE LA BANDA CRITICA Δf_{cb} ES CASI INDEPENDIENTE DE LA AMPLITUD O VOLUMEN DEL SONIDO, ES UNA FUERTE INDICACION DE QUE ESTA DEBE ESTAR RELACIONADA CON ALGUNA PROPIEDAD INHERENTE A LA ESTRUCTURA DEL ORGANISMO SENSORIAL SOBRE LA MEMBRANA BASILAR, EN VEZ DE ESTARLO CON UNA ONDA EN EL FLUIDO COCLEAR.

LA DIFERENCIA ENTRE LAS SENSACIONES PROVOCADAS POR UNA EXTENSION DE FRECUENCIAS DENTRO DE LA BANDA CRITICA Y FUERA DE ELLA JUEGA UN PAPEL IMPORTANTE EN LA PERCEPCION DE LA CALIDAD DEL TONO. ES LA BASE DE LO QUE CONSTITUYE UNA TEORIA DE CONSONANCIA Y DISONANCIA DE INTERVALOS MUSICALES.

4.5 OTROS EFECTOS DE PRIMER ORDEN: TONOS DE COMBINACIONES Y TONOS AUDITIVOS.

AL CONSIDERAR DOS TONOS DE FRECUENCIAS f_1 Y f_2 , SE OBTIENEN RESULTADOS INTERESANTES AL INCREMENTAR f_2 MAS ALLA DE LA BANDA CRITICA, MIENTRAS SE MANTIENE f_1 CONSTANTE. ESTOS RESULTADOS SE

SEPARAN EN DOS CATEGORIAS DEPENDIENDO DEL SITIO DONDE SE ORIGINEN. LOS TONOS DE COMBINACIONES SE ORIGINAN EN EL OIDO, EN VEZ DE HACERLO EN EL SISTEMA NERVIOSO. LOS TONOS MENCIONADOS APARECEN, (BAJO LA FORMA DE DOS SENSACIONES DE GRADOS DE ALTURA), CUANDO DOS TONOS PUROS DE FRECUENCIAS f_1 Y f_2 SUENAN SIMULTANEAMENTE. SON PERCIBIDOS MEJOR SI LAS FRECUENCIAS SON DE ALTA INTENSIDAD. LOS DOS TONOS NUEVOS NO ESTAN PRESENTES EN EL ESTIMULO SONORO ORIGINAL Y CORRESPONDEN A DOS FRECUENCIAS TAMBIEN NUEVAS.

EL TONO DE COMBINACION MAS FACILMENTE IDENTIFICABLE ES EL QUE OCURRE A UN NIVEL ALTO DE INTENSIDAD Y CUYA FRECUENCIA VIENE DADA POR LA DIFERENCIA ENTRE LAS FRECUENCIAS COMPONENTES:

$$f_{c_1} = f_2 - f_1$$

SE LE LLAMA EL TONO DE DIFERENCIA. f_{c_1} DEBE SER POR LO MENOS DE 20 A 30 HZ PARA QUE PUEDA SER ESCUCHADO Y AUMENTA A MEDIDA QUE f_2 AUMENTA. PARA VALORES DE f_2 CERCANOS A f_1 , f_{c_1} SE REDUCE A LA FRECUENCIA DEL COMPAS f_0 .

EXISTEN OTROS DOS TONOS DE COMBINACIONES QUE SON IDENTIFICABLES AUN CUANDO LAS FRECUENCIAS ORIGINALES TIENEN UN NIVEL BAJO DE INTENSIDAD (PLUMP, 1965). ESTOS CORRESPONDEN A LAS FRECUENCIAS:

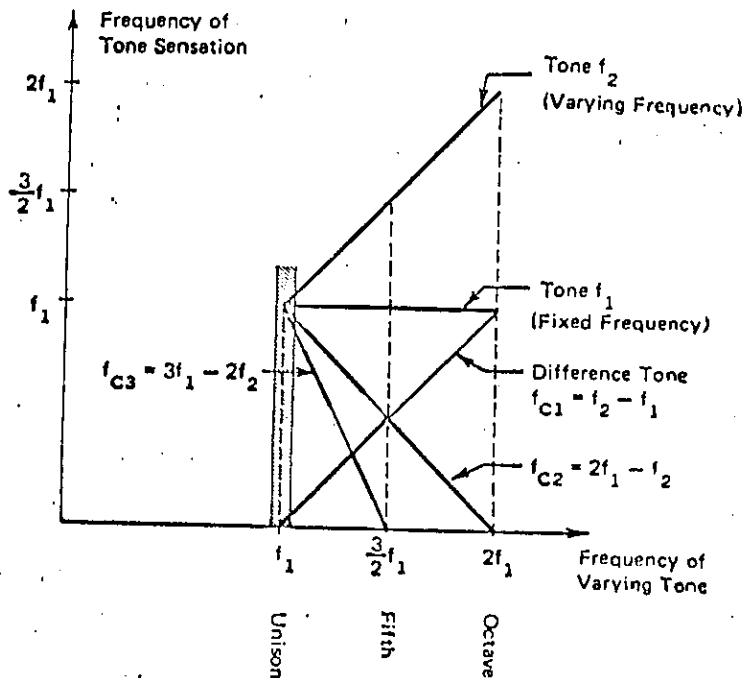
$$f_{c_2} = 2f_1 - f_2$$

$$\text{Y } f_{c_3} = 3f_1 - 2f_2$$

AMBOS TONOS DECRECEN EN GRADO DE ALTURA A MEDIDA QUE f_2 DECRECE DE UNISONO A QUINTA. EN LA FIGURA 4.12 SE MUESTRA LAS SENSACIONES DE TONOS DE PRIMER ORDEN PROVOCADAS POR LA SUPERPOSICION DE DOS TONOS PUROS DE FRECUENCIAS f_1 Y f_2 . ES INTERESANTE NOTAR QUE LA FIGURA 4.10 ES LA PARTE SOMBRREADA DE LA FIGURA 4.12, ES DECIR, CUANDO f_2 ESTA MUY CERCANA A f_1 . LAS LINEAS MAS GRUESAS CORRESPONDEN A LAS PARTES DE LOS TONOS QUE SON MAS FACILES DE OIR.

ESTAS NUEVAS SENSACIONES DE TONOS NO ESTAN PRESENTES EN LA VIBRACION SONORA ORIGINAL NI EN LA ENTRADA DE LA COCLEA, PERO SE HAN ENCONTRADO REGIONES ACTIVADAS EN LA MEMBRANA BASILAR EN POSICIONES QUE CORRESPONDEN A LAS FRECUENCIAS DE ESTOS TONOS. SE CREE QUE ESTOS ULTIMOS SON CAUSADOS POR UNA DISTORSION NO-LINEAL DEL ESTIMULO ONDULATORIO PRIMARIO EN LA COCLEA, PERO NO SE HA LOGRADO UNA EXPLICACION MATEMATICA QUE SE ADECUÉ A TODOS LOS DETALLES DEL FENOMENO.

ES INTERESANTE NOTAR QUE UN SOLO TONO DE FRECUENCIA f_1 TAMBIEN DA ORIGEN A SENSACIONES ADICIONALES DE GRADO DE ALTURA CUANDO EL TONO ES MUY FUERTE. ESTOS TONOS ADICIONALES, LLAMADOS TONOS AUDITIVOS, CORRESPONDEN A FRECUENCIAS QUE SON MULTIPLOS ENTEROS DE LA FRECUENCIA ORIGINAL: $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$, ETC.



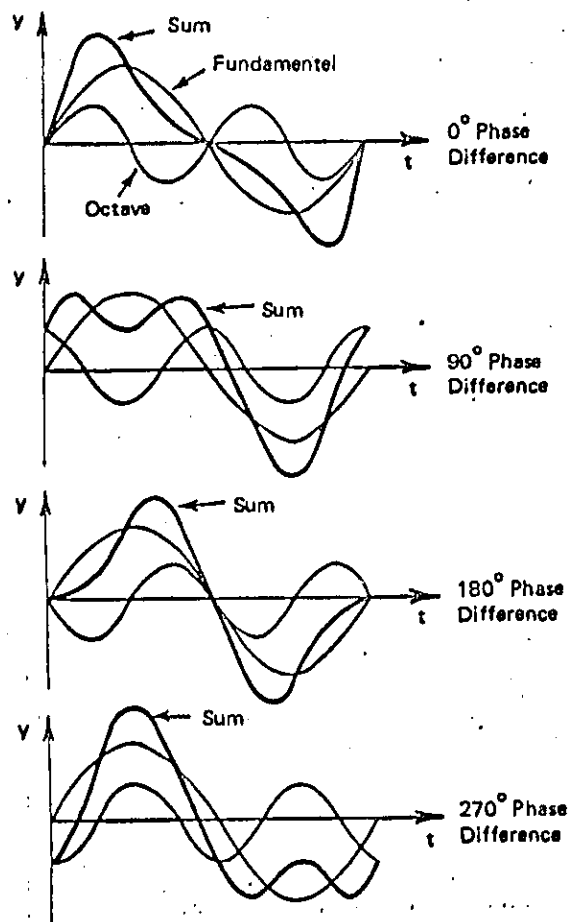
Frecuencias de los tonos de combinación f_{c1} , f_{c2} , f_{c3} , producidos por una superposición bitonal (f_1 , f_2). Líneas gruesas: rangos de tonos de combinación más fácilmente detectados.

Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 4.12

4.6 EFECTOS DE SEGUNDO ORDEN: COMPASES DE CONSONANCIAS FUERA DE TONO

DE NUEVO SE CONSIDERA UN EXPERIMENTO SIMILAR AL DE LA SECCION ANTERIOR. SE PRODUCEN DOS TONOS POCOS YA UN NIVEL BAJO DE INTENSIDAD: UNO CON FRECUENCIA CONSTANTE f_1 Y EL OTRO CON FRECUENCIA VARIABLE f_2 . AMBOS TIENEN AMPLITUDES CONSTANTES. AL INCREMENTAR f_2 GRADUALMENTE, SE NOTA ALGO PECULIAR AL PASAR POR UNA VEJINIDAD PEQUEÑA DE LA OCTAVA $f_2 = 2f_1$. ES UNA SENSACION CLARA DE UN COMPAS, DISTINTA DE LOS COMPASES DE PRIMER ORDEN QUE SE OYEN CERCA DEL UNISONO. CUANDO f_2 SE VUELVE EXACTAMENTE IGUAL A $2f_1$, LA SENSACION DESAPARECE. SE HA ENCONTRADO QUE LA SENSACION SE DA SIEMPRE QUE $f_2 = 2f_1 + \epsilon$ DONDE $\epsilon > 0$ REPRESENTA UNA PEQUEÑA CANTIDAD DE CICLOS/SEG. ESTOS SON LOS COMPASES DE SEGUNDO ORDEN, LLAMADOS COMPASES SUBJETIVOS.

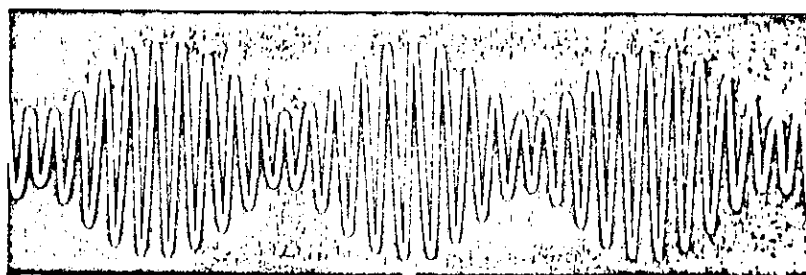


Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

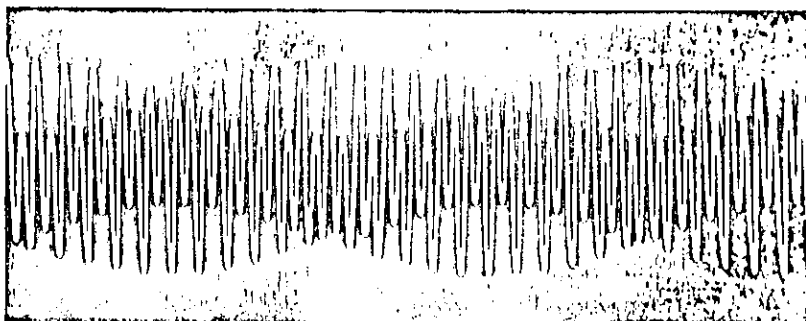
FIGURA 4.13

AL OBSERVAR EL PATRÓN DE VIBRACION EN EL OSCILOSCOPIC AL MISMO TIEMPO QUE SE ESTAN CYENDO LOS COMPASES DE SEGUNDO ORDEN, SE NOTIA QUE EL PATRÓN CAMBIA EN SINCRONIA EXACTA CON LAS SENSACIONES DE LOS COMPASES. LA FIGURA 4.13 MUESTRA VARIOS PATRONES DE VIBRACION CORRESPONDIENTES A LA SUPERPOSICION DE UN TONO FUNDAMENTAL DE FRECUENCIA f_1 Y SU OCTAVA $f_2 = 2f_1$ (DE MENOR AMPLITUD), PARA CUATRO VALORES DISTINTOS DE DIFERENCIA DE FASE. MIENTRAS LA OCTAVA ESIE PERFECTAMENTE SINCRONIZADA, ESTO ES QUE LA DIFERENCIA DE FASE PERMANEZCA CONSTANTE, LA IMAGEN EN EL OSCILOSCOPIC ES ESTATICA Y LAS CUATRO SUPERPOSICIONES SUENAN IGUAL. CUANDO ESTA SE CONVIERTE EN $f_2 = 2f_1 + \epsilon$, LA RELACION DE FASE CAMBIA CONTINUAMENTE EN EL TIEMPO Y EL PATRÓN PASA DE UNA DE LAS GRAFICAS DE LA FIGURA 4.13 A LA SIGUIENTE.

ES IMPORTANTE NOTAR QUE, EN UN COMPAS DE SEGUNDO ORDEN, NO SE VE CAMBIO CICLICO DE AMPLITUD DEL PATRÓN DE VIBRACION QUE OCURRE EN UN COMPAS DE PRIMER ORDEN. LA FIGURA 4.14 MUESTRA LOS



A



B

Comparación de compases de primer y segundo ordenes. (A) compases de primer orden (unisono desentonado); modulación de la amplitud sin cambio en la forma del patrón de vibración. (B) compases de segundo orden (octava desentonada); modulación del patrón sin cambio en la

amplitud total. Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 4.14

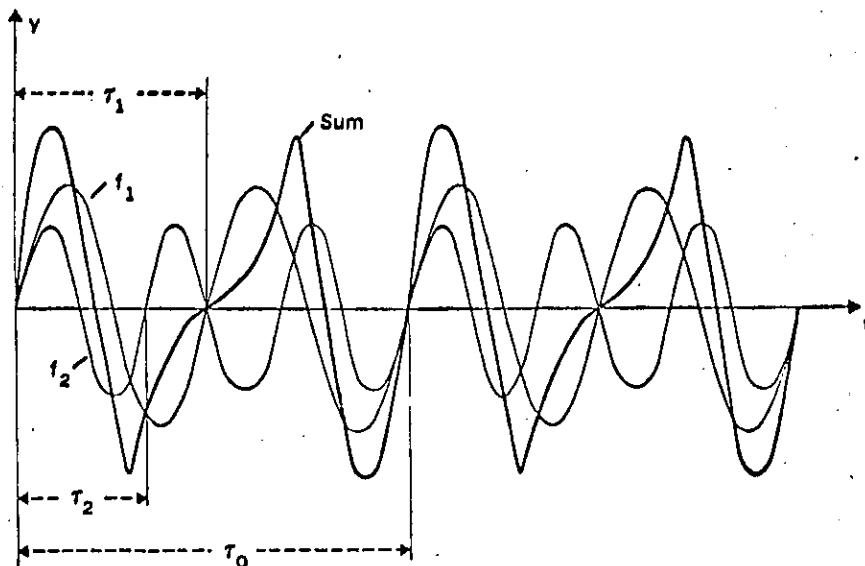
DIAGRAMAS DE UN OSCILSCOPIO: EL PRIMERO CORRESPONDE A COMPASES DE PRIMER ORDEN CERCA DEL UNISONO Y EL SEGUNDO CORRESPONDE A COMPASES DE SEGUNDO ORDEN DE UNA OCTAVA FUERA DE TONO. SE PUEDE OBSERVAR LA MODULACION DE LA AMPLITUD EN EL PRIMERO Y LA MODULACION DEL PATRON DE VIBRACION EN EL SEGUNDO.

SE HAN ENCONTRADO OTRAS PAREJAS DE VALORES f_1 Y f_2 EN CUYAS VECINDADES SE REPITE EL FENOMENO DE LOS COMPASES DE SEGUNDO ORDEN. DOS DE ELLAS OCURREN CUANDO $f_2 = (3/2)f_1$ Y CUANDO $f_2 = (4/3)f_1$. EN ESTOS DOS PUNTOS, LOS COMPASES DE SEGUNDO ORDEN SON MAS RAPIDOS QUE EN LA OCTAVA, $f_2 = 2f_1$, Y LOS PATRONES DE VIBRACION SE ALEJAN MAS DEL MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE. POR ESTAS RAZONES, AL SISTEMA AUDITIVO LE ES MAS DIFICIL DETECTAR ESTOS COMPASES QUE LOS CORRESPONDIENTES A LA OCTAVA.

4.7 MASTREO FUNDAMENTAL

EN ESTA SECCION SE INTRODUCE OTRA SERIE DE EXPERIMENTOS PSICOACUSTICOS QUE HAN SIDO DE CRUCIAL IMPORTANCIA EN EL DESAROLLO DE VARIAS TEORIAS DE PERCEPCION AUDITIVA.

CONSIDERENSE DOS TONOS Puros, SEPARADOS POR UNA QUINTA, CON FRECUENCIAS f_1 Y $f_2 = (3/2)f_1$. LA FIGURA 4.15 MUESTRA LA VIBRACION RESULTANTE (O SUMA) PARA UNA RELACION PARTICULAR DE FASES. LA FORMA DEL PATRON SE REPITE DESPUES DE UN TIEMPO τ_0 , QUE ES EL DOBLE DE τ_1 , EL PERIODO DEL TONO DE GRADO DE ALTURA INFERIOR. ESTO SIGNIFICA QUE LA RAZON DE REPETICION $f_0 = 1/\tau_0$ DEL PATRON DE VIBRACION DE UNA QUINTA ES LA MITAD DE LA FRECUENCIA DEL TONO INFERIOR: $f_0 = 1/2 f_1$. LLAMAMOS A ESTA RAZON DE REPETICION, LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL PATRON DE VIBRACION. PARA DOS TONOS Puros QUE FORMEN UNA CUARTA ($f_2 = (4/3)f_1$) LA RAZON DE REPETICION ES $f_0 = (1/3)f_1$, Y PARA DOS TONOS QUE FORMEN UNA TERCIA, $f_0 = (1/4)f_1$. EL SISTEMA AUDITIVO ES SENSIBLE A ESTAS RAZONES DE REPETICION. ADEMAS, ESTAS ULTIMAS SON IDENTICAS A LOS TONOS DE DIFERENCIA CORRESPONDIENTES A LAS PAREJAS (f_1, f_2) CONSIDERADAS. SIN EMBARGO, PARA CIERTOS VALORES MUY BAJOS DE f_1 Y f_2 , LAS RAZONES DE REPETICION AUN PUEDEN SER DETECTADAS MIENTRAS QUE LOS TONOS COMBINATORIOS YA NO. POR LO TANTO, SE PUEDE AFIRMAR QUE AMBOS CONCEPTOS NO COINCIDEN.



Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 4.15

SE PUEDE DEMOSTRAR MATEMATICAMENTE QUE EL CICLO DE CAMBIO EN EL PATRON DE VIBRACION SE REPITE CON FRECUENCIA 2. ENTONCES ES POSIBLE AFIRMAR QUE LOS MULTIPLOS ENTEROS DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL SON LLAMADOS "SUBTONOS ALTOS" DE f_0 . SI TODOS ELLOS SUENAN SIMULTANEAMENTE, SE PRODUCE UNA SENSACION SUBJETIVA DE GRADO DE ALTURA QUE CORRESPONDE A f_0 , AUNQUE f_0 ESTE COMPLETAMENTE AUSENTE EN EL ESTIMULO MULTITONAL. ES POR ESTO QUE f_0 SE DENOMINA TAMBIEN FRECUENCIA AUSENTE, Y LA PERCEPCION DE ESTA RAZON DE REPETICION ES EL RASTREO FUNDAMENTAL. ES INTERESANTE NOTAR DE NUEVO LA PROPIEDAD ESPECIAL DE ESTE CONJUNTO DE TONOS Puros DE FRECUENCIAS $2f_0, 3f_0, 4f_0, \dots, nf_0, \dots$ ENTRE LA INFINITA VARIEDAD DE SUPERPOSICIONES POSIBLES, ESTA ES LA UNICA CUYOS COMPONENTES, AGRUPADOS EN PAREJAS DE TONOS CONSECUTIVOS, DAN COMO RESULTADO UNA MISMA RAZON DE REPETICION. POR LO TANTO, SE JUSTIFICA QUE UN TONO PERIODICO CUALQUIERA, CON UN PATRON DE VIBRACION COMPLEJO PERO REPETITIVO (CON RAZON DE REPETICION f_0), SE PUEDA CONSIDERAR COMO UNA SUPERPOSICION DE TONOS Puros DE FRECUENCIAS nf_0 ($n \in \mathbb{N}$). YA QUE LOS TONOS MUSICALES "REALES" ESTAN COMPUESTOS DE UNA SUPERPOSICION DE TONOS Puros, EL RASTREO FUNDAMENTAL ES EL MECANISMO AUDITIVO QUE PERMITE ASIGNAR UNA UNICA SENSACION DE GRADO DE ALTURA AL TONO COMPLEJO DE UN INSTRUMENTO MUSICAL (PLOMP, 1967).

4.8 CODIGOS AUDITIVOS EN EL SISTEMA NERVIOSO PERIFERICO

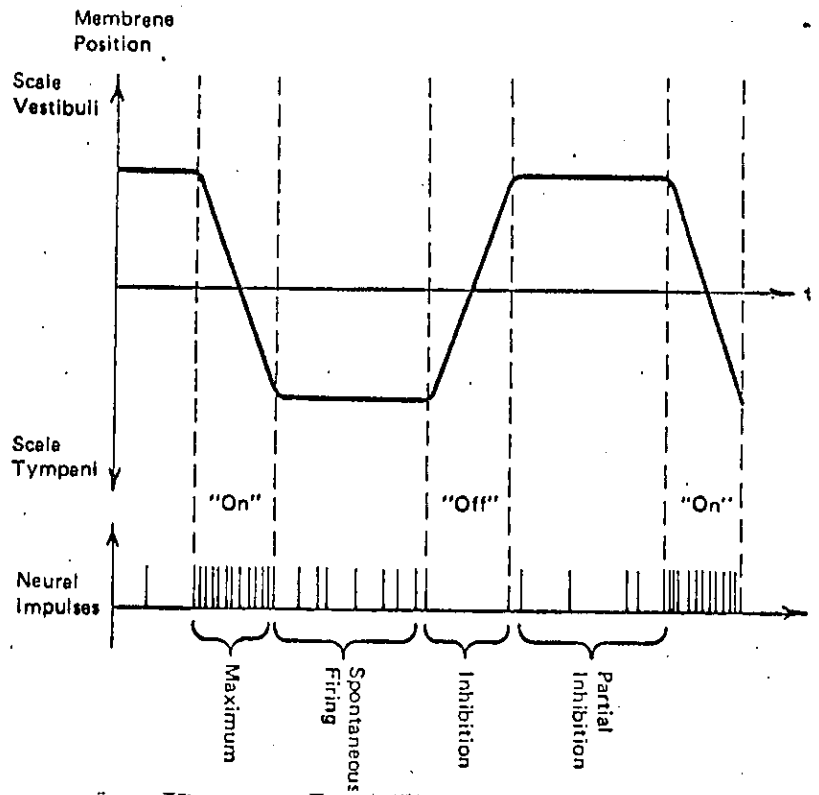
PARA ENTENDER LOS MECANISMOS QUE HAN SIDO PROPUESTOS EN LOS ULTIMOS AÑOS PARA EXPLICAR LOS FENOMENOS PSICOACUSTICOS MENCIONADOS, ES NECESARIO ANALIZAR PRIMERO ALGUNOS ASPECTOS OPERATIVOS DEL SISTEMA NERVIOSO AUDITIVO.

LA LOCALIZACION DE LAS UNIDADES RECEPTIVAS O CELULAS CAPILARES DE LA MEMBRANA BASILAR JUEGA UN PAPEL IMPORTANTE. ESTAS CELULAS SENSITIVAS ESTAN AGRUPADAS EN FILERAS INTERNAS Y EXTERNAS QUE SE EXTIENDEN DESDE LA BASE HASTA EL APEX. LAS TERMINACIONES NERVIOSAS QUE HACEN CONTACTO CON LAS CELULAS CAPILARES RECIBEN ORDENES DE ESTAS PARA DESENCADENAR IMPULSOS ELECTRICOS SIEMPRE QUE EL ESTIMULO MECANICO (DEFORMAMIENTO) DE LA CELULA SOBREPASE UN UMBRAL DADO. ESTAS TERMINACIONES ESTAN DISTRIBUIDAS DE UNA MANERA ESPECIAL. EN LAS FILERAS INTERNAS, UNA FIBRA NERVIOSA USUALMENTE TOCA SOLO DE 2 A 4 UNIDADES SENSITIVAS VECINAS, Y POR LO TANTO, RECIBE MENSAJES DE UNA REGION LIMITADA ESPACIALMENTE. EN LAS FILERAS EXTERNAS, UNA FIBRA NERVIOSA HACE CONTACTO CON UNIDADES SENSITIVAS QUE PUEDEN ESTAR SEPARADAS VARIOS MILIMETROS (DAVIS, 1962) Y, ASI, LOGRA RECOLECTAR INFORMACION SIMULTANEA DE UN MAYOR RANGO DE FRECUENCIAS. LAS CELULAS CAPILARES EXTERNAS PARECEN SER MAS SENSIBLES A UN ESTIMULO ACUSTICO DADO (UMBRAL MAS BAJO) QUE LAS INTERNAS. ADEMAS, LAS NEURONAS CONECTADAS A LAS CELULAS DE LAS FILERAS INTERNAS PARECEN RESPONDER FUNDAMENTALMENTE A LA VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR, MIENTRAS QUE LAS DE LAS EXTERNAS SON ESTIMULADAS POR EL DESPLAZAMIENTO (GALLUS ET

AL., 1972). TODO ESTO SUGIERE QUE LOS DOS GRUPOS DE CELULAS CAPILARES JUEGAN PAPELES MUY DISTINTOS EN LA DETECCION AUDITIVA. ES SIGNIFICATIVO EL HECHO DE QUE SOLO LOS MAMIFEROS SUPERIORES TENGAN DOS CLASES DE FILERAS DE CELULAS CAPILARES.

CUANDO UNA SEÑAL ACUSTICA DE UN SOLO TONO PERO DE FRECUENCIA DADA ALCANZA EL OIDO, LAS OSCILACIONES DE LA MEMBRANA BASILAR ESTIMULAN LAS CELULAS CAPILARES QUE ESTAN EN LA REGION DE RESONANCIA CORRESPONDIENTE A ESA FRECUENCIA. POR MEDIO DE LA IMPLANTACION DE MICROELECTRODOS EN FIBRAS NERVIOSAS COCLEARES ACTIVADAS ACUSTICAMENTE, SE HA ENCONTRADO QUE UNA FIBRA DADA TIENE EL UMbral DE DESCARGA MAS BAJO CUANDO LA FRECUENCIA f DEL TONO PROVOCA LA OSCILACION MAXIMA EN EL PUNTO X ACTIVADO POR LA FIBRA. LA RAZON MAXIMA DE DESCARGA ESTA ASOCIADA A LA VELOCIDAD MAXIMA DE LA MEMBRANA BASILAR CUANDO ESTA SE ESTA MOVIENDO HACIA LA SCALA TIMPANI (FIG. 4.5). LA RAZON SE INHIBE DURANTE EL MOVIMIENTO EN DIRECCION OPUESTA, HACIA LA SCALA VESTIBULI (FIG. 4.5). ADEMÁS LA POSICION INSTANTANEA DE LA MEMBRANA TIENE UN EFECTO EXCITADOR O INHIBIDOR MENOS PRONUNCIADO, DEPENDIENDO DE LA DISTORSION MOMENTANEA DE LA MEMBRANA HACIA UNA U OTRA DIRECCION. AMBOS EFECTOS SE UNEN PARA DETERMINAR UNA RESPUESTA COMPLETA. LA FIGURA 4.16 MUESTRA UNA DISTRIBUCION TEMPORAL HIPOTETICA DE LOS IMPULSOS PRODUCIDOS CUANDO UNA FIBRA NERVIOSA DEL OIDO INTERNO (CONECTADA A LA RESPECTIVA REGION DE RESONANCIA DE LA MEMBRANA) ES ACTIVADA POR UN TONO DE BAJA FRECUENCIA Y PATRON DE VIBRACION DE FORMA TRAPEZOIDAL.

UN EXAMEN CUIDADOSO DE LA FIGURA REVELA LA MANERA EN LA QUE LA INFORMACION SOBRE LA RAZON DE REPETICION PUEDE SER CODIFICADA EN FORMA DE TRENES DE IMPULSOS NERVIOSOS. LA FIGURA 4.16 CORRESPONDE A UN CASO IDEAL DE FRECUENCIA BAJA. EN UNA SITUACION REAL, LOS INTERVALOS "ON" Y "OFF" ESTAN DELINEADOS MAS DIFUSAMENTE POR SU CORTA DURACION Y POR LO FUERTE DE LA DISTRIBUCION DE LOS IMPULSOS. EL INTERVALO DE TIEMPO ENTRE IMPULSOS SUCESIVOS TIENDE A SER UN MULTIPLO ENTERO DEL PERIODO DE VIBRACION SONORA, T (KIANG ET.AL., 1965). CUANDO SE AGRUPAN VARIAS FIBRAS QUE RECIBEN ESTIMULO DE LA MISMA REGION ANGUSTA DE LA MEMBRANA, LA SUMA DE SUS IMPULSOS ESTA SINCRONIZADA CON EL ESTIMULO AUDITIVO. ESTAS SEÑALES NERVIOSAS COLECTIVAS Y SINCRONIZADAS RECIBEN EL NOMBRE DE DESCARGAS.



Según Roederer, J.G. Introduction to the
 Physics and Psychophysics of Music.
 Springer-Verlag.

FIGURA 4.16

CAPITULO 5 ONDAS DE SONIDO, ENERGIA ACUSTICA Y LA PERCEPCION DEL VOLUMEN

EN ESTE CAPITULO SE DISCUTIRA EL PROCESO DE LA PROPAGACION DE LA ENERGIA SONORA EMITIDA DESDE UNA FUENTE LEJANA AL OYENTE Y SE ANALIZARA COMO ESTE FLUJO DE ENERGIA ACUSTICA DETERMINA LA SENSACION DE VOLUMEN.

5.1 ONDAS ELASTICAS, FUERZA, ENERGIA Y POTENCIA.

CUANDO EL SONIDO SE PROPAGA A TRAVES DE UN MEDIO ELASTICO LOS PUNTOS DEL MEDIO VIBRAN. SI NO SE DA NINGUN SONIDO Y SI NO HAY NINGUNA OTRA CLASE DE PERTURBACION, CADA PUNTO DEL MEDIO ESTARA EN REPOSO Y PERMANECERA ASI HASTA QUE EL MEDIO SEA CAMBIADO. LA POSICION DE UN PUNTO DADO EN EL ESPACIO, CUANDO ESTE SE ENCUENTRA TOTALMENTE IMPERTURBADO, ES LA POSICION DE EQUILIBRIO DEL PUNTO.

LAS ONDAS SONORAS SON UNA FORMA ESPECIAL DE ONDAS ELASTICAS. CUANDO SE PRODUCE UNA DEFORMACION EN UN PUNTO DADO DE UN MEDIO ELASTICO, LAS FUERZAS ELASTICAS HACEN QUE LOS PUNTOS CERCANOS A LA DEFORMACION SE EMPIECEN A MOVER. ESTOS PUNTOS EMPUJAN O ATRAEN A OTROS PUNTOS VECINOS A TRAVES DE ESTAS FUERZAS, TRANSMITIENDO LA ORDEN DE EMPEZAR A MOVERSE. ESTA REACCION EN CADENA REPRESENTA A UNA ONDA ELASTICA QUE SE PROPAGA EN DIRECCION DE LA REGION DE PERTURBACION INICIAL. EN ESTA ONDA NO HAY PROPAGACION DE MATERIA SINO DE ENERGIA: LA ENERGIA QUE SE NECESITA PARA PONER EN MOVIMIENTO CADA PUNTO ALCANZADO POR LA ONDA. LAS ONDAS SONORAS QUE INTERESAN EN SENTIDO MUSICAL SON AQUELLAS ONDAS ELASTICAS EN LAS CUALES LOS PUNTOS EJECUTAN MOVIMIENTOS PERIODICOS. AL MOVERSE, CADA PUNTO PERMANECE MUY CERCANO A LA POSICION DE EQUILIBRIO. UNA ONDA SONORA SE PROPAGA A VELOCIDAD BIEN DEFINIDA, ALEJANDOSE DE LA FUENTE EN LINEA RECTA HASTA QUE ES ABSORBIDA O REFLEJADA.

EN MUCHAS SITUACIONES FISICAS, UNA FUERZA DADA ES APLICADA DISTRIBUIDA SOBRE UNA SUPERFICIE ESPECIAL DEL CUERPO. POR EJEMPLO; EN UN AVION CON CABINA PRESURIZADA QUE VIAJA A GRANDES ALTURAS, EL AIRE DENTRO EJERCE UNA FUERZA CONSIDERABLE F , DIRIGIDA HACIA AFUERA, SOBRE CADA VENTANA, QUE ES PROPORCIONAL A LA SUPERFICIE S DE LA VENTANA. LA RELACION $p = F/S$ REPRESENTA LA PRESION DEL AIRE DENTRO DE LA CABINA. EN GENERAL, SE DEFINE LA PRESION DEL AIRE COMO LA RAZON ENTRE LA FUERZA QUE ACTUA SOBRE UNA SUPERFICIE S QUE SEPARA AL AIRE DEL VACIO Y EL AREA DE LA SUPERFICIE. SI, EN VEZ DEL VACIO, SE TIENE SIMPLEMENTE UNA PRESION p' SOBRE EL OTRO LADO DE LA SUPERFICIE, LA FUERZA F QUE ACTUA SOBRE S VIENE DADA POR LA ECUACION $F = (p - p') \cdot S$, DONDE F SE MIDE EN NEWTONS, LA PRESION EN NEWTONS/METRO CUADRADO Y LA SUPERFICIE

EN METROS CUADRADOS.

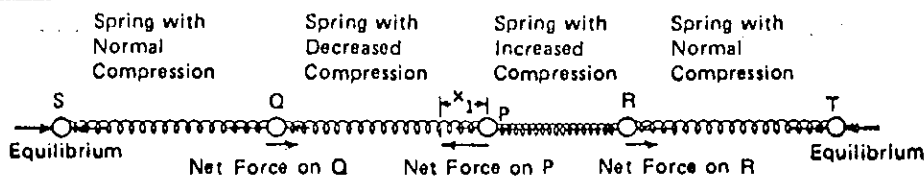
TODO ESTO JUEGA UN PAPEL MUY IMPORTANTE EN LA MUSICA. LAS ONDAS SONORAS QUE VIAJAN A TRAVES DEL AIRE SON OSCILACIONES DE LA PRESION DEL AIRE. EN LA RELACION $F = (p - p') \cdot S$, S CORRESPONDE A LA SUPERFICIE DEL TIMPANO, p' ES LA PRESION (CONSTANTE) EN EL OIDO MEDIO Y p ES LA PRESION OSCILANTE EN EL METAL. F ES LA FUERZA OSCILANTE QUE ACTUA SOBRE EL TIMPANO Y ES RESPONSABLE POR SU MOVIMIENTO Y EL DE LA CADENA OSEA DEL OIDO MEDIO.

LA CONSERVACION DE LA ENERGIA MECANICA ES OTRO FENOMENO FISICO MUSICALMENTE IMPORTANTE PUES EXPLICA EL MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE. EN ESTE SE DA UNA TRANSFORMACION CONSTANTE DE ENERGIA POTENCIAL A ENERGIA CINETICA Y VICEVERSA, SEGUN LA CUAL LA ENERGIA CINETICA ES MAXIMA Y LA POTENCIAL MINIMA EN LA POSICION DE EQUILIBRIO. LA ENERGIA MECANICA TOTAL PERMANECE CONSTANTE MIENTRAS NO ACTUEN FUERZAS DISIPATIVAS. LA FRICCION PRODUCE UNA DISMINUCION CONSTANTE DE LA ENERGIA TOTAL Y, POR LO TANTO, UN DECREMENTO EN LA AMPLITUD DE LA OSCILACION. EL MOVIMIENTO RESULTANTE ES LLAMADO OSCILACION AMORTIGUADA. ES EXTREMADAMENTE IMPORTANTE EN EL TERRENO DE LA MUSICA, PUES MUCHOS INSTRUMENTOS MUSICALES INVOLUCRAN OSCILACIONES AMORTIGUADAS (P.EJ., LA CUERDA VIBRANTE DE UN PIANO). OTRAS FUERZAS EXTERNAS PUEDEN ACTUAR EN CIERTAS OCASIONES PARA AUMENTAR GRADUALMENTE LA ENERGIA MECANICA DISMINUIDA. PUEDEN SER USADAS PARA COMPENSAR PERDIDAS DISIPATIVAS Y ASI MANTENER UNA OSCILACION CON UNA AMPLITUD CONSTANTE. UNA CUERDA DE VIOLIN TENSA ES UN EJEMPLO TIPICO: LAS FUERZAS QUE APARECEN EN EL MECANISMO DE TENSION PROVEEN DE ENERGIA A LA CUERDA VIBRANTE A UNA RAZON QUE ES IGUAL A LA RAZON DE PERDIDA DE ENERGIA A TRAVES DE FRICCION Y RADIACION ACUSTICA.

EL CONCEPTO DE POTENCIA ES, TAL VEZ, EL MAS IMPORTANTE EN LA FISICA DE LA MUSICA. EN REALIDAD EL OIDO NO ESTA INTERESADO EN ABSOLUTO EN LA ENERGIA ACUSTICA TOTAL QUE LLEGA AL TIMPANO, SINO QUE ES SENSITIVO A LA RAZON A LA CUAL LLEGA ESTA ENERGIA, I.E., LA POTENCIA ACUSTICA. ESTA RAZON ES LA QUE DETERMINA LA SENSACION DE VOLUMEN.

5.2 VELOCIDAD DE PROPAGACION, LONGITUD DE ONDA Y POTENCIA ACUSTICA.

PARA COMPRENDER MEJOR EL FENOMENO DE PROPAGACION DE ONDAS ES NECESARIO USAR UN MODELO DEL MEDIO DE PROPAGACION. ESTE ULTIMO CONSISTE EN IMAGINAR EL MEDIO COMO UNA SUBSTANCIA COMPUESTA DE PEQUEÑAS PARTICULAS DE MASA FIJA, CONECTADAS POR RESORTES COMPRIMIDOS (QUE REPRESENTAN LAS FUERZAS ELASTICAS). INICIALMENTE, LAS FUERZAS DE LOS RESORTES SE ENCUENTRAN EN EQUILIBRIO Y TODOS LOS PUNTOS ESTAN EN REPOSO. LA FIGURA 5.1 MUESTRA LA SITUACION EN LA QUE EL PUNTO P HA SIDO SUBITAMENTE DESPLAZADO UNA CANTIDAD x , HACIA LA DERECHA.



Modelo unidimensional de un medio elástico (resortes en compresión), en el cual el punto P ha sido desplazado longitudinalmente. Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and

Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 5.1

AL CONSIDERAR LAS FUERZAS DE LA FIGURA 5.1, SE OBSERVA QUE LOS PUNTOS Q Y R, QUE SE ENCUENTRAN AL PRINCIPIO EN REPOSO EN SUS POSICIONES DE EQUILIBRIO, SE VEN SOMETIDOS A UNA FUERZA RESULTANTE HACIA LA DERECHA. EN OTRAS PALABRAS, SON ACELERADOS HACIA LA DERECHA Y EMPIEZAN UN MOVIMIENTO EN LA MISMA DIRECCION EN LA QUE P FUE DESPLAZADO ORIGINALMENTE. EL PUNTO P, POR OTRO LADO, ESTA EN PROCESO DE REGRESAR A SU POSICION DE EQUILIBRIO, ACELERADO POR UNA FUERZA RESULTANTE HACIA LA IZQUIERDA QUE ACTUA SOBRE ÉL (FIG. 5.1). POCO TIEMPO DESPUES, CUANDO LOS PUNTOS Q Y R VAN HACIA LA DERECHA, LA COMPRESION DEL RESORTE ENTRE R Y T EMPIEZA A AUMENTAR, MIENTRAS QUE LA DEL RESORTE ENTRE Q Y S DISMINUYE. ES FACIL VER QUE LOS PUNTOS S Y T EMPIEZAN A ESTAR SOMETIDOS A UNA FUERZA NETA DIRIGIDA HACIA LA DERECHA, QUE LOS IMPULSA A MOVERSE EN ESTA DIRECCION, MIENTRAS QUE Q Y T YA ESTAN REGRESANDO AL LADO IZQUIERDO. ESTE PROCESO CONTINUA DE PUNTO A PUNTO, REPRESENTANDO UNA ONDA QUE SE PROPAGA A PARTIR DE P EN AMBAS DIRECCIONES. EL FRENTE DE LA ONDA NO ES MAS QUE UNA ORDEN QUE VA TRANSMITIENDOSE ENTRE LOS PUNTOS DICIENDOLES: MUEVANSE HACIA SU DERECHA. LA ORDEN VIENE DADA POR LOS RESORTES COMPRIMIDOS. NO HAY TRANSPORTE NETO DE MATERIA EN NINGUN MOMENTO. ESTA ES UNA ONDA LONGITUDINAL PUES LOS DESPLAZAMIENTOS DE LOS PUNTOS SON PARALELOS A LA DIRECCION DE PROPAGACION DE LA ONDA. EN EL CASO REAL DE UNA ONDA SONORA QUE SE PROPAGA A TRAVES DEL AIRE, LA ACCION CONJUNTA DE LAS FUERZAS DE LOS RESORTES SOBRE P, Q, R, ETC., CORRESPONDE APROXIMADAMENTE A LA PRESION DEL AIRE. LAS VARIACIONES DE ESTAS FUERZAS (I.E., LAS VARIACIONES DE LAS DISTANCIAS ENTRE PUNTOS) CORRESPONDEN A VARIACIONES EN LA PRESION DEL AIRE DE LA ONDA SONORA.

EL MODELO UNIDIMENSIONAL DE LA FIGURA 5.1 TAMBIEN MUESTRA COMO ESTA INVOLUCRADO EL TRANSPORTE DE ENERGIA EN UNA ONDA ELASTICA. EN PRIMER LUGAR, ES NECESARIO REALIZAR TRABAJO EXTERNAMENTE PARA PRODUCIR EL DESPLAZAMIENTO x_1 DEL PUNTO P PUES LAS LONGITUDES DE LOS DOS RESORTES PQ Y PR SE VEN MODIFICADAS. LA ENERGIA DADA INICIALMENTE A P ES TRANSFERIDA DE UN PUNTO A OTRO DEL MEDIO A

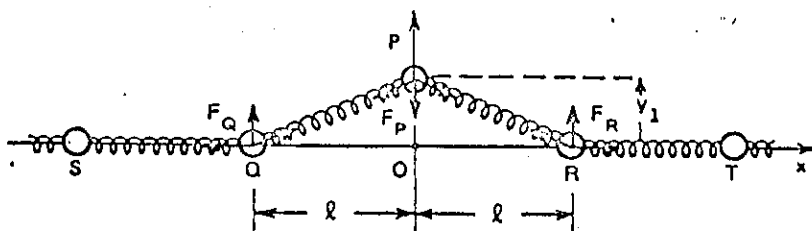
MEDIDA QUE LA ONDA SE PROPAGA; SE DA UN FLUJO O TRANSPORTE DE ENERGIA ALEJANDOSE DE LA FUENTE.

CONVIENE AHORA CONSIDERAR EL CASO EN EL QUE LOS RESORTES DEL MODELO ESTAN EN TENSION (O EXPANDIDOS) EN VEZ DE ESTAR COMPRIMIDOS Y LOS PUNTOS VECINOS SE ESTAN JALANDO UNOS A OTROS. FISICAMENTE, ESTA SITUACION CORRESPONDE A UNA CUERDA DE VIOLIN TENSA. PARA DESPLAZAMIENTOS LONGITUDINALES (EN LA DIRECCION DE LOS RESORTES), SE OBTIENE UNA DESCRIPCION CUALITATIVAMENTE SIMILAR A LA ANTERIOR PARA LA PROPAGACION DE UNA ONDA, EXCEPTO POR EL HECHO DE QUE TODAS LAS FUERZAS DE LA FIGURA 5.1 SE ENCUENTRAN AHORA INVERTIDAS. EN ESTE NUEVO CASO EXISTE UNA POSIBILIDAD ADICIONAL QUE NO SE DABA EN LOS RESORTES COMPRIMIDOS: EL PUNTO P PUEDE SER DESPLAZADO PERPENDICULARMENTE A LA DIRECCION X (FIG. 5.2), CON LO CUAL SE OBTIENE UN TIPO DIFERENTE DE ONDA. COMO TODAS LAS FUERZAS DE LOS RESORTES AHORA JALAN A LOS PUNTOS, DE ACUERDO CON LA FIGURA 5.2, LA FUERZA RESULTANTE F_p ACELERA A P HACIA EL PUNTO DE EQUILIBRIO O. LOS PUNTOS Q Y R, A SU VEZ, SON SOMETIDOS A FUERZAS ALTAS QUE LOS ACELERAN HACIA ARRIBA, EN UNA DIRECCION ESENCIALMENTE PERPENDICULAR A X. ESTOS MOVIMIENTOS REPRESENTAN UNA ONDA ELASTICA TRANSVERSAL. EN UNA ONDA DE ESTE TIPO, LOS DESPLAZAMIENTOS DE LOS PUNTOS SON PERPENDICULARES A LA DIRECCION DE PROPAGACION. EN UN MEDIO BAJO LA ACCION DE UNA TENSION, COMO LA CUERDA DE UN VIOLIN, PUEDEN OCURRIR DOS MODOS DE PROPAGACION SIMULTANEAMENTE: EL TRANSVERSAL Y EL LONGITUDINAL.

LA EXPRESION DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS TRANSVERSALES ADOPTA UNA FORMA SIMPLE. APLICANDO LA LEY DE NEWTON A LOS PUNTOS DEL MODELO UNIDIMENSIONAL DE LA FIGURA 5.2, SE PUEDE DEMOSTRAR QUE, PARA UNA CUERDA SOMETIDA A UNA TENSION, LA VELOCIDAD V_T DE UNA ONDA ELASTICA TRANSVERSAL VIENE DADA POR:

$$V_T = \sqrt{\frac{T}{d}} \quad (\text{M/SEG.})$$

DONDE d ES LA DENSIDAD LINEAL DEL MEDIO, I.E., LA MASA POR UNIDAD



Modelo unidimensional de un medio elástico (resortes en expansión), en el cual el punto P ha sido desplazado transversalmente. Según Roederer, J.G.

Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 5.2

DE LONGITUD (EN KG/M.). ES INTERESANTE NOTAR QUE ENTRE MAS TENSA ESTE LA CUERDA, MAS RAPIDAMENTE VIAJARAN LAS ONDAS TRANSVERSALES. POR OTRO LADO, ENTRE MAS DENSA, ESTAS SE PROPAGARAN MAS LENTAMENTE.

EXISTE UNA RELACION FISICAMENTE EQUIVALENTE PARA LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS LONGITUDINALES EN UN MEDIO DE DENSIDAD δ (EN KG/M³) DONDE LA PRESION ES P (EN NEWTONS/M²):

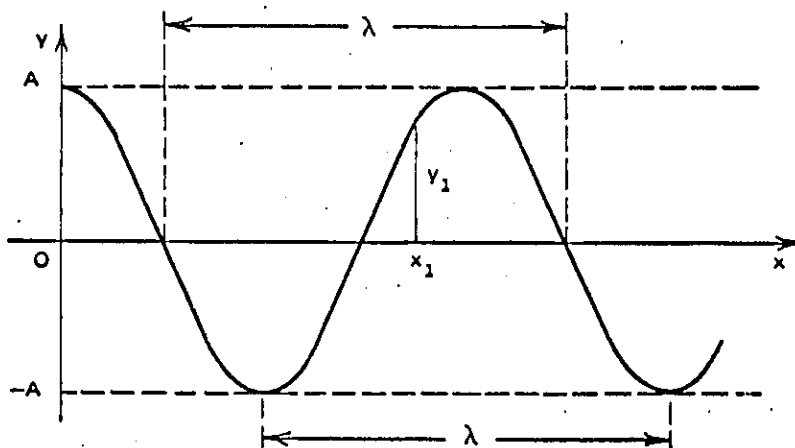
$$V_L = \sqrt{\frac{P}{\delta}} \quad (\text{M/SEG.})$$

(VER DEDUCCION EN APENDICE C.1)

SIN EMBARGO, PARA UN GAS IDEAL LA RAZON P/ δ RESULTA SER PROPORCIONAL A LA TEMPERATURA ABSOLUTA t_A , DEFINIDA EN TERMINOS DE LA TEMPERATURA EN GRADOS CENTIGRADOS t_c , COMO: $t_A = 273 + t_c$. AUNQUE EL AIRE QUE NOS RODEA NO ES EN REALIDAD UN GAS IDEAL, SE COMPORTA APROXIMADAMENTE COMO TAL, Y LA VELOCIDAD DE LAS ONDAS SONORAS SE PUEDE EXPRESAR: $V_L = 20.1 \sqrt{t_A}$ (M/SEG.). A 0°C, V_L ES 331.5 M/SEG. Y A 21°C, V_L ES 344 M/SEG. EL FACTOR NUMERICO EN LA EXPRESION ANTERIOR ES VALIDO SOLAMENTE PARA AIRE CORRIENTE. EN GENERAL, SU VALOR DEPENDE DE LA COMPOSICION DEL MEDIO A TRAVES DEL CUAL SE PROPAGA EL SONIDO. PARA HIDROGENO PURO, POR EJEMPLO, EL FACTOR ES 74.0. LAS ONDAS SONORAS VIAJAN CASI CUATRO VECES MAS RAPIDAMENTE EN HIDROGENO QUE EN AIRE. ESTO LLEVA A EFECTOS ACUSTICOS MUY ESPECIALES, SI UNA PERSONA HABLA O CANTA DESPUES DE HABER INHALADO HIDROGENO.

EL SONIDO VIAJA RAPIDAMENTE PERO NO A UNA VELOCIDAD INFINITAMENTE GRANDE. ESTO, POR UNA PARTE, LLEVA A PEQUEÑAS DIFERENCIAS OBSERVABLES EN EL TIEMPO DE LLEGADA DE LAS ONDAS SONORAS PROVENIENTES DE DISTINTOS INSTRUMENTOS EN UNA ORQUESTA GRANDE, LO CUAL PUEDE CAUSAR PROBLEMAS SERIOS EN LA SINCRONIZACION RITMICA. UN PIANISTA QUE TOCA POR PRIMERA VEZ UN ORGANICO MUY GRANDE, EN EL QUE LA CONSOLA ESTA MUY ALEJADA DE LOS TUBOS, PUEDE SENTIRSE BASTANTE CONFUNDIRDO POR LA FALTA DE SINCRONIZACION ENTRE EL MOVIMIENTO DE SUS DEDOS Y LA LLEGADA DEL SONIDO. LA REVERBERACION EN UN SALON SE BASA, TAMBIEN, EN LA SUPERPOSICION DE ONDAS SONORAS RETRASADAS QUE HAN SUFRIDO REFLECCIONES MULTIPLES EN LAS PAREDES DEL SALON.

CONSIDERESE AHORA UNA CUERDA MUY LARGA EN LA CUAL EL PUNTO INICIAL ES PUESTO EN VIBRACION CON MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE, Y CONTINUA VIBRANDO INDEFINICAMENTE A CAUSA DE UNA FUERZA EXTERNA. DESPUES DE UN MOMENTO, SE ENCUENTRA QUE TODOS LOS PUNTOS DE LA CUERDA VIBRAN CON EL MISMO MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE. SI EN UN INSTANTE DADO EL PUNTO INICIAL ALCANZA SU DESPLAZAMIENTO MAXIMO, LOS PUNTOS VECINOS A EL YA CASI LO ESTAN ALCANZANDO O ACABAN DE ESTAR ALLI. LA FIGURA 5.3 MUESTRA LOS DESPLAZAMIENTOS TRANSVERSALES DE TODOS LOS PUNTOS DE LA CUERDA EN UN MOMENTO DADO. ESTA CURVA ES UNA "FOTOGRAFIA" DE LA FORMA DE LA CUERDA DURANTE EL PASEO DE UNA ONDA SINUSOIDAL TRANSVERSAL. LA GRAFICA DE LA FIGURA 5.3 NO DEBERIA SER CONFUNDIRDO CON LA CURVA MOSTRADA EN LA FIGURA 4.3, QUE REPRESENTA LA HISTORIA (CAMBIO EN EL TIEMPO) DE UN SOLO PUNTO. ESTA ULTIMA DESCRIBE UN PATRON DE VIBRACION EN EL TIEMPO, MIENTRAS QUE LA PRIMERA EXHIBE UN PATRON DE VIBRACION EN EL



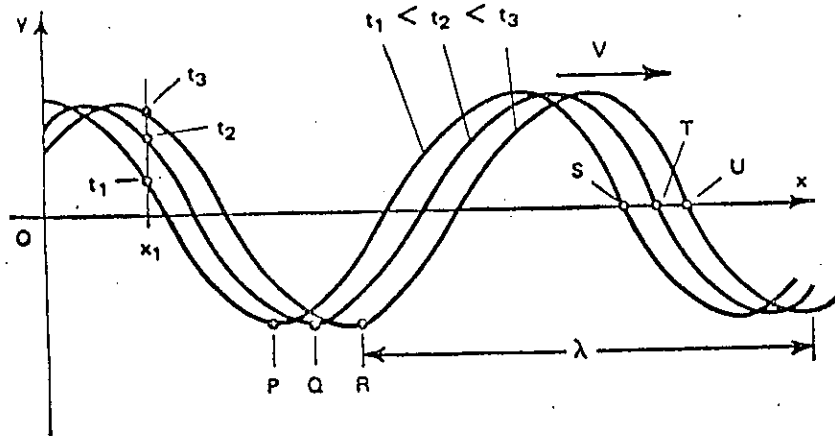
Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 5.3

ESPACIO. LA DISTANCIA MAS CORTA ENTRE CUALESQUIERA DOS PUNTOS DE LA CUERDA QUE VIBRAN DE MANERA PARALELA ("EN FASE", I.E., TIENEN DESPLAZAMIENTOS IDENTICOS Y EN CADA MOMENTO) SE LLAMA LONGITUD DE ONDA. GENERALMENTE SE LA DESIGNA POR λ . λ TAMBIEN PUEDE SER DEFINIDA COMO EL MINIMO INTERVALO ESPACIAL DESPUES DEL CUAL EL PATRON ESPACIAL DE LA ONDA SE REPITE. ES INTERESANTE COMPARAR ESTO CON LA DEFINICION DEL PERIODO, EL CUAL REPRESENTA EL MINIMO INTERVALO TEMPORAL DESPUES DEL CUAL SE REPITE EL PATRON DE VIBRACION DE UN PUNTO CADA. (FIG. 4.2B).

A MEDIDA QUE TRANSCURRE EL TIEMPO, LA CURVA FOTOGRAFICA PARECE MOVERSE (HACIA LA DERECHA) (FIG. 5.4) CON LA VELOCIDAD DE LA ONDA, PERO EN REALIDAD, CADA PUNTO DE LA CUERDA SOLO SE MUEVE HACIA ARRIBA Y HACIA ABAJO. LO QUE SE MUEVE A LA DERECHA ES LA CONFIGURACION, I.E., LA FORMA DE LA CUERDA, PERO NO LA CUERDA EN SI. EN OTRAS PALABRAS, LO QUE SE MUEVE A LA DERECHA ES UNA CUALIDAD: LA CUALIDAD DE ESTAR EN EL DESPLAZAMIENTO MAXIMO (PUNTOS P, Q Y R EN LA FIG. 5.4) O LA CUALIDAD DE ESTAR PASANDO POR EL PUNTO DE EQUILIBRIO (PUNTOS S, T Y U). Y, POR SUPUESTO, LA ENERGIA TAMBIEN SE TRANSPORTA HACIA LA DERECHA.

HAY UNA RELACION IMPORTANTE ENTRE LA VELOCIDAD v DE UNA ONDA SINUSOIDAL, SU LONGITUD DE ONDA λ , Y LA FRECUENCIA f DE LA OSCILACION DE LOS PUNTOS AISLADOS. CONSIDERANCO LA FIGURA 5.3, SE OBSERVA QUE LA ONDA SE VA A HABER MOVIDO EXACTAMENTE UNA λ DURANTE EL TIEMPO QUE LE TOMA AL PUNTO INICIAL (O A CUALQUIER OTRO) HACER UNA OSCILACION COMPLETA, I.E., DURANTE UN PERIODO T . POR LO TANTO, ES POSIBLE EXPRESAR LA VELOCIDAD DE LA ONDA DE LA SIGUIENTE MANERA:



Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 5.4

$$V = \frac{\text{DISTANCIA VIAJADA}}{\text{TIEMPO EMPLEADO}} = \frac{\lambda}{T}$$

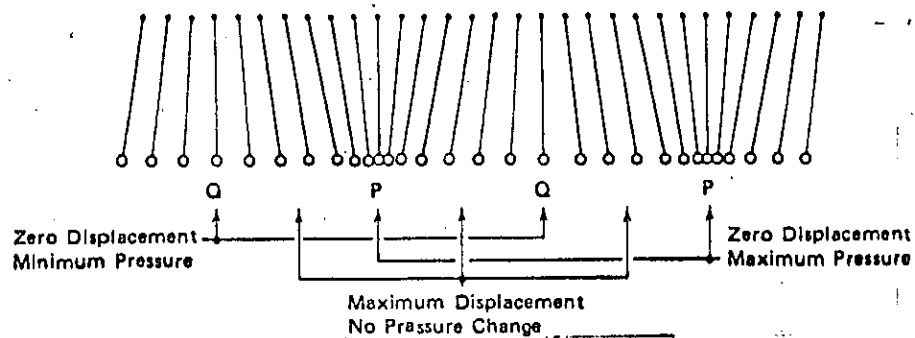
COMO LA INVERSA DEL PERIODO ES IGUAL A LA FRECUENCIA f , TAMBIEN SE PUEDE ESCRIBIR:

$$V = \lambda \cdot f$$

ESTA RELACION PROPORCIONA EL NEXO CUANTITATIVO ENTRE LA REPRESENTACION ESPACIAL DE LA FIGURA 5.3 Y LA REPRESENTACION ORIGINAL DE LA FIGURA 4.3. AHORA SE PUEDE EXPRESAR LA LONGITUD DE CADA DE UNA ONDA TRANSVERSAL EN UNA CUERDA EN TERMINOS DE LA FRECUENCIA DE LA OSCILACION DE LOS PUNTOS SOLOS Y LA VELOCIDAD DE PROPAGACION:

$$\lambda = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

EN EL CASO DE ONDAS LONGITUDINALES, TAL COMO UNA ONDA SONORA, LOS PUNTOS VIBRAN EN UNA DIRECCION PARALELA A LA DIRECCION DE PROPAGACION Y NO ES TAN FACIL DESCRIBIR SUS POSICIONES REALES DE MANERA VISUAL. POR ESTA RAZON, LAS ONDAS SONORAS SON REPRESENTADAS MAS CONVENIENTEMENTE COMO OSCILACIONES DE PRESION. LA FIGURA 5.5 MUESTRA LOS DESPLAZAMIENTOS DE LOS PUNTOS EN UN MODELO UNIDIMENSIONAL DEL MEDIO, EN EL MOMENTO EN EL QUE ESTÁ PASANDO UNA ONDA LONGITUDINAL. LOS PUNTOS MUESTRAN SU ACUMULACION MAXIMA (I.E., PRESION MAXIMA) Y RAREFACCION MAXIMA (I.E., PRESION MINIMA) EN LUGARES EN LOS QUE SU DESPLAZAMIENTO ES CERO (LOS PUNTOS P Y Q, RESPECTIVAMENTE). POR OTRO LADO, LAS VARIACIONES DE PRESION SON CERO EN LOS LUGARES EN LOS QUE LOS DESPLAZAMIENTOS SON MAXIMOS. ESTO SIGNIFICA QUE ENTRE LAS VARIACIONES DE PRESION DE UNA ONDA SONORA Y LA OSCILACION DE LOS PUNTOS HAY UNA DIFERENCIA

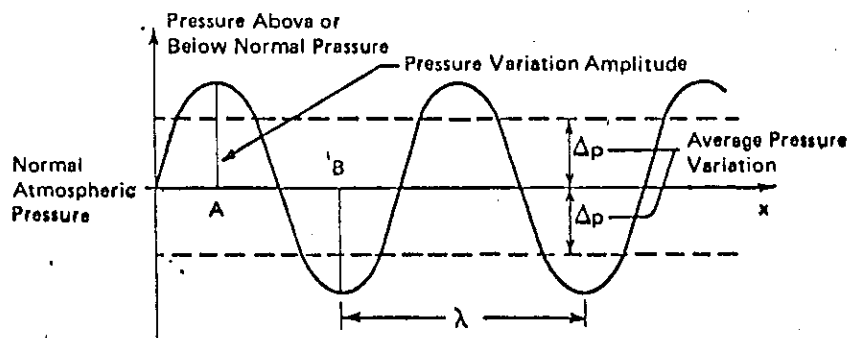


Onda longitudinal en un medio unidimensional. Para mostrar los desplazamientos reales cada punto es representado como el peso de un péndulo. Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 5.5

DE FASE DE 90° : LAS VARIACIONES MAXIMAS DE PRESION (AUMENTO O DISMINUCION) OCURREN EN LOS SITIOS DONDE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LOS PUNTOS SON CERO, MIENTRAS QUE LOS DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS DE LOS PUNTOS OCURREN DONDE LAS VARIACIONES DE PRESION SON CERO.

UNA ONDA SONORA SINUSOIDAL ES UNA EN LA CUAL LA PRESION EN CADA PUNTO OSCILA ARMONICAMENTE ALREDEDOR DEL VALOR NORMAL O NO-PERTURBADO (FIG. 5.6). EN CIERTO PUNTO A, TODOS LOS PUNTOS DEL MEDIO SE HABRAN ACERCADO ENTRE SI LO MAS QUE SE PUEDA (AUMENTO DE PRESION MAXIMA; PUNTOS P EN LA FIG. 5.5). EN CIERTO PUNTO B, LOS PUNTOS SE HABRAN SEPARADO ENTRE SI (DISMINUCION MAXIMA DE PRESION; PUNTOS Q EN LA FIG. 5.5). LA VARIACION PROMEDIO DE LA PRESION, Δp , ES IGUAL A LA AMPLITUD DE LA VARIACION DE PRESION DIVIDIDA



(Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.)

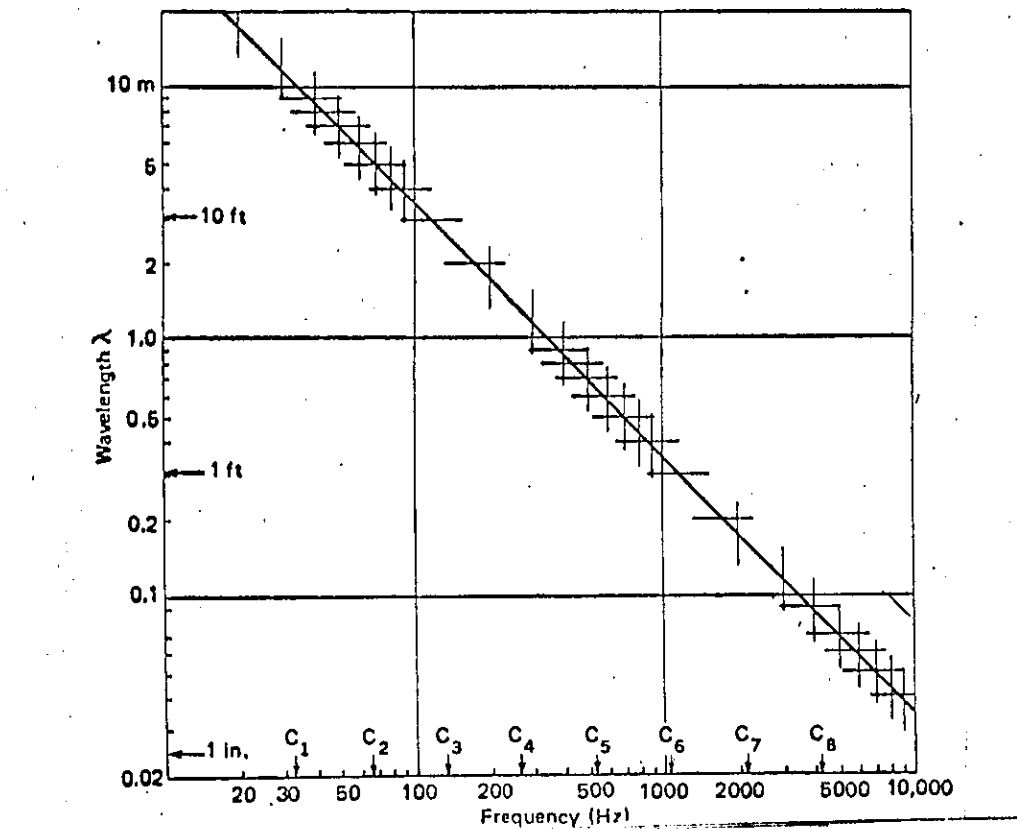
FIGURA 5.6

ENTRE $\sqrt{2}$. TOMANDO EN CUENTA LA RELACION $V_{\lambda} = 20.1\sqrt{t_A}$, SE OBTIENE LA LONGITUD DE ONDA DE ONDAS SONORAS SINUSOIDALES EN EL AIRE:

$$\lambda = \frac{20.1}{f} \sqrt{t_A} \quad (\text{EN METROS}).$$

LA FIGURA 5.7 MUESTRA VALORES TÍPICOS DE LONGITUDES DE ONDA A TEMPERATURA NORMAL.

LAS ONDAS ELÁSTICAS PUEDEN SER TRANSMITIDAS DE UN MEDIO A OTRO, POR EJEMPLO, DEL AIRE AL AGUA, DEL AIRE A UNA PARED Y DE ALLÍ AL AIRE DE NUEVO, DE UNA CUERDA A UNA PLACA DE MADERA Y DE ALLÍ AL AIRE CIRCUNDANTE. LA NATURALEZA DE LA ONDA PUEDE CAMBIAR EN CADA TRANSICIÓN (POR EJEMPLO, UNA ONDA TRANSVERSAL EN LA CUERDA Y EN LA PLACA, SE PUEDE CONVERTIR EN UNA ONDA SONORA LONGITUDINAL EN EL AIRE). SIN EMBARGO, EN CADA TRANSICIÓN, LA FRECUENCIA PERMANECE INVARIANTE. LA LONGITUD DE ONDA, POR OTRO LADO, VA A



Longitud de onda de una onda sonora en aire a temperatura normal, como una función de la frecuencia (escala logarítmica). Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 5.7

CAMBIAR SEGUN LA RELACION $\lambda = v/f$. EN ESTA RELACION, v CAMBIA DE MEDIO A MEDIO, MIENTRAS QUE f ES DETERMINADA EXCLUSIVAMENTE POR LA VIBRACION INICIAL O FUENTE.

CUANDO UNA ONDA SONORA LLEGA A LA FRONTERA ENTRE DOS MEDIOS, PARTE DE ELLA ES REFLEJADA DE REGRESO AL MEDIO ORIGINAL. ALGUNAS BARRERAS SON REFLECTORES CASI PERFECTOS (P.EJ, PAREDES DE CEMENTO LISAS PARA ONDAS SONORAS; LOS EXTREMOS DE UNA CUERDA TENSA PARA ONDAS TRANSVERSALES). ESTE FENOMENO SE BASA EN EL HECHO DE QUE LOS PUNTOS DEL MEDIO QUE ESTAN SOBRE LA BARRERA REFLECTORA ESTAN EN REPOSO OBLIGADO, Y POR LO TANTO, SE PERTURBA EL BALANCE DE LAS FUERZAS ELASTICAS QUE CONTROLAN LA PROPAGACION DE LA ONDA. EN UNA REFLEXION LA FRECUENCIA PERMANECE SIN CAMBIO, MIENTRAS QUE LA DIRECCION DE PROPAGACION ES REVERTIDA A MANERA DE QUE INCIDA PERPENDICULARMENTE (O, EN GENERAL, DIRIGIDA CON UN ANGULO DE REFLEXION IGUAL AL ANGULO DE INCIDENCIA). LA AMPLITUD TAMBIEN PERMANECE IGUAL SI NO HAY NINGUNA ABSORCION.

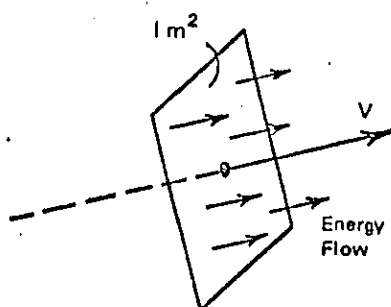
SE CONSIDERA FINALMENTE EL FLUJO DE ENERGIA ASOCIADO A UNA ONDA SONORA. SE DEFINE COMO: LA CANTIDAD DE ENERGIA MECANICA TOTAL (POTENCIAL Y CINETICA ASOCIADAS A LAS OSCILACIONES ELASTICAS DE LOS PUNTOS DEL MEDIO), QUE ES TRANSFERIDA, DURANTE CADA SEGUNDO, A TRAVES DE UNA SUPERFICIE DE AREA UNITARIA ($1m^2$) PERPENDICULAR A LA DIRECCION DE PROPAGACION (FIG. 5.8).

ESTE FLUJO DE ENERGIA ES EXPRESADO EN JOULES/ m^2 -SEG., ES DECIR, EN WATT/ m^2 . COMUNMENTE SE LE LLAMA "INTENSIDAD DE LA ONDA" Y SE LE DESIGNA POR I . SE PUEDE DEMOSTRAR QUE HAY UNA RELACION ENTRE LA INTENSIDAD DE UNA ONDA SONORA SINUSOIDAL Y EL VALOR DE LA PRESION DE OSCILACION PROMEDIO ASOCIADA A LA ONDA (VER FIG. 5.6), LA CUAL DENOTAMOS POR Δp :

$$I = \frac{(\Delta p)^2}{\rho v}$$

(VER DEDUCCION EN APENDICE C.2)

EN ESTA RELACION v ES LA VELOCIDAD DE UNA ONDA SONORA Y ρ ES LA



Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 5.8

DENSIDAD DEL AIRE. BAJO CONDICIONES NORMALES DE TEMPERATURA Y PRESION, SE TIENE LA SIGUIENTE RELACION NUMERICA:

$$I = 0.00234 \times (\Delta p)^2 \quad (\text{WATT/M}^2)$$

DEBE ESTAR EXPRESADA EN NEWTONS/M². COMO SE PUDRA OBSERVAR POSTERIORMENTE, EL SONIDO PURO MAS DEBIL QUE PUEDE SER OIDO A UNA FRECUENCIA DE 1000 HZ TIENE UNA INTENSIDAD DE SOLO 10⁻¹² WATT/M². DE ACUERDO CON LA RELACION ANTERIOR, ESTO REPRESENTA UNA VARIACION PROMEDIO DE LA PRESION DE SOLO 2.0 X 10⁻⁵ NEWTON/M², I.E., SOLO 2.0 X 10⁻¹⁰ DE LA PRESION ATMOSFERICA NORMAL. ESTO DA UNA IDEA DE LO SENSITIVO QUE ES EL OIDO.

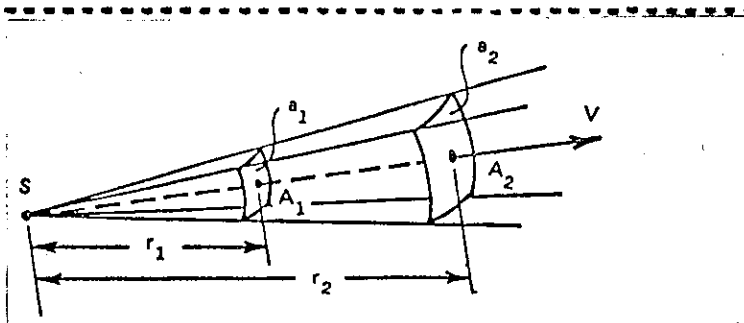
UNA FUENTE DE SONIDO DADA (UN INSTRUMENTO MUSICAL O UN ALTOPARLANTE) EMITE ONDAS SONORAS EN TODAS DIRECCIONES. EN GENERAL, LA CANTIDAD DE ENERGIA EMITIDA POR SEGUNDO, DEPENDE DE LA DIRECCION CONSIDERADA. SEA I, LA INTENSIDAD DE LA ONDA EN EL PUNTO A QUE SE PROPAGA EN LA DIRECCION MOSTRADA EN LA FIGURA 5.9. ESTO SIGNIFICA QUE UNA CANTIDAD DE ENERGIA I, a₁ FLUYE A TRAVES DE LA SUPERFICIE a₁ DURANTE CADA SEGUNDO. SI SE SUPONE QUE NO SE PIERDE ENERGIA EN EL TRAYECTO, ESTA MISMA CANTIDAD DE ENERGIA FLUIRA CADA SEGUNDO A TRAVES DE LA SUPERFICIE a₂ EN EL PUNTO A₂. POR LO TANTO,

$$I_1 a_1 = I_2 a_2$$

DEMO LAS AREAS DE LAS SUPERFICIES a₁ Y a₂ SON PROPORCIONALES A LOS CUADRADOS DE SUS RESPECTIVAS DISTANCIAS A LA FUENTE r₁ Y r₂, LA INTENSIDAD DE LA ONDA SONORA VARIA INVERSAMENTE PROPORCIONAL AL CUADRADO DE LA DISTANCIA A LA FUENTE:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

ESTA LEY NO ES VALIDA SI TOMAMOS EN CUENTA REFLEXIONES Y ABSORCIONES DEL SONIDO.



Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 5.9

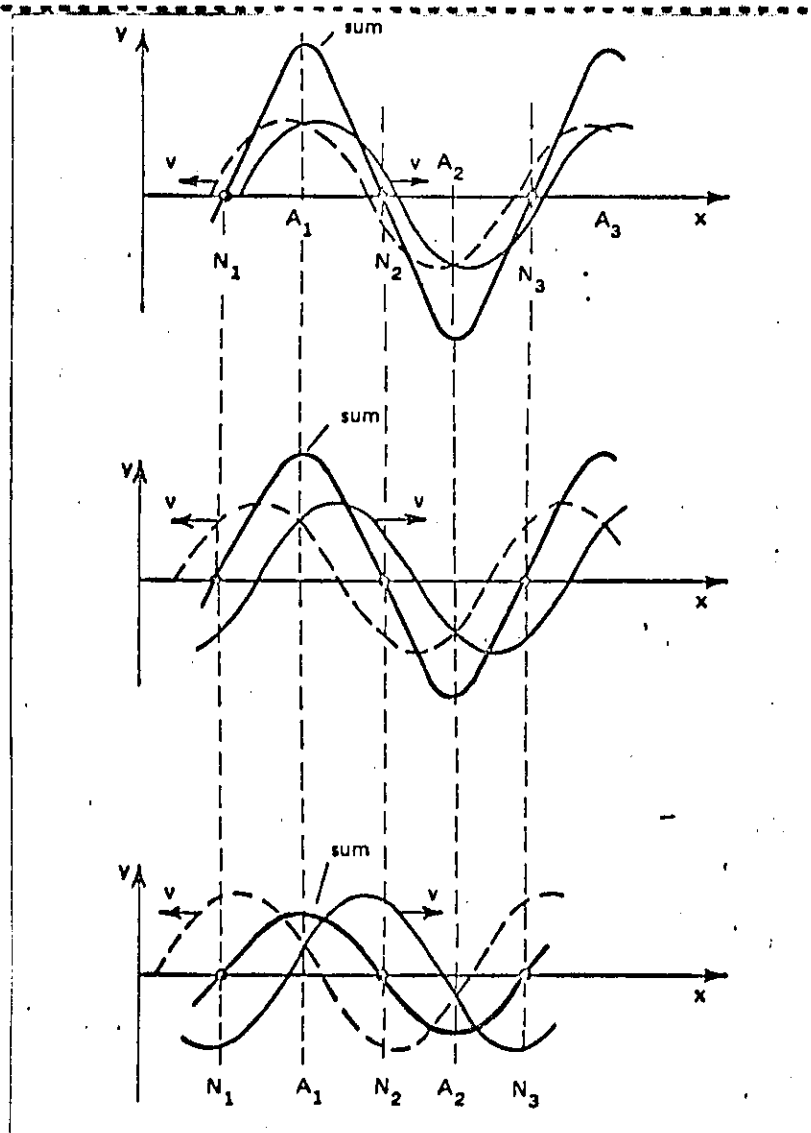
AL IMAGINAR LA FUENTE DE SONIDO COMPLETAMENTE CONTENIDA EN UNA SUPERFICIE ESFERICA, SE PUEDE HABLAR DE LA CANTIDAD TOTAL DE ENERGIA QUE FLUYE CADA SEGUNDO A TRAVES DE ESTA SUPERFICIE, LA CUAL SE DENOMINA "OUTPUT" DE POTENCIA ACUSTICA DE LA FUENTE. REPRESENTA LA RAZON A LA QUE LA FUENTE EMITE ENERGIA EN TODAS DIRECCIONES EN FORMA DE ONDAS SONORAS. SU VALOR ESTA DADO EN WATTS (JOULES/SEG.). UN INSTRUMENTO TIPICO IRRADIA ENTRE LOS 0.01 WATTS (CLARINETE) Y LOS 6.4 WATTS (TROMBON EN "FORTISSIMO").

5.3 SUPERPOSICION DE ONDAS; ONDAS ESTACIONARIAS

EN AUSENCIA DE PAREDES REFLECTORAS, LAS ONDAS SONORAS VIAJAN EN LINEAS RECTAS ALEJANDOSE DE LA FUENTE. COMO SE MUESTRA EN LA SECCION ANTERIOR, SU INTENSIDAD DECRECE RAPIDAMENTE, PROPORCIONAL A $1/r^2$, DONDE r ES LA DISTANCIA A LA FUENTE. SI SE TIENE MAS DE UNA FUENTE, LAS ONDAS EMITIDAS POR CADA FUENTE SE PROPAGAN INDIVIDUALMENTE COMO SI NO EXISTIERA NINGUNA OTRA ONDA. EL EFECTO RESULTANTE EN UN PUNTO DADO DEL MEDIO (POR EJEMPLO, EN EL CANAL AUDITIVO) ES UNA OSCILACION DE PRESION QUE ES SIMPLEMENTE LA SUMA ALGEBRAICA DE LAS OSCILACIONES DE PRESION DE LAS ONDAS INDIVIDUALES. EN OTRAS PALABRAS, LAS ONDAS SONORAS SE SUPERPONEN LINEALMENTE.

ES INTERESANTE CONSIDERAR, APORA, LA SUPERPOSICION DE DOS ONDAS SONORAS PURAS DE FRECUENCIAS f_1 Y f_2 Y CONSECUENTEMENTE, DE LONGITUDES DE ONDA $\lambda_1 = v/f_1$, Y $\lambda_2 = v/f_2$, QUE VIAJAN EN LA MISMA DIRECCION. PARA PODER OBTENER UNA "FOTOGRAFIA" DE LAS VARIACIONES DE PRESION RESULTANTES, ES SUFICIENTE SUMAR LOS VALORES DE LAS VARIACIONES DE PRESION INDIVIDUALES, CAUSADAS POR CADA ONDA SEPARADAMENTE EN CADA PUNTO x A LO LARGO DE LA DIRECCION DE PROPAGACION. COMO LA VELOCIDAD DE LAS ONDAS SONORAS NO DEPENDE DE LA FRECUENCIA (NI DEL PATRON DE VIBRACION COMO TAL), TODOS LOS PUNTOS DEL MEDIO REPETIRAN EXACTAMENTE EL MISMO PATRON COMPLEJO DE VIBRACION, SOLO QUE SUJETOS A TIEMPOS INICIALES DISTINTOS. EL FLUJO DE ENERGIA, I.E., LA INTENSIDAD DE LA SUPERPOSICION DE DOS (O MAS) ONDAS VIAJANDO EN LA MISMA DIRECCION CON LA MISMA FASE ES SIMPLEMENTE LA SUMA DE LAS CONTRIBUCIONES DE FLUJO DE ENERGIA DE LAS COMPONENTES INDIVIDUALES:

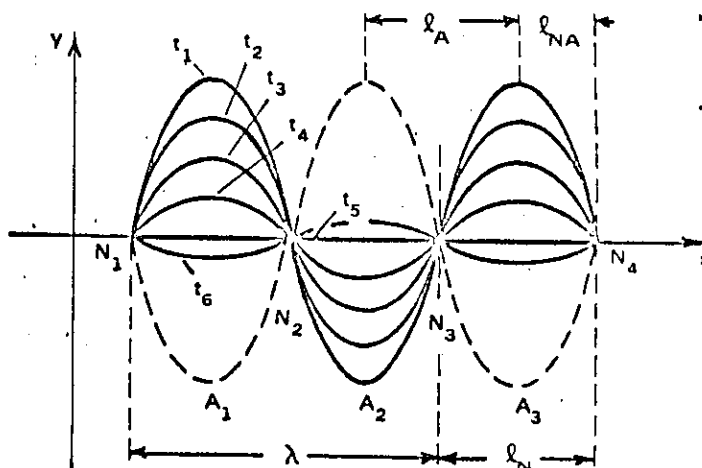
$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$



Según Roederer, J.G. Introduction to the
 Physics and Psychophysics of Music.
 Springer-Verlag.

FIGURA 5.10.

UN CASO PARTICULARMENTE IMPORTANTE ES EL DE DOS ONDAS SINUSOIDALES, DE LA MISMA FRECUENCIA Y DE LA MISMA AMPLITUD, QUE VIAJAN EN DIRECCIONES OPUESTAS. ESTO SUCEDE CUANDO UNA ONDA SINUSOIDAL ES REFLEJADA EN UN PUNTO DADO (SIN ABSORCIÓN), Y LUEGO VIAJA DE REGRESO, SUPERPONIÉNDOSE CON LA ONDA QUE VIENE HACIA EL PUNTO DE REFLEXIÓN. PARA ANALIZAR ESTE CASO CONVIENE ESTUDIAR PRIMERO EL COMPORTAMIENTO DE VARIAS ONDAS TRANSVERSALES EN UNA CUERDA. AL SUMAR LAS CONTRIBUCIONES DE CADA COMPONENTE, SE OBTIENE OTRA ONDA SINUSOIDAL DE LA MISMA FRECUENCIA PERO CON DIFERENTE AMPLITUD. EL HECHO NOTABLE, SIN EMBARGO, ES QUE, ¡ESTA ONDA RESULTANTE NO SE PROPAGA EN ABSOLUTO! PERMANECE ANCLADA EN



Formas sucesivas de una cuerda en una oscilación de una onda estacionaria.
 Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music.
 Springer-Verlag.

FIGURA 5.11

CIERTOS PUNTOS N_1, N_2, N_3, \dots , LLAMADOS NODOS, QUE NO VIBRAN. LOS PUNTOS ENTRE LOS NODOS VIBRAN CON DIFERENTES AMPLITUDES, DEPENDIENDO DE SU POSICIÓN. EN ESPECIAL, LOS PUNTOS A_1, A_2, A_3, \dots , (A MITAD DE CAMINO ENTRE LOS NODOS), LLAMADOS ANTI-NODOS, VIBRAN CON UNA AMPLITUD MÁXIMA QUE ES EL DOBLE DE LA DE CADA ONDA COMPONENTE. LA FIGURA 5.11 MUESTRA LAS FORMAS SUCE-SIVAS DE LA CUERDA CUANDO DOS ONDAS SINUSOIDALES DE LA MISMA AMPLITUD VIAJAN EN DIRECCIONES OPUESTAS. ESTO SE LLAMA UNA ONDA ESTACIONARIA. LOS PUNTOS OSCILAN PERO NO HAY EVIDENCIA DE PROPAGACIÓN. EL PERFIL DE LA ONDA CAMBIA EN AMPLITUD PERO NO SE MUEVE NI HACIA LA DERECHA NI HACIA LA IZQUIERDA. EN UN MOMENTO (t_1), LA CUERDA MUESTRA UNA DEFORMACIÓN MÁXIMA; EN OTRO (t_5) NO TIENE NINGUNA DEFORMACIÓN. LAS ONDAS ESTACIONARIAS JUEGAN UN PAPEL IMPORTANTÍSIMO EN LA MÚSICA, ESPECIALMENTE EN LOS MECANISMOS GENERADORES DE SONIDO DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES.

EN UNA ONDA ESTACIONARIA TAMPOCO HAY PROPAGACIÓN NETA DE ENERGÍA. LA CUERDA ENTERA ACTUA CASI COMO UN RESORTE ELÁSTICO VIBRANTE: EN UN TIEMPO DADO (I.E., t_5 EN LA FIG. 5.11), TODOS LOS PUNTOS ESTÁN PASANDO POR SU POSICIÓN DE EQUILIBRIO Y LA ENERGÍA TOTAL DE LA CUERDA ESTÁ EN FORMA CINÉTICA. EN OTRO MOMENTO (I.E., t_1 EN LA FIG. 5.11), TODOS LOS PUNTOS ESTÁN EN SU DESPLAZAMIENTO MÁXIMO Y LA ENERGÍA TOTAL ES POTENCIAL. EN OTRAS PALABRAS, EN UNA ONDA ESTACIONARIA, TODOS LOS PUNTOS OSCILAN EN FASE. ES CONVENIENTE RECORDAR QUE ESTO NO SUCEDE CON UNA ONDA QUE SE PROPAGA: EN LA FIGURA 5.3, POR EJEMPLO, EN UN INSTANTE DADO, HAY PUNTOS QUE TIENEN UN DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (SOLO ENERGÍA POTENCIAL) ASÍ COMO HAY PUNTOS CON DESPLAZAMIENTO CERO (SOLO ENERGÍA CINÉTICA) Y PUNTOS EN CUALQUIER SITUACIÓN INTERMEDIA (AMBAS FORMAS DE ENERGÍA). ADEMÁS, EN UNA ONDA QUE SE PROPAGA TODOS LOS PUNTOS TIENEN LA MISMA AMPLITUD. LO QUE VARIA SON LOS TIEMPOS EN LOS QUE ALCANZAN EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (I.E., LOS

PUNTOS ESTAN FUERA DE FASE).

UN ANALISIS DETENIDO DE LA FIGURA 5.11 REVELA QUE LA DISTANCIA l_N ENTRE DOS NODOS VECINOS, N_1 Y N_2 , O LA DISTANCIA l_A ENTRE DOS ANTINODOS, A_1 Y A_2 , ES EXACTAMENTE LA MITAD DE UNA LONGITUD DE ONDA λ :

$$l_N = l_A = \frac{\lambda}{2}$$

POR OTRO LADO, LA DISTANCIA l_{NA} ENTRE UN NODO N Y UN ANTINODO A , ES UN CUARTO DE λ :

$$l_{NA} = \frac{\lambda}{4}$$

LAS ONDAS ESTACIONARIAS TAMBIEN PUEDEN SER LONGITUDINALES. APARECEN CUANDO DOS ONDAS SONORAS DE LA MISMA FRECUENCIA Y AMPLITUD DE VARIACION DE PRESION VIAJAN EN DIRECCIONES OPUESTAS. ESTO SUCEDE, POR EJEMPLO, CUANDO UNA ONDA SONORA VIAJA A LO LARGO DE UN TUBO Y ES REFLEJADA EN EL OTRO EXTREMO. TAMBIEN APARECEN ONDAS ESTACIONARIAS DE REFLEXIONES EN LAS PAREDES DE SALONES Y CORREDORES. TIENEN LAS MISMAS PROPIEDADES QUE LAS ONDAS ESTACIONARIAS TRANSVERSALES. SIN EMBARGO, HAY QUE AÑADIR UN COMENTARIO IMPORTANTE. COMO SE MENCIONO EN LA SECCION ANTERIOR, LAS ONDAS SONORAS SON DESCRITAS MAS CONVENIENTEMENTE POR OSCILACIONES DE PRESION. SE DEMOSTRO QUE LOS PUNTOS CON VARIACION MAXIMA DE PRESION TIENEN DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL CERO (FIG. 5.5), MIENTRAS QUE LOS LUGARES CON VARIACIONES DE PRESION CERO CORRESPONDEN A PUNTOS CON DESPLAZAMIENTO MAXIMO. ESTO SE PUEDE TRASLADAR AL CASO DE UNA ONDA SONORA ESTACIONARIA: LOS NODOS DE PRESION (I.E., PUNTOS EN LOS QUE LAS VARIACIONES DE PRESION SON PERMANENTEMENTE CERO) SON ANTINODOS DE VIBRACION (PUNTOS QUE OSCILAN CON AMPLITUD MAXIMA), MIENTRAS QUE LOS ANTINODOS DE PRESION (PUNTOS EN LOS CUALES LA PRESION OSCILA CON AMPLITUD MAXIMA) SON NODOS DE VIBRACION (PUNTOS QUE ESTAN PERMANENTEMENTE EN REPOSO).

5.4 INTENSIDAD, NIVEL DE INTENSIDAD DE SONIDO Y VOLUMEN

SE HA OBSERVADO QUE, PARA UN SONIDO PURO, LA AMPLITUD DE LAS OSCILACIONES DEL TIMPANO LLEVA A LA SENSACION DE VOLUMEN. ESTA AMPLITUD ESTA DIRECTAMENTE RELACIONADA CON LA VARIACION DE PRESION PROMEDIO, Δp , DE LA ONDA SONORA INCIDENTE Y, POR LO TANTO, CON EL FLUJO DE ENERGIA ACUSTICA O INTENSIDAD I QUE ALCANZA AL OIDO. CONVIENE, PUES, INVESTIGAR EL RANGO DE INTENSIDADES I , DE ONDAS SONORAS PURAS, A LAS CUALES EL OIDO ES SENSITIVO.

HAY DOS LIMITES DE SENSITIVIDAD PARA UN TONO DE FRECUENCIA DADA: (1) UN LIMITE INFERIOR O UMBRAL DEL OIDO, QUE REPRESENTA LA INTENSIDAD MAS PEQUENA QUE SE PUEDE OIR; Y (2) UN LIMITE SUPERIOR

DEL OIDO, MAS ALLA DEL CUAL SE EVOCA DOLOR FISIOLÓGICO QUE EVENTUALMENTE LLEVA AL DAÑO FÍSICO DEL MECANISMO DEL OIDO. EL ENORME RANGO DE INTENSIDADES COMPRENDIDO ENTRE LOS DOS LÍMITES ES SORPRENDENTE. PARA UN TONO DE 1000 HZ, SE ENCUENTRA QUE LA INTENSIDAD PROMEDIO DEL UMBRAL ESTA CERCA DE 10^{-12} WATT/M², MIENTRAS QUE EL LÍMITE DE DOLOR ESTA APROXIMAMENTE EN 1 WATT/M². ESTO REPRESENTA UNA RAZÓN DE INTENSIDADES DE UN BILLÓN A UNO, A LA CUAL EL OIDO ES SENSITIVO.

DEBIDO A LO EXTENSO DEL RANGO, LA UNIDAD WATT/M² RESULTA IMPRÁCTICA. PERO TODAVÍA HAY OTRA RAZÓN PARA CONSIDERARLA INCONVENIENTE. LA DIFERENCIA APENAS NOTABLE (DAN) DE UN ESTÍMULO DADO ES GENERALMENTE UNA BUENA ESCALA CUANDO SE TRATA DE ESCOGER UNA UNIDAD APROPIADA PARA LA MAGNITUD FÍSICA EN CUESTIÓN. LOS EXPERIMENTOS MUESTRAN QUE EL DAN DE INTENSIDAD DE TONO ES CASI PROPORCIONAL A LA INTENSIDAD DEL TONO. ESTA PROPORCIONALIDAD SUGIERE, ENTONCES, QUE LA UNIDAD DEBIERA AUMENTAR GRADUALMENTE A MEDIDA QUE AUMENTA LA INTENSIDAD DEL TONO QUE SE INTENTA DESCRIBIR. ESTO, POR SUPUESTO, LLEVARIA A UNA GRAN COMPLICACIÓN, A MENOS DE QUE SE INTRODUCIERA UNA CANTIDAD DISTINTA QUE FUERA UNA FUNCIÓN ADECUADA DE LA INTENSIDAD. ESTA NUEVA CANTIDAD DEBERIA SATISFACER TRES OBJETIVOS SIMULTÁNEOS: (1) EFECTUAR UNA TRANSFORMACIÓN DE LA ESCALA DE INTENSIDAD PERCEPTIBLE A UNA ESCALA CON UN RANGO MUCHO MENOR DE VALORES; (2) USAR VALORES RELATIVOS (P.EJ., RELATIVOS AL UMBRAL DEL OIDO) EN VEZ DE VALORES ABSOLUTOS; Y (3) INTRODUCIR UNA UNIDAD MAS CONVENIENTE CUYO VALOR CASI REPRESENTA EL CAMBIO MÍNIMO PERCEPTIBLE DE INTENSIDAD DE SONIDO.

LA INTRODUCCIÓN DE UNA NUEVA MAGNITUD SE HACE DE LA SIGUIENTE MANERA. SE OBSERVA QUE LO QUE PARECE ESTAR MAS CARACTERÍSTICAMENTE RELACIONADO CON EL EFECTO DE VOLUMEN ES EL EXPONENTE AL CUAL SE ELEVA DIEZ PARA OBTENER UNA INTENSIDAD CORRESPONDIENTE A UN VOLUMEN DADO: 10^{-12} PARA EL UMBRAL DEL SONIDO, 10^{-9} PARA UN SONIDO ppp (PIANO-PIANÍSSIMO), 10^{-7} PARA PIANO, 10^{-5} PARA FORTE, 10^{-3} PARA fff (FORTE-FORTÍSSIMO) Y 10^0 PARA EL LÍMITE DE DOLOR. ESTO SUGIERE QUE SE DEBIERA USAR UNA FUNCIÓN LOGARÍTMICA PARA REPRESENTAR LA INTENSIDAD: LOS LOGARITMOS DE BASE 10.

PRIMERO ADOPTAMOS UN UMBRAL DE OIDO (EN 1000 HZ) DE 10^{-12} WATT/M² COMO NUESTRA INTENSIDAD DE REFERENCIA I_0 . DESPUES SE INTRODUCIÓ LA CANTIDAD

$$I_N = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

QUE ES LLAMADA NIVEL DE INTENSIDAD DE SONIDO. LA UNIDAD DE I_N ES LLAMADA DECIBEL Y ES DENOTADA DB. PARA EL UMBRAL DEL OIDO $I/I_0 = 1$ E $I_N = 0$ DB. PARA EL LÍMITE SUPERIOR DE LA CAPACIDAD DE OIR, $I/I_0 = 10^{12}$ E $I_N = 10 \times \log(10^{12}) = 120$ DB. UN SONIDO "FORTE" TÍPICO TIENE UN NIVEL DE INTENSIDAD DE SONIDO DE 70 DB, MIENTRAS QUE UN ppp CORRESPONDE A 30 DB.

ES POSIBLE USAR LA RELACIÓN $I = 0.000234 \times (\Delta p)^2$ PARA EXPRESAR LA INTENSIDAD EN TÉRMINOS DE LA VARIACIÓN PROMEDIO DE LA PRESIÓN, Δp , QUE ES MEDIBLE MAS FACILMENTE. SE ENCUENTRA QUE EL

UMBRAL MINIMO I_0 , EN 1000 HZ, CORRESPONDE APROXIMADAMENTE A LA VARIACION PROMEDIO DE PRESION, $\Delta p_0 = 2 \times 10^{-5}$ NEWTON/M². COMO I ES PROPORCIONAL AL CUADRADO DE Δp , SE CUMPLE QUE:

$$\log \frac{I}{I_0} = \log \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0} \right)^2 = 2 \log \frac{\Delta p}{\Delta p_0}$$

ENTONCES SE PUEDE INTRODUCIR LA NUEVA CANTIDAD

$$NPS = 20 \log \frac{\Delta p}{\Delta p_0}$$

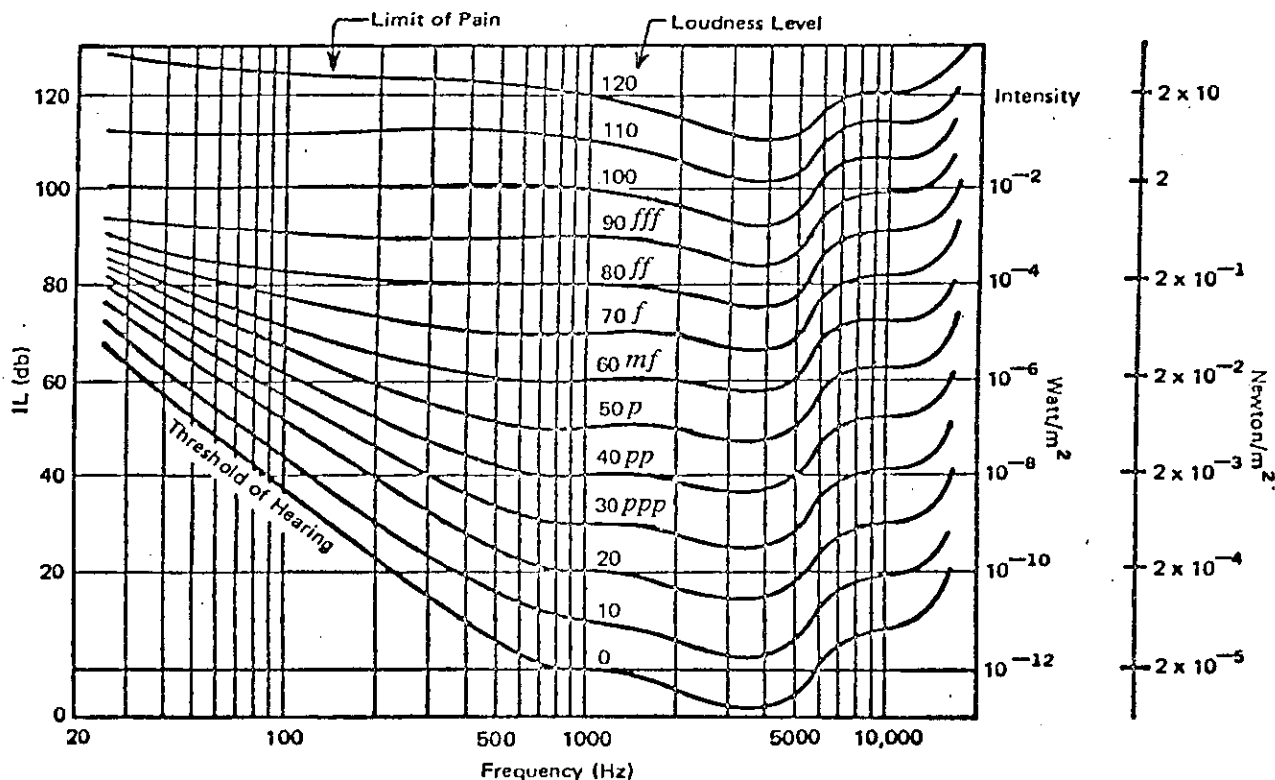
QUE SE DENOMINA NIVEL DE PRESION DEL SONIDO (NPS). PARA UNA ONDA VIAJERA LOS VALORES NUMERICOS DE I_w Y NPS SON IGUALES Y AMBAS CANTIDADES REPRESENTAN LO MISMO. PARA UNA ONDA ESTACIONARIA NO HAY FLUJO DE ENERGIA Y NO SE PUEDE DEFINIR I , DE MANERA QUE I_w PIERDE SENTIDO. SIN EMBARGO, TANTO LA VARIACION PROMEDIO DE PRESION, Δp , EN UN PUNTO DADO DEL ESPACIO, COMO EL NIVEL DE PRESION DEL SONIDO TIENEN SIGNIFICADO. POR ESTA RAZON EL NPS ES USADO MAS FRECUENTEMENTE QUE EL I_w . CONVIENE NOTAR QUE I_w Y NPS NO DEPENDEN DE LA FRECUENCIA, MIENTRAS QUE LOS LIMITES SUBJETIVOS DE LA CAPACIDAD DE OIR (I.E., I_0 Y p_0) Y, EN GENERAL, LA SENSACION SUBJETIVA DE VOLUMEN, SI DEPENDEN DE ELLA.

AL SUPERPONER DOS SONIDOS DE LA MISMA FRECUENCIA (Y FASE) SE OBSERVA QUE OCURREN FENOMENOS PECULIARES: LA INTENSIDAD SE DUPLICA, MIENTRAS QUE I_w ES INCREMENTADA EN 3 DB, SIN QUE AFECTE EL VALOR ORIGINAL DE I_w . LA SUPERPOSICION DE DIEZ TONOS DE IGUAL FASE SOLO INCREMENTA AL I_w EN 10 DB. PARA AUMENTAR EL I_w DE UN TONO DADO EN 1 DB, ES NECESARIO MULTIPLICAR SU INTENSIDAD POR 1.26, LO CUAL SIGNIFICA QUE SE DEBE AÑADIR UN TONO CUYA INTENSIDAD SEA 0.26 DE LA DEL TONO ORIGINAL.

EL MINIMO CAMBIO EN NPS REQUERIDO PARA DAR LUGAR A UN CAMBIO DETECTABLE EN LA SENSACION DE VOLUMEN (DAN EN EL NIVEL DE SONIDO) ES CASI CONSTANTE Y DEL ORDEN DE 0.2 A 0.4 DB EN EL RANGO MUSICALMENTE RELEVANTE DE GRADO DE ALTURA Y VOLUMEN. LA UNIDAD DEL I_w Y DEL NPS, EL DECIBEL, ES, ENTONCES, DE UN "TAMAÑO RAZONABLE", CERCANO AL DAN.

HASTA AGUI SE HAN ANALIZADO LAS MAGNITUDES FISICAS I_w Y NPS. AHORA CONVIENE EXAMINAR LA MAGNITUD PSICOLOGICA VOLUMEN, ASOCIADA CON UN NPS DADO. SE HA MENCIONADO LA FACILIDAD DE LAS PERSONAS PARA ESTABLECER UN ORDEN ENTRE LA INTENSIDAD DE DOS SENSACIONES DEL MISMO TIPO, HACIENDO NOTAR LAS COMPLICACIONES QUE RESULTAN AL HACER COMPARACIONES ABSOLUTAMENTE CUANTITATIVAS. EN EL CASO DEL VOLUMEN, SE ENCUENTRA Poca DISPARIDAD ENTRE LOS JUICIOS DE VARIOS INDIVIDUOS AL DETERMINAR SI DOS TONOS PUEDEN SUENAR IGUALMENTE RECIOS. PERO LAS RESPUESTAS A LA PREGUNTA DE QUE TANTO MAS RECIO ES UN TONO QUE OIRD, FLUCTUAN AMPLIAMENTE DE INDIVIDUO A INDIVIDUO.

LOS TONOS QUE TIENEN EL MISMO NPS PERO DIFERENTES FRECUENCIAS SON JUZGADOS COMO QUE TIENEN DIFERENTES VOLUMENES. POR LO TANTO, EL NPS NO ES UNA BUENA MEDIDA DEL VOLUMEN SI COMPARAMOS TONOS DE DISTINTAS FRECUENCIAS. SE HAN LLEVADO A CABO EXPERIMENTOS PARA ESTABLECER CURVAS DE IGUAL VOLUMEN, TOMANDO EL NPS EN 1000 HZ COMO



Curvas de igual volumen (Fletcher y Munson, 1933) en un diagrama de nivel de intensidad de sonido (In) y frecuencia. Las escalas correspondientes de intensidad de sonido y variación

promedio de presión también se muestra. Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 5.12

VALOR DE REFERENCIA. ESTAS CURVAS SE MUESTRAN EN LA FIG. 5.12 (FLETCHER Y MUNSON, 1933). NOTESE QUE, DE ACUERDO CON LAS CURVAS DE LA FIGURA ANTERIOR, PARA PRODUCIR UNA SENSACION DE VOLUMEN DADO EN FRECUENCIAS BAJAS, P.EJ., UN SONIDO "FUERTE", SE NECESITA UNA INTENSIDAD (FLUJO DE ENERGIA) MUCHO MAYOR QUE A 1000 HZ. ESTA ES LA RAZON POR LA CUAL LOS TONOS BAJOS PARECEN "ESFUMARSE" MUCHO ANTES QUE LOS ATUPLADOS, A MEDIDA QUE EL OYENTE SE ALEJA

GRADUALMENTE DE LA FUENTE DE SONIDO.

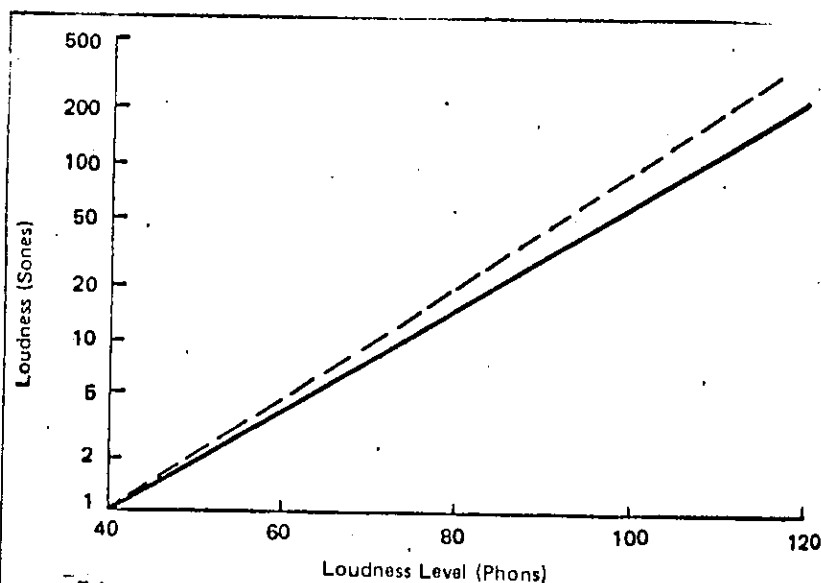
LA CURVA MAS BAJA DE LA FIGURA 5.12 REPRESENTA EL UMBRAL DE LA CAPACIDAD DE OIR, PARA DIVERSAS FRECUENCIAS. DE NUEVO, SE OBSERVA CÓMO LA SENSITIVIDAD DEL OIDO DECRECE CONSIDERABLEMENTE HACIA FRECUENCIAS BAJAS (Y TAMBIEN HACIA FRECUENCIAS MUY ALTAS). LA SENSITIVIDAD MAXIMA SE ALCANZA ALREDEDOR DE LOS 3000 FZ. LA FORMA DE ESTA CURVA DEL UMBRAL ESTA INFLUIDA POR LAS PROPIEDADES ACUSTICAS DEL CANAL AUDITIVO (MEATUS) Y POR LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LA CADENA OSEA DEL OIDO MEDIO. FINALMENTE, DEBE TOMARSE EN CUENTA QUE LAS CURVAS DE LA FIGURA 5.12 SON VALIDAS SOLO PARA TONOS Puros AISLADOS QUE SUENAN CONTINUAMENTE. ALGUNOS ESTUDIOS RECIENTES (MOLLIC, 1973) DEMUESTRAN QUE LOS CONTORNOS DE IGUAL VOLUMEN PARECEN DEPENDER DE LA FRECUENCIA DEL TONO DE REFERENCIA (QUE ES 1000 HZ EN LA FIG. 5.12).

AHORA SE INTRODUCE EL CONCEPTO DE NIVEL DE VOLUMEN, O NV. SE DEFINE DE LA SIGUIENTE MANERA: EL NV DE UN TONO DE FRECUENCIA f ESTA DADO POR EL NPS DE UN TONO DE 1000 FZ QUE SE JUZGA SER IGUALMENTE RECIO QUE EL TONO DE FRECUENCIA f . ESTO SIGNIFICA QUE LAS CURVAS DE LA FIGURA 5.12 SON, EN REALIDAD, CURVAS DE NV CONSTANTE. LA UNIDAD DE NV ES LLAMADA FONON. LA FIGURA 5.12 PUEDE SER USADA PARA ENCONTRAR EL NV DE UN TONO DE NPS DADO, EN CUALQUIER FRECUENCIA f . POR EJEMPLO, AL CONSIDERAR UN TONO DE 70 DB Y NPS ($I = 10^{-6}$ WATT/M²) EN 80 FZ, SE OBSERVA QUE LA CURVA QUE PASA A TRAVES DE ESE PUNTO INTERSECTA LA LINEA DE 1000 HZ EN 50 DB. POR LO TANTO EL NV DE ESE TONO ES IGUAL A 50 FONONES. EN GENERAL, LOS NUMEROS MOSTRADOS A LO LARGO DE LA LINEA DE 1000 HZ REPRESENTAN EL NV, EN FONONES, DE LAS CORRESPONDIENTES CURVAS DE VOLUMEN CONSTANTE.

ES IMPORTANTE NOTAR QUE EL NV ES UNA MAGNITUD FISICA EN VEZ DE PSICOFISICA, A PESAR DEL NOMBRE. REPRESENTA AQUELLAS INTENSIDADES O NPS'S QUE SUENAN IGUALMENTE RECIOS, PERO NO PRETENDE REPRESENTAR EL VOLUMEN DE UNA MANERA ABSOLUTA: UN TONO CUYO NV ES EL DOBLE DEL NV DE OTRO NO SUENA DOBLEMENTE RECIO QUE EL OTRO. SE HAN HECHO MUCHOS ESTUDIOS PARA DETERMINAR UNA ESCALA SUBJETIVA DE VOLUMEN. LA FIGURA 5.13 (LA LINEA OSCURA) ES EL RESULTADO (STEVENS, 1955) DE RELACIONAR EL VOLUMEN SUBJETIVO V CON EL NIVEL DE VOLUMEN NV, EN EL RANGU DE INTERES MUSICAL. LA MAGNITUD V QUE DESCRIBE EL VOLUMEN SUBJETIVO ESTA EXPRESADA EN UNIDADES LLAMADAS SCAONES. LA RELACION AC ES LINEAL (PUESTO QUE LA ESCALA DE VOLUMEN ES LOGARITMICA), SINO QUE ES TAL QUE AL AUMENTAR NV EN 10 FONONES, EL VOLUMEN V ES SOLAMENTE DUPLICADO. ESTO, POR EJEMPLO, SIGNIFICA QUE AL OIR DIEZ INSTRUMENTOS TOCANDO UNA NOTA DADA DEL MISMO NV, EL OYENTE SIENTE QUE SUENAN SOLO DOBLEMENTE RECIOS QUE UNO DE LOS INSTRUMENTOS TOCANDO AISLADAMENTE.

SE HA DEMOSTRADO QUE LA RELACION ENTRE V Y LA INTENSIDAD I DE LA ONDA, O LA VARIACION PROMEDIO DE LA PRESION Δp , PUEDE SER DESCRITA APROXIMADAMENTE POR LA FUNCION (STEVENS, 1970):

$$V = C_1 \sqrt[3]{I} = C_2 \sqrt[3]{(\Delta p)^2}$$



Línea gruesa: relación experimental

entre la magnitud psicológica volumen y la magnitud física nivel de volumen (después de Stevens, 1955). Línea quebrada: relación de la ley de potencia (Stevens, 1970). Según Roederer, J.G.

Introduction to the Physics and Psychophysics of Music.

Springer-Verlag. FIGURA 5.13

DONDE C_1 Y C_2 SON PARAMETROS QUE DEPENDEN DE LA FRECUENCIA. ESTO DA COMO RESULTADO LA LINEA QUEBRADA DE LA FIGURA 5.13.

AL SUPERPONER DOS O MAS TONOS DE LA MISMA FRECUENCIA LA INTENSIDAD TOTAL DETERMINA EL VOLUMEN RESULTANTE. A TRAVES DE LA RELACION ANTERIOR. SI LAS FRECUENCIAS SON DISTINTAS PERO CAEN DENTRO DE LA BANDA CRITICA DE LA FRECUENCIA CENTRAL, EL VOLUMEN RESULTANTE VIENE DADO POR:

$$V = C_1 \sqrt[3]{(I_1 + I_2 + I_3 + \dots)}$$

CUANDO ALGUNA DE LAS FRECUENCIAS EXCEDE LA BANDA CRITICA, EL VOLUMEN ES MAYOR QUE EL DEL CASO ANTERIOR Y TIENDE A SER:

$$V = C_1 \sqrt[3]{I_1} + C_2 \sqrt[3]{I_2} + C_3 \sqrt[3]{I_3} + \dots$$

FINALMENTE, ES NECESARIO MENCIONAR EL EFECTO DE LA DURACION DE UN TONO SOBRE LA SENSACION DE VOLUMEN. PRIMERO, EXISTE UN UMBRAL TEMPORAL, QUE ES LA DURACION MINIMA QUE UN TONO PURO DEBE TENER PARA PRODUCIR UNA SENSACION. ESTA DURACION MINIMA ES COMO DE 10 A 15 MILISEGUNDOS, O POR LO MENOS, DE 2 A 3 PERIODOS DE OSCILACION, SI LA FRECUENCIA ESTA POR DEBAJO DE LOS 50 HZ. LUEGO, SE HA DEMOSTRADO QUE, SI LA INTENSIDAD FISICA DEL TONO (FLUJO DE

ENERGIA) SE MANTIENE CONSTANTE, ENTRE MAS CORTO ES UN PULSO TONAL, MENOS RECIO ES ESTE. CUANDO LA DURACION DE UN TONO ES MAYOR QUE MEDIO SEGUNDO, EL VOLUMEN ALCANZA UN VALOR FINAL QUE ES INDEPENDIENTE DE LA DURACION (Y DEPENDE SOLO DE LA INTENSIDAD).

5.5 EL MECANISMO DE PERCEPCION DEL VOLUMEN Y PROCESOS RELACIONADOS.

¿QUÉ PROCESO FISICO O NEURAL ES RESPONSABLE POR LA DIFERENCIA ENTRE LA LIMITADA ESCALA SUBJETIVA DEL VOLUMEN Y EL ENORME RANGO DE INTENSIDADES DETECTABLES DE UN SONIDO? ESTE PROCESO ES PARCIALMENTE NEURAL Y PARCIALMENTE MECANICO. CUANDO SE PRESENTA UN SONIDO PURO, LAS NEURONAS PRIMARIAS, CONECTADAS A LAS CELULAS SENSORIALES QUE ESTAN LOCALIZADAS EN EL CENTRO DE LA REGION DE AMPLITUD DE RESONANCIA MAXIMA, AUMENTAN SU RAZON DE DESCARGA MAS ALLA DEL NIVEL ESPONTANEO. ESTE AUMENTO ES UNA FUNCION MONOTONICA NO-LINEAL DE LA AMPLITUD DEL ESTIMULO. OTRO ELEMENTO QUE CONTRIBUYE A LA COMPRESION DE LO QUE ES EL VOLUMEN ESTA RELACIONADO CON LO QUE SIGUE: EN NPS'ES ALTOS, LA RAZON DE DESCARGA DE UNA NEURONA PRIMARIA ALCANZA UN LIMITE SUPERIOR QUE ES POCAS VECES MAYOR QUE EL NIVEL DE DESCARGA ESPONTANEA. CUALQUIER AUMENTO DE INTENSIDAD MAS ALLA DE ESTE PUNTO YA NO ALTERA NOTABLEMENTE ESTA RAZON DE DESCARGA. SIN EMBARGO, SUCDE QUE ENTRE MAS INTENSA ES UNA ONDA SONORA, MAS EXTENDIDA ES LA REGION DE RESONANCIA A LO LARGO DE LA MEMBRANA BASILAR, Y POR LO TANTO, MAYOR ES EL TOTAL DE NEURONAS PRIMARIAS CUYOS UMBRALES HAN SIDO SOBREPASADOS POR EL ESTIMULO. EN RESUMEN, UN AUMENTO EN INTENSIDAD LLEVA A UN AUMENTO EN EL TOTAL DE IMPULSOS TRANSMITIDOS, YA SEA PORQUE LA RAZON DE DESCARGA DE CADA NEURONA HA AUMENTADO O PORQUE EL TOTAL DE NEURONAS ACTIVADAS HA AUMENTADO. ESTE ULTIMO EFECTO DEPENDE PRINCIPALMENTE DE LA FORMA DE DISTRIBUCION DE LAS AMPLITUDES DE UNA OSCILACION DE LA MEMBRANA; UNA PROPIEDAD PURAMENTE MECANICA.

LA DEPENDENCIA ENTRE LA SENSACION DE VOLUMEN Y LA DURACION DEL TONO EXPLICA EL HECHO DE QUE, SOLO DESPUES DE VARIAS DECIMAS DE SEGUNDO, SE LOGRA QUE EL MECANISMO NEURAL DE PROCESAMIENTO DE TONOS ALCANCE UN ESTADO ESTABLE. SIN EMBARGO, DURANTE ESTE INTERVALO TEMPORAL, LA SENSACION DE GRADO DE ALTURA ES ESTABLE Y UNICA.

A PESAR DE LO ANTERIOR, EXISTE UNA LIGERA DEPENDENCIA ENTRE EL GRADO DE ALTURA Y EL VOLUMEN PARA UN TONO DE FRECUENCIA CONSTANTE. PARA TONOS ARRIBA DE LOS 2000 HZ, EL GRADO DE ALTURA AUMENTA A MEDIDA QUE EL VOLUMEN AUMENTA Y VICEVERSA. DEBAJO DE LOS 1000 HZ SUCDE LO OPUESTO (WALLISER, 1969). EL EFECTO ES PEQUEÑO: SE REQUIEREN CAMBIOS CONSIDERABLES EN LA INTENSIDAD PARA PRODUCIR CAMBIOS NOTABLES EN EL GRADO DE ALTURA. ESTE EFECTO ES CAUSADO PROBABLEMENTE POR LA ASIMETRIA DE LA DISTRIBUCION DE LA EXCITACION A LO LARGO DE LA MEMBRANA BASILAR, Y POR LA RESPUESTA NEURAL NO-LINEAL. UN CAMBIO EN LA INTENSIDAD CAUSA TRASLACION DEL

PUNTO CENTRAL DE EXCITACION, PRODUCIENDO UN CAMBIO EN LA SENSACION DEL GRADO DE ALTURA PRIMARIO.

CONVIENE, AHORA, REGRESAR A LA PREGUNTA FORMULADA EN LA SECCION 4.4.: SI UN TONO PURO DE INTENSIDAD Y FRECUENCIA DADAS PRODUCE UNA OSCILACION RESONANTE EN LA MEMBRANA BASILAR, QUE CUBRE UN RANGO ESPACIAL FINITO Δx , ¿CÓMO ES POSIBLE QUE SE OIGA UN SOLO GRADO DE ALTURA EN VEZ DE UNA SERIE COMPLETA DE GRADOS DE ALTURA, CORRESPONDIENTES A LAS DIVERSAS POSICIONES A LO LARGO DE Δx QUE HAN SIDO ACTIVADAS? SE CREE QUE ESTA SENSACION DE UN UNICO GRADO DE ALTURA ES, EN PARTE, EL RESULTADO DE UN MECANISMO AGUDIZANTE EN LA RED NERVIOSA PERIFERICA. ESTE MECANISMO OPERA EN OTROS SISTEMAS SENSORIALES. PROBABLEMENTE FUNCIONA COMO SIGUE: LOS IMPULSOS QUE VIAJAN A TRAVES DE LAS FIBRAS AFERENTES, QUE RECOLECTAN INFORMACION DE LAS CELULAS CAPILARES LOCALIZADAS EN LA REGION ESTIMULADA DE LA MEMBRANA BASILAR, SE RAMIFICAN Y TRANSFIEREN A FIBRAS VECINAS A TRAVES DE INTERNEURONAS, QUE PUEDEN ACTUAR EXCITATORIA O INHIBITORIA. SI ACTUAN DE ESTA ULTIMA MANERA, SE DETERIORA LA TRANSMISION DE SEÑALES PROVENIENTES DE REGIONES QUE RODEAN A LA DE MAXIMA EXCITACION. EL RESULTADO NETO CONSISTE EN UNA CONCENTRACION O ENCAUZAMIENTO DE ACTIVIDAD HACIA UN NUMERO LIMITADO DE FIBRAS NERVIOSAS, RODEADAS DE UN ANILLO DE INHIBICION NEURAL, LO CUAL SE PERCIBE COMO UNA UNICA SENSACION DE GRADO DE ALTURA PRIMARIO.

FINALMENTE SE DEBIERA MENCIONAR QUE, EN LA RED NERVIOSA PERIFERICA DEL SISTEMA VISUAL, SE HAN DESCUBIERTO NEURONAS QUE RESPONDEN SOLO A CAMBIOS TEMPORALES EN EL ESTIMULO ORIGINAL. COMO SE ESPERA UN COMPORTAMIENTO SIMILAR EN EL SISTEMA AUDITIVO, SE PUEDE ENTREVER LA EXISTENCIA DE UN MECANISMO PARA LA PERCEPCION DIRECTA DE CARACTERISTICAS TRANSITORIAS DE LOS TONOS MUSICALES. ESTO DEBIERA SER DE GRAN IMPORTANCIA EN LA PERCEPCION DEL TIMBRE.

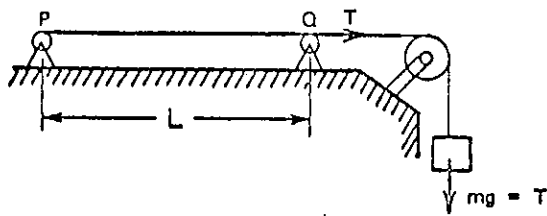
CAPITULO 6 TONOS COMPLEJOS Y PERCEPCION DEL TIMBRE

EN LOS CAPITULOS PRECEDENTES SE HAN ANALIZADO LOS DOS ATRIBUTOS PRINCIPALES DE UN TONO: GRADO DE ALTURA Y VOLUMEN; SOBRE LA BASE DEL ESTUDIO DE TONOS Puros DE UNA SOLA FRECUENCIA. SIN EMBARGO, ESTOS NO SON LOS TONOS QUE JUEGAN UN PAPEL ACTIVO EN LA MUSICA. LA MUSICA ESTA COMPUESTA DE TONOS COMPLEJOS, CADA UNO DE LOS CUALES CONSISTE EN LA SUPERPOSICION DE TONOS Puros, COMBINADOS DE UNA MANERA ESPECIAL PARA QUE EL OYENTE LOS PERCIBA COMO UNA UNIDAD. ASI EMERGE UN TERCER ATRIBUTO TONAL FUNDAMENTAL: LA CALIDAD DEL TONO, O TIMBRE, RELACIONADO CON LA CLASE DE MEZCLA DE SONIDOS Puros, O COMPONENTES ARMONICOS, DE UN TONO COMPLEJO.

LA MAYORIA DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES GENERAN ONDAS SONORAS POR MEDIO DE CUERDAS VIBRANTES O COLUMNAS DE AIRE. ESTOS USUALMENTE SE CONSIDERAN COMO LOS ELEMENTOS VIBRANTES PRIMARIOS. LA ENERGIA NECESARIA PARA MANTENER SU VIBRACION ES PROVISTA POR UN MECANISMO DE EXCITACION, Y LA SALIDA FINAL DE ENERGIA ACUSTICA ES CONTROLADA POR UN RESONADOR. LA HABITACION O SALA DE CONCIERTOS EN LA QUE EL INSTRUMENTO MUSICAL ESTA SIENDO TOCADO, PUEDE SER CONSIDERADA COMO UNA "EXTENSION" NATURAL DEL INSTRUMENTO MISMO, QUE JUEGA UN PAPEL SUSTANCIAL EN CONFORMAR EL SONIDO QUE EN REALIDAD LLEGA AL OIDO DEL OYENTE.

6.1 ONDAS ESTACIONARIAS EN UNA CUERDA

CONSIDERESE EL CASO DE UNA CUERDA TENSA, ANCLADA EN LOS PUNTOS FIJOS P Y Q (FIG. 6.1), DE LONGITUD L Y MASA POR UNIDAD DE LONGITUD, μ . LA CUERDA ESTA ESTIRADA CON UNA FUERZA CADA T QUE PUEDE SER CAMBIADA A VOLUNTAD, P.EJ., CAMBIANDO LA MASA m DE UN CUERPO SUSPENDIDO DE LA CUERDA COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA 6.1. SI AHORA SE PUNTEA O GOLPEA LA CUERDA EN UN PUNTO DADO, SE VAN A PROPAGAR DOS ONDAS TRANSVERSALES ELASTICAS, UNA HACIA LA IZQUIERDA Y OTRA HACIA LA DERECHA, ALEJANDOSE DE LA REGION DE PERTURBACION INICIAL. CUANDO ESTOS PULSOS DE ONDAS LLEGUEN A LOS PUNTOS ANCLADOS P Y Q, SE VAN A REFLEJAR: UN PULSO POSITIVO O HACIA ARRIBA REGRESARA COMO UNO NEGATIVO O HACIA ABAJO, Y VICEVERSA. DESPUES DE ALGUN TIEMPO (EXTREMADAMENTE CORTO, CONSIDERANDO LA GRAN VELOCIDAD DE LAS ONDAS EN UNA CUERDA TENSA), HABRAN ONDAS VIAJANDO EN AMBAS DIRECCIONES SIMULTANEAMENTE A LO LARGO DE LA CUERDA. EN OTRAS PALABRAS, SE VA A TENER ENERGIA DE ONDAS ELASTICAS ATRAPADA EN LA CUERDA, ENTRE P Y Q, MIENTRAS ESTOS ULTIMOS PUNTOS PERMANECERAN EN REPOSO. SI NO HUBIERA PERDIDAS, ESTA SITUACION CONTINUARIA PARA SIEMPRE Y LA CUERDA VIBRARIA INDEFINIDAMENTE. SIN EMBARGO, LA FRICCION Y LOS ESCAPES A TRAVES DE P Y Q, EVENTUALMENTE DISIPAN LA ENERGIA ALMACENADA, Y LAS ONDAS DECAEN. POR AHORA, NO SE TOMARA EN CUENTA ESTA DISIPACION.



Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 6.1

LA SITUACION DESCRITA ANTERIORMENTE ES MUY SIMILAR A LA DE UNA ONDA ESTACIONARIA. DE HECHO, SE PUEDE DEMOSTRAR MATEMATICAMENTE QUE LAS ONDAS ESTACIONARIAS SON LA UNICA FORMA DE VIBRACION ESTABLE QUE ES POSIBLE PARA UNA CUERDA CON EXTREMOS FIJOS, CON LOS PUNTOS ANCLADOS P Y Q ACTUANDO COMO NODOS.

ESTO TIENE UNA CONSECUENCIA MUY IMPORTANTE. ENTRE TODAS LAS FORMAS IMAGINABLES DE ONDAS ESTACIONARIAS, SOLO SON POSIBLES AQUELLAS CUYOS NODOS ESTAN EN P Y EN Q. EN OTRAS PALABRAS, SOLO SE PERMITEN LAS ONDAS ESTACIONARIAS SINUSOIDALES QUE CABEN UN NUMERO ENTERO DE VECES ENTRE P Y Q (FIG. 6.2), I.E., PARA LAS CUALES LA LONGITUD DE LA CUERDA ES UN MULTIPLO ENTERO DE LA DISTANCIA ENTRE NODOS λ_n .

TOMANDO EN CUENTA ESTA RELACION, SE OBTIENE LA CONDICION:

$$L = n\lambda_n = \frac{n\lambda}{2}$$

DONDE n ES CUALQUIER ENTERO POSITIVO. ESTO INDICA QUE SOLO LAS LONGITUDES DE ONDA

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

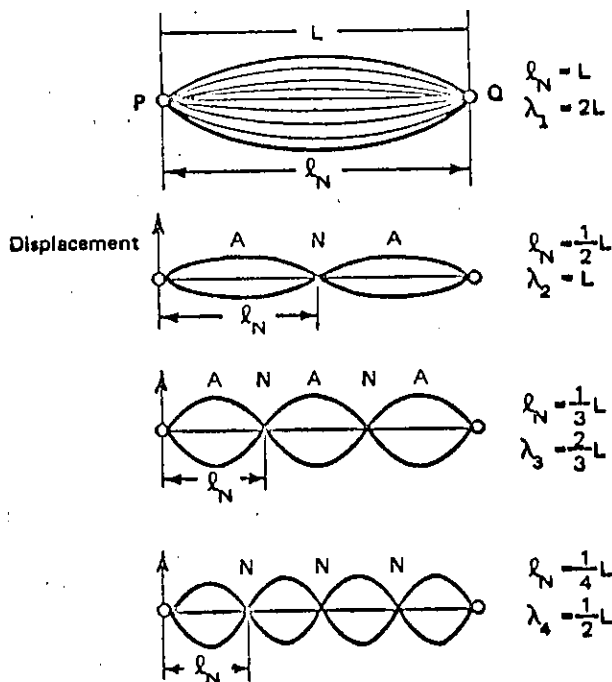
SON PERMITIDAS (FIG. 6.2.). SE ENCUENTRA, TAMBIEN, QUE UNA CUERDA SOLO PUEDE VIBRAR CON LAS SIGUIENTES FRECUENCIAS:

$$f_n = \frac{1}{\lambda_n} \sqrt{\frac{T}{d}} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{d}} = n f_1$$

LA MENOR FRECUENCIA POSIBLE SE OBTIENE PARA $n=1$:

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{d}}$$

ESTA SE LLAMA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE LA CUERDA. NOTESE QUE TODAS LAS OTRAS FRECUENCIAS POSIBLES, f_n , SON MULTIPLOS ENTEROS DE



Modos de una onda estacionaria en una cuerda vibrante. Según Roederer, J.G.

Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 6.2

LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL. SE LES LLAMA ARMONICAS SUPERIORES DE f_1 . EN PARTICULAR, SE OBSERVA QUE LA PRIMERA ARMONICA ($n=1$) ES IDENTICA A LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL; LA SEGUNDA, f_2 , ES LA OCTAVA SUPERIOR DE f_1 , LA TERCERA ES LA DOCEAVA (UNA QUINTA ARRIBA DE LA OCTAVA); LA CUARTA ARMONICA ES LA QUINCEAVA (OCTAVA DOBLE); ETC. (FIG. 6.3). LAS ARMONICAS SUPERIORES TAMBIEN SE LLAMAN SOBRETONOS.

LA RELACION MENCIONADA QUE DESCRIBE A f_1 INDICA QUE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE LA OSCILACION DE UNA CUERDA ES PROPORCIONAL A SU LONGITUD Y A LA RAIZ CUADRADA DE SU MASA POR SU UNIDAD DE LONGITUD. ESTO EXPLICA MUCHAS CARACTERISTICAS DE LAS CUERDAS DE UN PIANO. POR EJEMPLO, PARA LA PARTE SUPERIOR DEL TECLADO, LAS CUERDAS SON MAS PEQUEÑAS (FRECUENCIA FUNDAMENTAL MAS ALTA, f_1). ADEMÁS, SI ES NECESARIO AFINAR UNA CUERDA CADA PARA QUE QUEDE UN POCO MAS AGUDA SE TIENE QUE AUMENTAR LA TENSION (f_1 MAS ALTA). POR EL CONTRARIO, EN LA REGION DE GRADO DE ALTURA BAJO, PARA PODER GUARDAR ESPACIO Y MAXIMIZAR LA SALIDA DE POTENCIA, EN VEZ DE AUMENTAR LA LONGITUD DE LA CUERDA, SU MASA POR UNIDAD DE LONGITUD, λ , ES AUMENTADA (BAJANDO f_1) AL RODEAR LA CUERDA CON ALAMBRE ADICIONAL. EN EL VIOLIN, DONDE SOLO HAY CUATRO CUERDAS DE APROXIMADAMENTE LA MISMA LONGITUD, CADA UNA DEBE TENER DIFERENTE TENSION Y/C MASA PARA PRODUCIR UN GRADO DE ALTURA



First Eight Harmonics of $f_1 = 98 \text{ Hz (G}_2\text{)}$

Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Vergel.

FIGURA 6.3

BASICAMENTE DISTINTO. PARA VARIAR LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL f_1 DE UNA CUERDA DADA, SE CAMBIA SU LONGITUD VIBRANTE L AL PRESIONAR LA CUERDA CONTRA EL MANGO DEL VIOLIN, INTRODUCIENDO, ASI, UN NODO EN EL PUNTO DE CONTACTO.

LA APARICION, DE MANERA NATURAL, DE FRECUENCIAS QUE SON MULTIPLOS ENTEROS DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL RECIBE EL NOMBRE DE CUANTIZACION Y JUEGA UN PAPEL MUY IMPORTANTE EN TODAS LAS RAMAS DE LA FISICA. LAS DISTINTAS FORMAS DISCRETAS POSIBLES DE LA VIBRACION DE UN SISTEMA FISICO SE LLAMAN SUS MODOS DE VIBRACION. LA FUNDAMENTAL, LA OCTAVA, LA QUINTA, ETC., SON RESPECTIVAMENTE EL PRIMER MODO, SEGUNDO MODO, TERCER MODO, ETC., DE LA VIBRACION DE UNA CUERDA TENSA. TODAS LAS FRECUENCIAS DE LOS POSIBLES MODOS DE VIBRACION DE UNA CUERDA ESTAN DADAS POR LA RELACION:

$$f_n = \frac{1}{\lambda_n} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

YA MENCIONADA. EN ESTA RELACION SOLO APARECEN CANTIDADES QUE DEPENDEN DE LA CUERDA: LOS MODOS DE VIBRACION CONSTITUYEN, ENTONCES, UNA CARACTERISTICA PERMANENTE DEL SISTEMA FISICO PARTICULAR EN EL QUE SE TRABAJE. PERO, DADA UNA CUERDA, ¿EN CUALES DE LOS MODOS POSIBLES VA A VIBRAR REALMENTE? ESTO ESTA DETERMINADO POR LA MANERA EN LA QUE SE INICIAN LAS VIBRACIONES, I.E., POR EL MECANISMO PRIMARIO DE EXCITACION. DEBIDO A LA CAPACIDAD DE SUPERPOSICION LINEAL DE LAS ONDAS, VARIOS MODOS DISTINTOS PUEDEN OCURRIR SIMULTANEAMENTE SIN PERTURBARSE ENTRE SI.

LA RELACION ANTERIOR PARA f_n , ES UNA APROXIMACION, ESPECIALMENTE PARA LOS MODOS DE ORDEN SUPERIOR. ESTO SE DEBE A QUE LA VELOCIDAD DE UNA ONDA TRANSVERSAL EN UNA CUERDA SI DEPENDE LIGERAMENTE DE LA FRECUENCIA (O LONGITUD DE ONDA) DE LA ONDA (LO CUAL SE LLAMA DISPERSION) Y ADEMAS, A QUE LAS EXPRESIONES $v_T = \sqrt{T/\mu}$ Y $\lambda = (v/f)\sqrt{T/\mu}$ NO SON COMPLETAMENTE CORRECTAS. EN REALIDAD, LA VELOCIDAD DE ONDA v_T ES LIGERAMENTE MAYOR QUE $\sqrt{T/\mu}$. ESTA

DESVIACION AUMENTA AL AUMENTAR LA DISTORSION DE LA CUERDA, I.E., SE VUELVE MAS NOTORIA PARA LONGITUDES DE ONDAS PEQUEÑAS Y AMPLITUDES GRANDES. EL RESULTADO CONSISTE EN QUE LAS FRECUENCIAS REALES DE LOS MODOS DE VIBRACION SUPERIORES DE UNA CUERDA DE PIANO, SON UN POCO MAS QUE LOS VALORES DADOS POR LA RELACION. EN GENERAL, CUANDO LAS FRECUENCIAS DE LOS MODOS DE VIBRACION SUPERIORES DE UN SISTEMA NO SON MULTIPLOS ENTEROS DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL, LOS MODOS SE LLAMAN NO-ARMONICOS. LOS OBJETOS SOLIDOS VIBRANTES QUE NO SON CUERDAS, P.EJ., XILOFONO, CAMPANAS Y OTRAS CLASES DE TUBOS SONOROS, TIENEN MUCHOS MODOS DE VIBRACION NO-ARMONICOS, CUYAS FRECUENCIAS NO SON MULTIPLOS ENTEROS DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL. EN LO QUE SIGUE, SE ASUME, POR SIMPLICIDAD, QUE LOS SOBRETONOS DE UNA CUERDA VIBRANTE SI COINCIDEN CON LAS ARMONICAS SUPERIORES Y QUE LA RELACION $f_n = n f_1$ ES ABSOLUTAMENTE CORRECTA.

6.2 ONDAS ESTACIONARIAS EN DOS DIMENSIONES: VIBRACION DE UNA MEMBRANA.

SE CONSIDERA UNA MEMBRANA RECTANGULAR ESTIRADA SOBRE UN MARCO DE MODO QUE SUS BORDES ESTEN FIJOS. SI LA SUPERFICIE DE LA MEMBRANA SE PERTURBA, SE PRODUCEN ONDAS QUE SE PROPAGAN EN TODAS DIRECCIONES Y SE REFLEJAN EN LOS BORDES; ORIGINANDO INTERFERENCIA. SE CONSIDERARA EL CASO ESPECIAL EN QUE SE GENERAN ONDAS PLANAS DE UNA SOLA FRECUENCIA EN LA MEMBRANA. ADEMAS SE SUPONE QUE ESTAS ONDAS SE PROPAGAN PARALELAMENTE A CADA LADO DEL MARCO, COMO SE INDICA EN LA FIGURA 6.4. EN LUGAR DE NODOS Y ANTINODOS SE OBTIENEN LINEAS NODALES Y LINEAS ANTINODALES O VENTRALES, QUE SE DESIGNAN POR \cap Y \vee EN LA FIG. 6.4. EN LA FIG. 6.4 (A), LA MEMBRANA ESTA FIJA A LA IZQUIERDA ($x=0$) Y A LA DERECHA ($x=a$), PERO LOS OTROS DOS LADOS ESTAN LIBRES. LAS ONDAS SE PROPAGAN SEGUN EL EJE X EN AMBOS SENTIDOS, CON LO CUAL RESULTA UN SISTEMA DE LINEAS NODALES Y ANTINODALES PARALELAS AL EJE Y. EN $x=0$ Y $x=a$ SE DEBEN TENER LINEAS NODALES, POR LO QUE LA CONDICION PARA ONDAS ESTACIONARIAS ES:

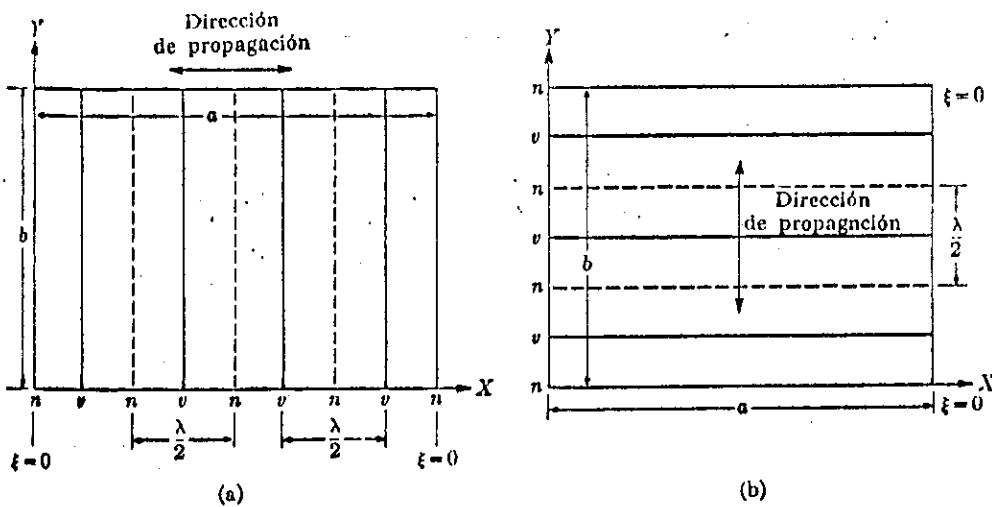
$$ka = n\pi \quad \text{ó} \quad \lambda = \frac{2a}{n} \quad (1)$$

LAS FRECUENCIAS CORRESPONDIENTES SON:

$$v = \frac{v}{\lambda} = n \left(\frac{v}{2a} \right) \quad (2)$$

DONDE v ES LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LAS ONDAS EN LA SUPERFICIE DE LA MEMBRANA, CUYA DEDUCCION SE HARA EN EL APENDICE C.3. ESTAS ONDAS SE DESCRIBEN POR LA SIGUIENTE EXPRESION:

$$z = A \sin kx \sin \omega t$$



Ondas estacionarias en una membrana.

Según Alonso, M., y E. J. Fim. Física:
Volumen II. Fondo Educativo, S.A.

FIGURA 6.4

QUE ES LA SOLUCION DE LA ECUACION DIFERENCIAL QUE REGULA LA PROPAGACION DE UNA ONDA:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 g}{\partial t^2}$$

LA ADICION DE LA SEGUNDA DIMENSION NO HA CAMBIADO LAS CONDICIONES DE CONFINAMIENTO, QUE SIGUEN SIENDO $g = 0$ PARA $x = 0$ Y $x = a$. LA SIMETRIA SUGIERE QUE LA COORDENADA y NO DESEMPEÑA NINGUN PAPEL HASTA TANTO NO SE FIJE LA MEMBRANA A LO LARGO DE LOS LADOS PARALELOS A LA DIRECCION DE PROPAGACION.

EN LA FIG. 6.4 (B) LA MEMBRANA ESTA FIJA ABAJO, ($y = 0$) Y ARRIBA ($y = b$). PARA LAS ONDAS QUE SE PROPAGAN PARALELAS AL EJE, LAS LINEAS NODALES Y ANTINODALES SON PARALELAS AL EJE. LA CONDICION PARA LAS ONDAS ESTACIONARIAS ES SIMILAR A LA ECUACION (1), REEMPLAZANDO a POR b , OBTENIENDOSE:

$$kb = n\pi \quad \text{o} \quad \lambda = \frac{2b}{n} \quad (3)$$

CON FRECUENCIAS:

$$v = \frac{v}{\lambda} = n \cdot \left(\frac{v}{2b} \right) \quad (4)$$

QUE SON DIFERENTES DE LAS DADAS EN LA EC. (2) PARA ONDAS PARALELAS AL EJE X. LA ECUACION PARA LAS ONDAS ESTACIONARIAS ES:

$$\xi = A \sin k_y \sin \omega t$$

(ALONSO Y FINN, FISICA, VOLUMEN II). A CONTINUACION SE CONSIDERARA UNA MEMBRANA CON SUS CUATRO LADOS FIJOS Y ONDAS PLANAS PROPAGANDOSE EN UNA DIRECCION ARBITRARIA SOBRE SU SUPERFICIE. SE RECORDARA PRIMERO QUE UNA ONDA PLANA EN DOS DIMENSIONES, HACIENDO $z = 0$. EN LA ECUACION, GLECA:

$$\xi = \xi_0 \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) = \xi_0 \sin(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)$$

QUE DA:

$$\xi = \xi_0 \sin[\omega t - (k_x x + k_y y)]$$

DONDE SE HA SEGUIDO LA CONVENCION DE ESCRIBIR EL FACTOR DE TIEMPO PRIMERO. LAS CANTIDADES k_1 Y k_2 SON LAS COMPONENTES EN EL PLANO XY DEL VECTOR \vec{k} , PARALELO A LA DIRECCION DE PROPAGACION Y DE LONGITUD $k = 2\pi/\lambda = \omega/v$. ENTONCES:

$$k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (5)$$

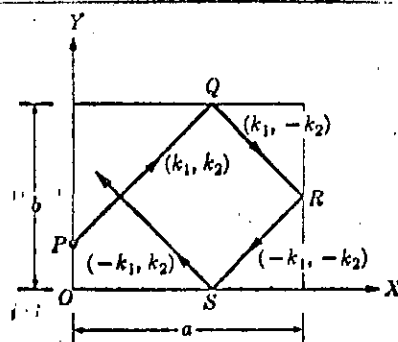
PARA UN RAYO PQ (FIG. 6.5), CARACTERIZADO POR LAS COMPONENTES k_1 Y k_2 , HAY UN RAYO REFLEJADO QR CARACTERIZADO POR k_1 Y $-k_2$. DE R A S EL RAYO ESTA CARACTERIZADO POR $-k_1$, $-k_2$; Y DE S EN ADELANTE EL RAYO ESTA CARACTERIZADO POR LAS COMPONENTES $-k_1$, k_2 . SE PUEDE CONCLUIR ENTONCES QUE A LO LARGO DE LA MEMBRANA HAY UN SISTEMA DE CUATRO ONDAS, DEBIDAS A LA REFLEXION EN LOS CUATRO LADOS. (ESTO ES DIFERENTE DE LOS PROBLEMAS EN UNA DIMENSION, EN LOS CUALES SOLU APARECEN DOS ONDAS). ESTAS CUATRO ONDAS DEBEN INTERFERIR DE TAL MODO QUE, PARA $x = 0$ Y $x = a$, Y PARA $y = 0$ E $y = b$, EL VALOR RESULTANTE DE ξ SEA CERO. UN PROCEDIMIENTO ALGEBRAICO DIRECTO MUESTRA (VER APENDICE C.4) QUE LOS VALORES DE k_1 Y k_2 SATISFACEN LAS CONDICIONES:

$$k_1 a = n_1 \pi \quad \text{ó} \quad k_1 = \frac{n_1 \pi}{a} \quad (6)$$

Y

$$k_2 b = n_2 \pi \quad \text{ó} \quad k_2 = \frac{n_2 \pi}{b}$$

DONDE n_1 Y n_2 SON ENTEROS. ENTONCES SEGUN LA ECUACION (5), SE



Reflexiones sucesivas de una onda en una membrana rectangular.

Según Alonso, M., y E.J. Finn. Física: Volumen II. Fondo Educativo, S.A.

FIGURA 6.5

OBTIENE:

$$k = \pi \sqrt{\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2}} \quad (7)$$

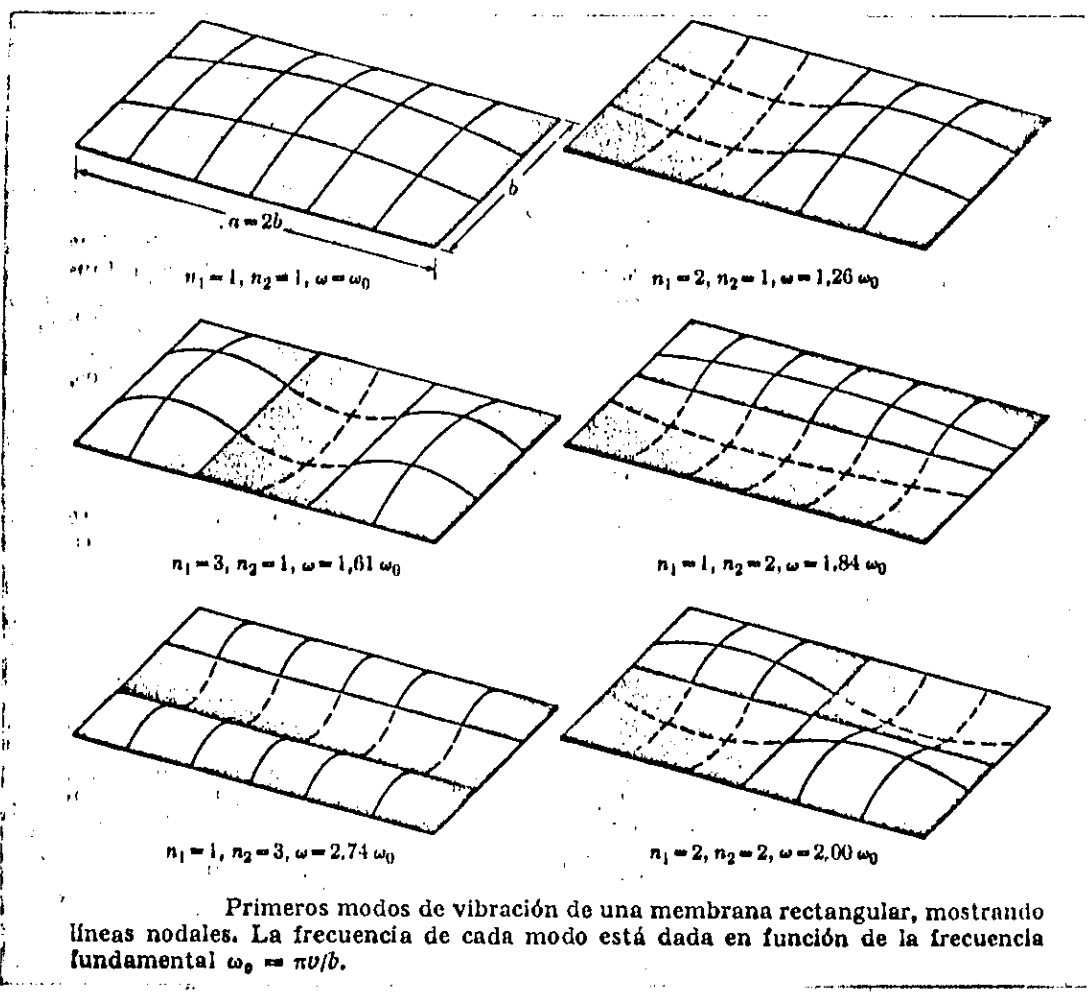
Y PARA LAS POSIBLES FRECUENCIAS SE TIENE:

$$\omega = \frac{v}{2} \sqrt{\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2}} \quad (8)$$

SE PUEDE NOTAR QUE LAS POSIBLES FRECUENCIAS YA NO SON MULTIPLCS DE UNA FRECUENCIA FUNDAMENTAL, SINO QUE SIGUEN UNA SECUENCIA MAS IRREGULAR. LAS POSIBLES LONGITUDES DE ONDA ESTAN DADAS POR:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2}} \quad (9)$$

EL DIAGRAMA DE LINEAS MODALES, OBTENIDO DE LA ECUACION (9), ESTÁ DADO POR $k_{1x} = n_1 \pi$ Y $k_{2y} = n_2 \pi$, DONDE n_1 Y n_2 SON ENTEROS MENORES QUE n_1 Y n_2 RESPECTIVAMENTE, Y FORMAN LOS DIAGRAMAS RECTANGULARES QUE SE MUESTRAN EN LA FIGURA 6.6.



Según Alonso, M. y E.J. Finn. Física:
 Volumen II. Fondo Educativo, S.A.

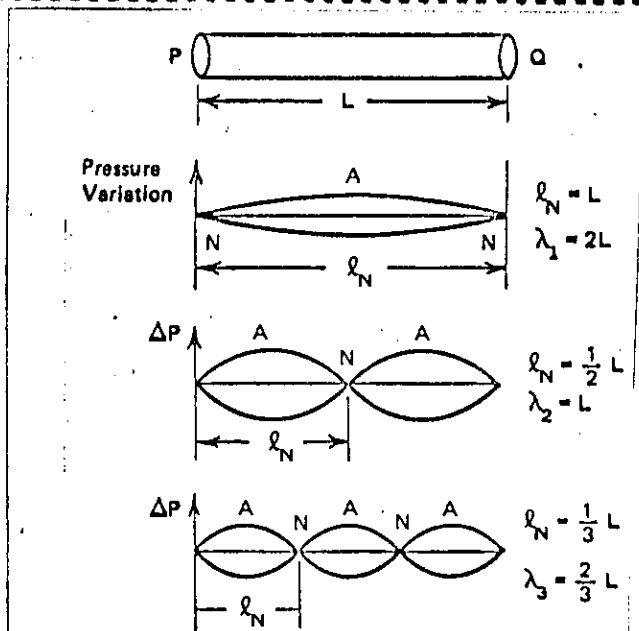
FIGURA 6.6

6.3 ONDAS LONGITUDINALES ESTACIONARIAS EN UNA COLUMNA DE AIRE IDEAL.

RESULTA INTERESANTE CONSIDERAR, AHORA, UN CILINDRO LARGO Y MUY ANGOSTO, ABIERTO EN AMBOS EXTREMOS (FIG. 6.7). EL AIRE DEL INTERIOR PUEDE SER CONSIDERADO COMO UN MEDIO ELASTICO UNIDIMENSIONAL, A TRAVES DEL CUAL SE PUEDEN PROPAGAR ONDAS LONGITUDINALES. EN CUALQUIER PUNTO DENTRO DEL CILINDRO, SE PUEDE PERMITIR QUE LA PRESION AUMENTE, DISMINUYA, U OSCILE CONSIDERABLEMENTE CON RESPECTO A LA PRESION ATMOSFERICA EXTERNA; PUES LAS PAREDES RIGIDAS Y LA INERCIA DEL RESTO DE LA COLUMNA DE AIRE SE ENCARGAN DE MANTENER EL BALANCE NECESARIO PARA LAS FUERZAS QUE APARECEN DEBIDO A LA DIFERENCIA DE PRESIONES. SIN EMBARGO, EN LOS PUNTOS P Y Q, NO SE PERMITEN GRANDES VARIACIONES DE PRESION, NI SIGUIERA DURANTE EL MAS PEQUEÑO INTERVALO DE TIEMPO, PUES NO

HAY NADA ALLI PARA BALANCEAR LAS DIFERENCIAS CRECIENTES DE PRESION. ESTOS PUNTOS DEBEN, POR LO TANTO, JUGAR EL PAPEL DE NODOS DE PRESION Y, CUALQUIER ONDA SONORA CAUSADA POR UNA PERTURBACION DENTRO DEL TUBO Y PROPAGANDOSE A LO LARGO DE ESTE, VA A SER REFLEJADA EN CUALQUIERA DE LOS EXTREMOS ABIERTOS. ESTA ES UNA SITUACION QUE ES FORMALMENTE ANALOGA A LA DE LA CUERDA VIBRANTE: LAS ONDAS SONORAS GENERADAS EN EL TUBO PERMANECEN ATRAPADAS ADENTRO DE EL Y LOS UNICOS MODOS DE VIBRACION POSIBLES SON LAS ONDAS LONGITUDINALES ESTACIONARIAS CON NODOS DE PRESION EN LOS EXTREMOS ABIERTOS P Y Q. (FIG. 6.7). LOS PUNTOS EXTREMOS SON TAMBIEN ANTI-NODOS DE DESPLAZAMIENTO; I.E., PUNTOS CON AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA.

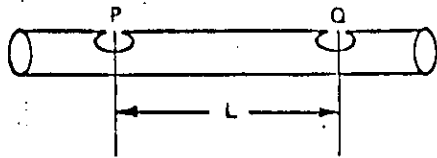
LA COLUMNA ABIERTA DE AIRE NO NECESARIAMENTE TIENE QUE ESTAR DEFINIDA FISICAMENTE DE LA MANERA DESCRITA EN LA FIGURA 6.7. POR EJEMPLO, LA FIGURA 6.8 MUESTRA UNA COLUMNA DE AIRE ABIERTA COMPRENDIDA ENTRE LOS PUNTOS P Y Q DE UN TUBO.



Modos de ondas estacionaria (variaciones de presión) en un tubo cilíndrico ideal, abierto en ambos extremos. Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and

Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 6.7



Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 6.8

DE HECHO, COMO HAY AGUJEROS EN P Y Q, LA PRESION DEL AIRE EN ESTOS PUNTOS DEBE PERMANECER CONSTANTE E IGUAL A LA PRESION EXTERNA. POR LO TANTO, LOS PUNTOS P Y Q JUEGAN EL PAPEL DE EXTREMOS ABIERTOS DE LA COLUMNA DE AIRE. LA FIGURA 6.8 CORRESPONDE AL CASO DE UNA FLAUTA IDEALIZADA, DONDE P ES LA ABERTURA DE LA BOQUILLA Y Q ES EL PRIMER AGUJERO.

EN UN TUBO ABIERTO REAL DE DIAMETRO FINITO, LOS NODOS DE PRESION NO OCURREN EXACTAMENTE EN LOS EXTREMOS ABIERTOS, SINO QUE PEGUENA DISTANCIA FUERA DE ELLOS. POR ESTO, LAS RELACIONES QUE SIGUEN SON SOLO PRIMERAS APROXIMACIONES.

DE LA FIGURA 6.7 Y LA RELACION $v_L = 20.1 \sqrt{t_A}$, OBTENEMOS LAS FRECUENCIAS DE LOS MODOS DE VIBRACION DE UN TUBO CILINDRICO ABIERTO:

$$f_n = \frac{n}{2L} 20.1 \sqrt{t_A} = n f_1 \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

SIENDO LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL

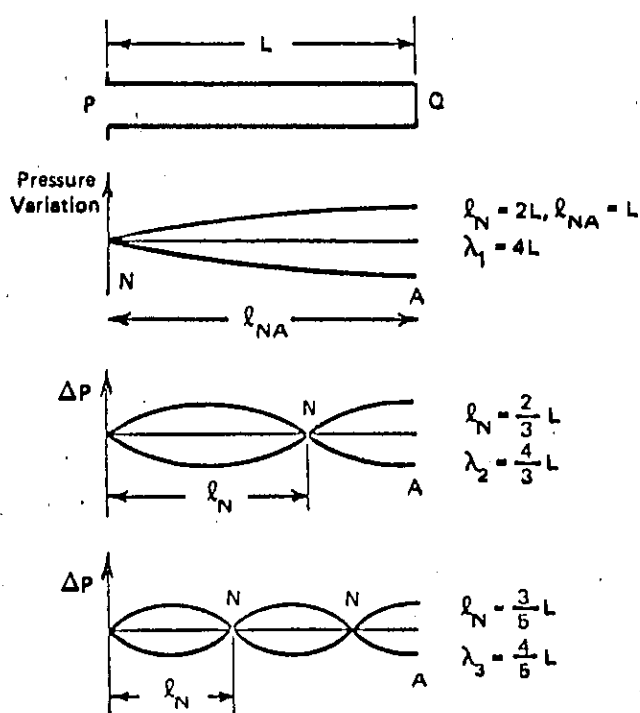
$$f_1 = \frac{10.05}{L} \sqrt{t_A}$$

CONVIENE RECORDAR QUE t_A ES LA TEMPERATURA ABSOLUTA DEL AIRE DENTRO DEL TUBO. EN AMBAS ECUACIONES, L DEBE ESTAR EXPRESADA EN METROS. TOMANDO EN CUENTA QUE LA LONGITUD DE ONDA λ DEL TONO FUNDAMENTAL ESTA RELACIONADA CON LA LONGITUD L DEL TUBO POR MEDIO DE LA RELACION $\lambda = 2L$ (FIG. 6.7), E INSPECCIONANDO LA FIGURA 5.7, SE PUEDE OBTENER UNA IDEA DE LAS LONGITUDES TÍPICAS DE TUBOS DE ORGANO Y DE FLAUTAS, COMO UNA FUNCION DE LA FRECUENCIA. UN AUMENTO DE LA FRECUENCIA (GRADO DE ALTURA) REQUIERE UNA DISMINUCION DE LA LONGITUD. LA RELACION QUE DEFINE A f_1 TAMBIEN MUESTRA EL EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE SOBRE EL GRADO DE ALTURA FUNDAMENTAL DE UNA COLUMNA DE AIRE CILINDRICA Y VIBRANTE. UN AUMENTO DE LA TEMPERATURA CAUSA UN AUMENTO DE LA FRECUENCIA (UN TONO MAS AGUDO). POR LO TANTO, LAS FLAUTAS Y LOS TUBOS DE ORGANO DEBEN SER AFINADOS A LA TEMPERATURA A LA CUAL SE ESPERA QUE SEAN TOCADOS. AFORTUNADAMENTE, LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL f_1 ES CONTROLADA POR LA TEMPERATURA ABSOLUTA t_A QUE APARECE BAJO UNA RAIZ CUADRADA. AMBOS HECHOS HACEN QUE LA INFLUENCIA DE LAS

VARIACIONES DE TEMPERATURA SOBRE EL GRADO DE ALTURA SEA RELATIVAMENTE DEBIL, PERO SUFICIENTE COMO PARA PREOCUPAR A FLAUTISTAS Y ORGANISTAS.

CONSIDERESE AHORA EL CASO DE UN CILINDRO ANGUSTO CERRADO EN UN EXTREMO (FIG. 6.9). SE OBSERVA CLARAMENTE QUE, MIENTRAS QUE EN EL EXTREMO ABIERTO P LA PRESION DEBE PERMANECER CONSTANTE E IGUAL A LA DEL AIRE DEL EXTERIOR (NODO DE PRESION), EN EL EXTREMO CERRADO Q, LA PRESION INTERNA PUEDE AUMENTAR O DISMINUIR SIN RESTRICCIONES. DE HECHO, EN A SE FORMA UN ANTINODO DE PRESION. ESTO SE COMPRENDE MAS FACILMENTE AL CONSIDERAR EL MOVIMIENTO VIBRATORIO REAL DE LOS PUNTOS DEL MEDIO. OBLIVAMENTE, DEBE HABER UN NODO DE VIBRACION PARA TODAS LAS MOLECULAS DE AIRE QUE SE ENCUENTRAN CERCANAS A Q. LA "TAPADERA" DEL TUBO LES IMPIDE EFECTUAR UNA OSCILACION LONGITUDINAL DE IDA Y DE REGRESO. DE ACUERDO CON UNA DISCUSION PREVIA, UN NODO DE VIBRACION COMO ESTE CORRESPONDE A UN ANTINODO DE PRESION.

LA FIGURA 6.9 MUESTRA COMO LOS MODOS DE UNA ONDA ESTACIONARIA SE AJUSTAN A UN TUBO CERRADO, SATISFACIENDO LA CONDICION DE TENER UN NODO DE PRESION EN EL EXTREMO ABIERTO Y UN ANTINODO DE PRESION



Modo de una onda estacionaria en un tubo cilíndrico ideal, cerrado en un extremo. Según Roederer, J.G. Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Springer-Verlag.

FIGURA 6.9

EN EL EXTREMO TAPADO. PARA LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL SE ENCUENTRA LA RELACION:

$$f_1 = \frac{1}{4L} 20.1 \sqrt{t_A} = \frac{5.02}{L} \sqrt{t_A}$$

CON L EN METROS Y t_A LA TEMPERATURA ABSOLUTA. ESTA FRECUENCIA ES EXACTAMENTE LA MITAD DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE UN TUBO ABIERTO DE LA MISMA LONGITUD. EN OTRAS PALABRAS, UN TUBO CILINDRICO IDEAL TAPADO SUENA UNA OCTAVA MAS ABAJO QUE EL GRADO DE ALTURA DE UN TUBO SIMILAR ABIERTO EN AMBOS EXTREMOS.

CON RESPECTO A LOS MODOS SUPERIORES DE UN TUBO CILINDRICO TAPADO, UNA INSPECCION CUIDADOSA DE LA FIGURA 6.9 Y LA CONVERSION DE LONGITUDES DE ONDA A FRECUENCIAS REVELA QUE SOLO LOS MULTIPLOS IMPARES DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL f_1 SON PERMITIDOS:

$$f_1, f_3 = 3f_1, f_5 = 5f_1, \dots$$

LAS FRECUENCIAS $2f_1, 4f_1, 6f_1$, ETC. SON PROHIBIDAS; SUS MODOS NO PUEDEN SER SOSTENIDOS DE MANERA ESTABLE EN UN TUBO CILINDRICO TAPADO, IDEALMENTE ANGOSTO. EN OTRAS PALABRAS, LOS SOBRETONES DE UN TUBO TAPADO SON LAS ARMONICAS IMPARES DE SU FUNDAMENTAL.

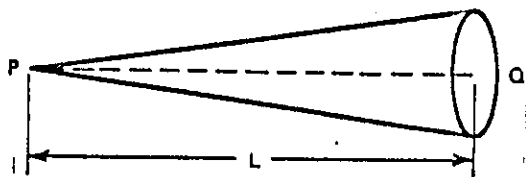
EL CLARINETE ES TAL VEZ EL EJEMPLO MAS CONOCIDO DE UN INSTRUMENTO QUE SE COMPORTA DE MANERA MUY SIMILAR A UN TUBO CILINDRICO TAPADO. LA BOQUILLA CON LA LENGUETA SE COMPORTA COMO EL EXTREMO CERRADO, Y LA CAMPANA O PRIMER AGUJERO ES EL EXTREMO ABIERTO. EL GRADO DE ALTURA FUNDAMENTAL DE UNA NOTA TOCADA EN EL CLARINETE REALMENTE SE ENCUENTRA UNA OCTAVA POR DEBAJO DE LA NOTA CORRESPONDIENTE A UNA COLUMNA DE AIRE DE LA MISMA LONGITUD, TOCADA EN UNA FLAUTA.

LOS ORGANOS CONTIENEN VARIOS RANGOS DE TUBOS TAPADOS. UNA DE LAS RAZONES ES EL AHORRO DE DINERO Y DE ESPACIO, PUES LOS TUBOS ABIERTOS PARA SONIDOS BAJOS SON MUY LARGOS. DE ACUERDO CON LA RELACION

$$f_1 = \frac{10.05}{L} \sqrt{t_A}$$

UN TUBO ABIERTO C, ES DE 5.3 M. DE ALTURA. EL MISMO TUBO, AL SER TAPADO, NECESITA SER DE 2.7 M DE LONGITUD. POR SUPUESTO, ES ALGO MAS QUE EL DINERO LO QUE HAY QUE TOMAR EN CONSIDERACION: UN TUBO TAPADO PRODUCE UNA CALIDAD DE SONIDO DISTINTA A LA DE UN TUBO ABIERTO DE LA MISMA FRECUENCIA FUNDAMENTAL.

EL ULTIMO CASO QUE ES NECESARIO DISCUTIR AQUI ES EL DE UN TUBO CONICO (MUY ANGOSTO), CERRADO EN EL EXTREMO P (FIG. 6.10) LA DETERMINACION DE LOS MODOS DE VIBRACION REQUIERE UN ANALISIS MATEMATICO RELATIVAMENTE COMPLEJO. LOS RESULTADOS PUEDEN SER RESUMIDOS DE MANERA BASTANTE SENCILLA: UN TUBO CONICO ANGOSTO IDEAL, TAPADO EN EL EXTREMO TIENE LOS MISMOS MODOS DE VIBRACION QUE UN TUBO ABIERTO DE LA MISMA LONGITUD. UN CONO TRUNCADO ANGOSTO (FIG. 6.11), CERRADO EN EL EXTREMO P, TIENE UNA SERIE DE MODOS DE VIBRACION QUE NO CUMPLEN CON LA RELACION DE LOS NUMEROS ENTEROS: EN EL RANGO INFERIOR DE FRECUENCIAS (CERCA DE LA



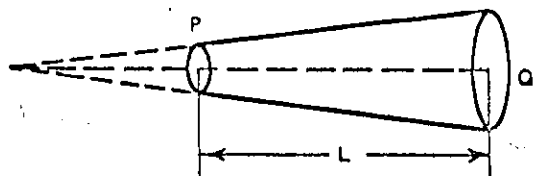
Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 6.10

FUNDAMENTAL), LOS MODOS CORRESPONDEN MUY CERCANAMENTE A LOS MODOS DE UN TUBO ABIERTO DE LA MISMA LONGITUD L , PERO PARA FRECUENCIAS MAS ALTAS, SE APROXIMAN A LOS DE UN TUBO CILINDRICO CERRADO DE LONGITUD L . EN OTRAS PALABRAS, LOS MODOS DE VIBRACION SON NO ARMONICOS.

6.4. PERCEPCION DEL GRADO DE ALTURA Y DEL TIMBRE DE TONOS MUSICALES.

A PESAR DE QUE SE HA HECHO UNA CONSIDERABLE CANTIDAD DE INVESTIGACION SOBRE LA PERCEPCION DEL GRADO DE ALTURA Y DEL VOLUMEN DE TONOS PUROS, RESTA MUCHO POR HACER EN LO QUE CONCIERNE AL ESTUDIO DE LA PERCEPCION DE TONOS COMPLEJOS. SE HA SABIDO DURANTE SIGLOS QUE EL TIMBRE DE UN TONO PUEDE MODIFICARSE REFORZANDO CIERTOS SOBRETONOS. DE HECHO, LA "SINTESIS TOTAL" GENUINA FUE LLEVADA A CABO POR LOS CONSTRUCTORES DE ORGANOS TUBULARES EN LOS SIGLOS XIII O XIV. POR LO TANTO, LA SINTESIS DEL SONIDO ES RELATIVAMENTE ANTIGUA. SIN EMBARGO, EL ANALISIS DEL SONIDO, I.E., LA INDIVIDUALIZACION DE ARMONICAS SUPERIORES QUE APARECEN SIMULTANEAMENTE EN UN TONO PRODUCIDO NATURALMENTE, NO FUE EXPLICITAMENTE MENCIONADA EN LA LITERATURA SINO HASTA 1636. FUE ENTONCES QUE EL NOTABLE MUSICO, CIENTIFICO Y FILOSOFO FRANCES,



Según Roederer, J.G. Introduction to the
Physics and Psychophysics of Music.
Springer-Verlag.

FIGURA 6.11

PERE MERSENNE, PUBLICO EL PRIMER ESTUDIO DEL ANALISIS (CUALITATIVO) DE LAS ARMONICAS SUPERIORES PRESENTES EN UN TONO COMPLEJO.

HACEN DOS PREGUNTAS BASICAS CONCERNIENTES CON LA PERCEPCION DE TONOS COMPLEJOS: (1) ¿ POR QUE ES QUE UN TONO COMPLEJO, COMPUESTO DE UNA SUPERPOSICION DE DIFERENTES FRECUENCIAS, DA LUGAR A UNA SOLA SENSACION DE GRADO DE ALTURA? (2) ¿ QUE ES LO QUE PERMITE DISTINGUIR ENTRE UN ESPECTRO TONAL Y OTRO, AUNQUE EL GRADO DE ALTURA Y EL VOLUMEN COINCIDAN?

CONVIENE REEXAMINAR EL PROCESO DE LA PERCEPCION DE UNA ONDA DE SONIDO COMPLEJA QUE INCIDE SOBRE EL TIMPANO. AL INCIDIR LA ONDA, EL TIMPANO SE MUEVE PERIODICAMENTE HACIA ADENTRO Y HACIA AFUERA CON UN PATRON DE VIBRACION DICTADO POR EL PATRON DE VIBRACION COMPLEJO Y NO SINUSOIDAL DE LA ONDA. ESTE MOVIMIENTO ES TRANSMITIDO MECANICAMENTE A LA MEMBRANA DE LA VENTANA OVAL POR LA CADENA DE HUESECILLOS. LA MEMBRANA REPRODUCE CASI EXACTAMENTE EL MISMO PATRON DE VIBRACION. EL TIMPANO Y LA CADENA DE HUESECILLOS NO "SABEN" QUE LA VIBRACION QUE ESTAN TRANSMITIENDO ESTA COMPUESTA DE UNA SUPERPOSICION DE ARMONICAS DISTINTAS. EL ANALISIS OCURRE EN LA SIGUIENTE ETAPA.

LA VIBRACION COMPLEJA DE LA MEMBRANA DE LA VENTANA OVAL DESENCADENA UNA SERIE DE ONDAS VIAJERAS EN EL FLUIDO COCLEAR. EN ESTE MOMENTO SE LLEVA A CABO LA SEPARACION EN COMPONENTES DE DIFERENTES FRECUENCIAS. COMO YA SE HA MENCIONADO, LA REGION DE RESONANCIA PARA UN COMPONENTE DADO DE FRECUENCIA (REGION DE LA MEMBRANA BASILAR DONDE LA ONDA VIAJERA CAUSA UNA EXCITACION MAXIMA) ESTA LOCALIZADA EN UNA POSICION QUE DEPENDE DE LA FRECUENCIA. UN TONO COMPLEJO DA LUGAR, POR LO TANTO, A UNA MULTIPLICIDAD DE REGIONES DE RESONANCIA, UNA PARA CADA ARMONICA. ESTAS REGIONES SE ACERCAN ENTRE SI, A MEDIDA QUE SE SUBE EN LA SERIE ARMONICA. COMO CADA REGION DE RESONANCIA NO ESTA CLARAMENTE DELIMITADA, SINO EXTENDIDA A LO LARGO DE CIERTA LONGITUD, OCURRE UN TRASLAPE ENTRE REGIONES VECINAS, ESPECIALMENTE EN EL CASO DE ARMONICAS MAS ALTAS. EN REALIDAD, MAS ALLA DE LA SEPTIMA ARMONICA, APROXIMADAMENTE, TODAS LAS REGIONES DE RESONANCIA SE TRASLAPAN, Y NO TIENE SENTIDO CONSIDERARLAS INDIVIDUALMENTE. CADA UNA DE ESTAS REGIONES DE LA MEMBRANA BASILAR OSCILA CON SU PROPIA FRECUENCIA DE RESONANCIA Y CON UNA FASE QUE ESTA RELACIONADA, PERO NO ES IGUAL, A LA FASE DE LA ARMONICA CORRESPONDIENTE (COMPONENTE DE FOURIER), PROVENIENTE DE LA OSCILACION ORIGINAL DEL TIMPANO. EL TRASLAPE, POR SUPUESTO, COMPLICA CONSIDERABLEMENTE, LA DESCRIPCION DEL FENOMENO.

DE LO ANTERIOR, SE OBSERVA QUE UN SOLO TONO COMPLEJO SUCEDE UNA REACCION EXTREMADAMENTE COMPLICADA EN LA COCLEA. ¿ POR QUE, ENTONCES, SE PERCIBE ESTE TONO COMO UNA ENTIDAD DE GRADO DE ALTURA, VOLUMEN Y TIMBRE BIEN DEFINIDOS? COMO SE HA EXPLICADO ANTERIORMENTE, SE CREE QUE ESTE FENOMENO ES EL RESULTADO DE UN PROCESO DE RECONOCIMIENTO DE UN PATRON ESPECIAL, I.E., UNA PERCEPCION AUDITIVA DE TIPO GESTAL. LA CARACTERISTICA DISTINTIVA QUE ES RECONOCIDA EN ESTE PROCESO, LA CUAL ES COMUN A TODOS LOS TONOS PERIODICOS SIN IMPORTAR LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL NI EL

ESPECTRO DE FOURIER QUE TENGAN, ES LA RELACION DE DISTANCIAS ENTRE LOS MAXIMOS DE RESONANCIA SOBRE LA MEMBRANA BASILAR. ESTA RELACION ES PRACTICAMENTE INVARIANTE. LA SENSACION DE GRADO DE ALTURA SE CONSIDERA COMO LA "SEÑAL FINAL DE SALIDA" DE ESTE PROCESO DE RECONOCIMIENTO. LOS COMPONENTES CRUCIALES DEL TONO QUE ACTIVAN EL PROCESADOR CENTRAL DE GRADOS DE ALTURA, RESPONSABLE DEL PROCESO DE RECONOCIMIENTO, SON LAS PRIMERAS SEIS A OCHO ARMONICAS. LAS RESONANCIAS DE ARMONICAS MAS ALTAS SE TRASLAPAN EN LA MEMBRANA BASILAR, Y LA RELACION DE DISTANCIA ENTRE ELLAS SE VUELVE AMBIGUA. EL MECANISMO DE RECONOCIMIENTO DEL PROCESADOR DE GRADOS DE ALTURA FUNCIONA ADECUADAMENTE AUNQUE FALTE PARTE DE LA ENTRADA (P.EJ., UNA FUNDAMENTAL SUPRIMIDA) PERO EN CIERTOS CASOS PUEDE DAR SENSACIONES AMBIGUAS O DE GRADOS DE ALTURA MULTIPLES.

EXISTE OTRA CARACTERISTICA INVARIANTE DEL PATRON DE EXCITACION ASOCIADO A UN TONO COMPLEJO: UN PAR DE COMPONENTES CONSECUTIVOS DE UNA SERIE ARMONICA PRODUCEN UNA RAZON DE REPETICION LOMON. AUNQUE HAY MENOS TRASLAPE ENTRE ARMONICAS DE MENOR ORDEN, LA RAZON DE REPETICION ESTA MEJOR DEFINIDA ENTRE ELLAS Y TODAS LAS NEURONAS PRIMARIAS CONECTADAS A LA REGION RELEVANTE DEBEN DESENCADENAR SECUENCIAS DE PULSOS QUE LLEVEN INFORMACION SOBRE ESTA RAZON DE REPETICION.

LA PERCEPCION DEL GRADO DE ALTURA DE UN TONO COMPLEJO ES SOLAMENTE UNO DE LOS RESULTADOS DE UNA SERIE DE PROCESOS COGNITIVOS. ES EL MECANISMO PSICOFISICO QUE TRANSFORMA EL PATRON DE ACTIVIDAD PERIFERICA EVOCADO POR UN TONO MUSICAL O POR UN SONIDO VOCAL EN OTRO PATRON, DE TAL MANERA QUE TODOS LOS ESTIMULOS CON LA MISMA PERIODICIDAD SEAN REPRESENTADOS DE MANERA SIMILAR; DANDO LA MISMA SENSACION DE GRADO DE ALTURA. UNA ANALOGIA OPTICA CONSISTIRIA EN EL RECONOCIMIENTO DE UNA LETRA DADA; INDEPENDIEMENTE DE SU ORIENTACION, TAMAÑO, COLOR O TIPO DE IMPRESION. SIEMPRE QUE EL TIMPANO ES PUESTO EN VIBRACION PERIODICA, TAN COMPLEJA COMO SEA, EL HECHO DE QUE EL OYENTE PERCIBA UN SOLO GRADO DE ALTURA INDICA QUE SU SISTEMA NERVIOSO RECIBIO EL MENSAJE: "¡AH!, UN TONO PERIODICO" (CONTRASTANDO CON UN RUIDO, O CON LOS GRADOS DE ALTURA MULTIPLES Y AMBIGUOS QUE SE PUEDEN PERCIBIR A PARTIR DE TONOS INARMONICOS). ESTO SUCEDE DE LA MISMA MANERA EN QUE, AL VER UNO DE LOS SIMBOLOS A O V, EL CEREBRO RECIBE EL MENSAJE: "¡AH!, LA LETRA A".

SIN EMBARGO, HAY OTRAS CARACTERISTICAS DEL ESTIMULO AUDITIVO PRIMARIO (NO TOMADAS EN CUENTA POR EL PROCESADOR DE GRADOS DE ALTURA) QUE PRODUCEN RESULTADOS PERCEPTUALES A PARTIR DE OTRAS ETAPAS DEL PROCESO DE RECONOCIMIENTO DEL PATRON DEL SONIDO. EN EL EJEMPLO VISUAL, TAMBIEN SE PERCIBE SI LA LETRA ES GRANDE O PEQUEÑA. DE IGUAL MANERA, PARA UN TONO COMPLEJO, LA PERCEPCION DEL VOLUMEN ESTA RELACIONADA CON LA RAZON TOTAL DE PULSOS NERVIOSOS QUE ALCANZAN LAS ETAPAS SUPERIORES DEL SISTEMA NERVIOSO AUDITIVO.

OTRA CARACTERISTICA FUNDAMENTAL DE UN TONO COMPLEJO ES LA QUE PRODUCE LA SENSACION DE CALIDAD DE TONO O TIMBRE. AQUI CONVIENE HACER UNA DISTINCION CLARA ENTRE LA SITUACION ESTATICA QUE SE DA CUANDO SE ESCUCHA UN TONO COMPLEJO DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL,

INTENSIDAD Y ESPECTRO CONSTANTES QUE SUENA ESTABLEMENTE, Y LA SITUACION DINAMICA MAS REALISTA QUE SE DA CUANDO UN TONO COMPLEJO CON CARACTERISTICAS TRANSITORIAS ES PERCIBIDO COMO PARTE DE UN CONTEXTO MUSICALMENTE RELEVANTE.

PRIMERO, SE ANALIZA EL CASO ESTADICO. SE HAN EFECTUADO EXPERIMENTOS PSICOACUSTICOS CON TONOS COMPLEJOS ESTABLES GENERADOS ELECTRONICAMENTE, DE GRADOS DE ALTURA Y VOLUMEN IGUALES PERO DISTINTOS ESPECTROS Y RELACIONES DE FASE ENTRE ARMONICAS, QUE DEMUESTRAN QUE LA SENSACION DE TIMBRE ES CONTROLADA PRINCIPALMENTE POR EL ESPECTRO DE POTENCIAS (PLOMP, 1970). LOS CAMBIOS DE FASE JUEGAN UN PAPEL SECUNDARIO, A PESAR DE QUE SON CLARAMENTE PERCEPTIBLES, ESPECIALMENTE CUANDO SE LLEVAN A CABO ENTRE COMPONENTES DE FRECUENCIA ALTA. LA SENSACION ESTADICA DE CALIDAD O TIMBRE EMERGE, POR LO TANTO, COMO LA CORRELACION PERCEPTUAL DE LA DISTRIBUCION DE ACTIVIDAD EVOCADA A LO LARGO DE LA MEMBRANA BASILAR - SIEMPRE QUE LA RELACION DE DISTANCIAS CORRECTA ENTRE CRESTAS DE RESONANCIA ESTE PRESENTE PARA LIGAR TODO COMO UNA SENSACION DE UN SOLO TONO. DIVIDIENDO EL RANGO DE FRECUENCIAS AUDIBLES EN BANDAS DE APROXIMADAMENTE UNA OCTAVA CADA UNA (CASI CORRESPONDIENTES A BANDAS CRITICAS), Y MIDRIENDO LA INTENSIDAD O FLUJO DE ENERGIA DE SONIDO QUE ESTA CONTENIDA EN CADA BANDA PARA UN MISMO TONO COMPLEJO, FUE POSIBLE DEFINIR "INDICES DE DISIMILITUD" CUANTITATIVOS PARA LOS SONIDOS ESTABLES DE VARIOS INSTRUMENTOS MUSICALES. ESTOS INDICES SE CORRELACIONAN BIEN CON JUICIOS DE SIMILITUD Y DISIMILITUD DE TIMBRES, DETERMINADOS PSICOFISICAMENTE. ES IMPORTANTE NOTAR QUE LA SENSACION DE TIMBRE ES CONTROLADA POR LA DISTRIBUCION ABSOLUTA DE LA ENERGIA DE SONIDO EN LAS BANDAS CRITICAS, NO POR LOS VALORES DE INTENSIDAD RELATIVOS A LA FUNDAMENTAL. ESTO SE VERIFICA FACILMENTE OYENDO UN DISCO O UNA CINTA MAGNETICA TOCADA A UNA VELOCIDAD INAPROPIADA. ESTE PROCEDIMIENTO DEJA A LOS ESPECTROS RELATIVOS INALTERADOS, SIMPLEMENTE TRASLADANDO TODAS LAS FRECUENCIAS HACIA ARRIBA O HACIA ABAJO. SIN EMBARGO, SE PERCIBE UN CAMBIO CLARO DE TIMBRE EN TODOS LOS INSTRUMENTOS.

LA SENSACION ESTADICA DE TIMBRE ES UNA MAGNITUD PSICOFISICA MULTIDIMENSIONAL RELACIONADA, NO CON UNA, SINO CON UN CONJUNTO COMPLETO DE PARAMETROS FISICOS DEL ESTIMULO ACUSTICO ORIGINAL (EL CONJUNTO DE INTENSIDADES EN TODAS LAS BANDAS CRITICAS). ES LA RAZON PRINCIPAL POR LA CUAL ES MAS DIFICIL HACER DESCRIPCIONES SEMANTICAS DE CALIDAD DE TONO QUE DE GRADO DE ALTURA Y VOLUMEN. EXCEPTO POR ADJETIVOS GENERALES, TALES COMO "MONOTONO" (POCAS ARMONICAS SUPERIORES), "NASAL" (PRINCIPALMENTE ARMONICAS IMPARES) Y "AGUDO" (MUCHAS ARMONICAS SUPERIORES ENFATIZADAS), LA MAYORIA DE LAS CARACTERIZACIONES DADAS POR LOS MUSICOS INVOCAN UNA COMPARACION CON TONOS INSTRUMENTALES ("COMO FLAUTA", "COMO CUERDAS", "COMO ALGUN INSTRUMENTO DE VIENTO DE MADERA", "COMO ALGUNO DE METAL", "COMO ORGAN", ETC.).

AFORA ES NECESARIO INTRODUCIR LA SITUACION DINAMICA QUE ES MAS REALISTA. LA REACCION SUBJETIVA A LOS TONOS COMPLEJOS DEPENDE APRECIABLEMENTE DEL CONTEXTO DEL CUAL SON PARTE (HOUSMA Y GOLDSTEIN, 1972). LA EJECUCION DE TAREAS QUE SON MUSICALMENTE

SIGNIFICATIVAS, TALES COMO LA IDENTIFICACION DE LA FUENTE DEL TONO, I.E., EL INSTRUMENTO, Y EL RECONOCIMIENTO DE MELODIAS O ARMONIAS, INFLUYE GRANDEMENTE EN LA MANERA EN QUE SON PROCESADOS LOS TONOS COMPLEJOS EN EL CEREBRO. ESTO SE APLICA HASTA A LA PERCEPCION DEL GRADO DE ALTURA: ALGUNOS EXPERIMENTOS CON COMPONENTES ESPECTRALES GENERADOS ELECTRONICAMENTE DEMUESTRAN CONVINCIENTEMENTE QUE LA ASOCIACION DE UN SOLO GRADO DE ALTURA A SONIDOS COMPLEJOS ES FACILITADA MUCHO POR, O A VECEZ HASTA REQUIERE, LA PRESENTACION DE LOS TONOS EN FORMA DE UNA MELODIA SIGNIFICATIVA (HOUTSMA Y GOLDSTEIN, 1972). TONOS COMPLEJOS INDIVIDUALES, SINTETIZADOS ELECTRONICAMENTE Y CONSIDERADOS FUERA DE UN CONTEXTO MUSICAL, PUEDEN LLEVAR FRECUENTEMENTE A SENSACIONES DE GRADO DE ALTURA AMBIGUAS O MULTIPLES.

AL OIR UN TONO COMPLEJO, EL SISTEMA AUDITIVO PONE MAS ATENCION AL RESULTADO DEL MECANISMO CENTRAL DE GRADO DE ALTURA (QUE DA UNA SOLA SENSACION DE GRADO DE ALTURA) QUE AL GRADO DE ALTURA PRIMARIO DE LOS COMPONENTES ARMONICOS INDIVIDUALES. SI SE QUIEREN OIR LAS PRIMERAS SEIS O SIETE ARMONICAS SUPERIORES DE UN TONO COMPLEJO, RESULTA NECESARIO INHIBIR EL MECANISMO DOMINANTE DE GRADO DE ALTURA Y DIRIGIR LA ATENCION AL RESULTADO (INICIALMENTE AHOGADO) DEL MECANISMO DEL GRADO DE ALTURA PRIMARIO O ESPECTRAL, QUE ES MAS PRIMITIVO. ESTE ULTIMO MECANISMO ESTA DETERMINADO POR LA POSICION ESPACIAL DE LAS REGIONES ACTIVAS DE LA MEMBRANA BASILAR. ESTA INHIBICION Y CAMBIO DE FOCO DE ATENCION TOMA UN TIEMPO CONSIDERABLE QUE ES BASTANTE MAS LARGO QUE EL TIEMPO NECESARIO PARA ORGANIZAR EL MECANISMO GENERAL DE PROCESAMIENTO DE TONOS.

ES POR ESTO QUE LAS ARMONICAS SUPERIORES NO SE PUEDEN ESCUCHAR EN TONOS CORTOS O QUE DECAEN RAPIDAMENTE. ES IMPORTANTE NOTAR QUE, AL HACER CORRESPONDER LOS GRADOS DE ALTURA PRIMARIOS DE LOS SOBRETONOS DE UN TONO COMPLEJO, SE OBTIENEN INTERVALOS LIGERAMENTE ESTIRADOS; POR EJEMPLO, ENTRE LA PRIMERA Y LA SEGUNDA ARMONICA (OCTAVA ESTIRADA) (TERFARDI, 1971). ESTA TRASLACION ES CAUSADA POR LA INFLUENCIA PERTURBADORA DEL CONJUNTO DE TODAS LAS DEMAS ARMONICAS SOBRE LA ARMONICA CUYO GRADO DE ALTURA PRIMARIO ESTA SIENDO CORRESPONDIDO AL DE LAS OTRAS. EL EFECTO ES PEQUEÑO PERO PUEDE SER RELEVANTE EN SENTIDO MUSICAL.

CAPITULO 7
SIMULACION DE LOS MODELOS PARA APROXIMAR EL DESPLAZAMIENTO
DE LA MEMBRANA BASILAR.

7.1 INTRODUCCION:

SEGUN PODEMOS VER EN EL APENDICE B, FLANAGAN (1960) PRESENTA UNA SERIE DE MODELOS PARA APROXIMAR EL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR. BASANDOME EN ESTOS MODELOS Y CON AYUDA DE UN COMPUTADOR HP-3000 SERIE II DESARROLLE UNA SERIE DE PROGRAMAS PARA SIMULAR ESTE DESPLAZAMIENTO. EL TRABAJO ESTA BASADO EN UNA SIMULACION YA QUE COMO SABEMOS ES MUY DIFICIL HACER ESTUDIOS EN SERES VIVOS DE ESTE FENOMENO. COMO PUDIMOS VER EN UNO DE LOS PRIMEROS CAPITULOS SE HABLA DE HACER USO DE LA TECNICA MOSSBAUER PARA HACER ESTUDIOS EN SERES VIVOS; EL PROBLEMA ES LOGRAR EN GUATEMALA ENCONTRAR EL EQUIPO NECESARIO PARA PODER HACER ESTOS ESTUDIOS, POR LO QUE DECIDI HACER USO DE LA SIMULACION EN COMPUTADORAS PARA SOBREPASAR ESTE OBSTACULO. PARA MAYOR INFORMACION DE LO QUE SON LAS TECNICAS DE SIMULACION EN COMPUTADORAS SE HACE UNA DESCRIPCION EN EL APENDICE A.

7.2 DESARROLLO DE LA SIMULACION:

EL PROPOSITO DE ESTA SIMULACION ES EL COMPROBAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR FLANAGAN(1960) EN SU TRABAJO : " MODELOS PARA APROXIMAR EL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR " (APENDICE B).

PARA ESTA PARTE SE USO UN COMPUTADOR HP-3000 SERIE II CON LA CAPACIDAD DE MANEJAR NUMEROS COMPLEJOS, LO CUAL DIO BASTANTE VERSATILIDAD A LA SIMULACION YA QUE NO SE TUVO QUE SIMULAR EL USO DE LOS COMPLEJOS, QUE HUBIERA HECHO EL TRABAJO UN POCO MAS LARGO Y TEDIOSO.

FLANAGAN (1960) PRESENTA TRES TRANSFORMADAS PARA APROXIMAR A UNA FUNCION LOS DATOS OBTENIDOS POR BEKESY (1942). CADA UNA DE ESTAS TRANSFORMADAS REPRESENTA UN MEJOR APROXIMACION A LOS DATOS EXPERIMENTALES DE BEKESY (1942). AL MISMO TIEMPO PRESENTA LAS TRES TRANSFORMADAS INVERSAS CORRESPONDIENTES.

LA PRIMERA PARTE DE LA SIMULACION EVALUA LAS TRANSFORMADAS DE LAPLACE, ESTO ES HECHO EN EL PROGRAMA: " AMPL Y FASE GUIDO ". LO QUE SE TRATA DE OBTENER ES LA AMPLITUD DEL DESPLAZAMIENTO; LA QUE ES NORMALIZADA UNA VEZ CON RESPECTO A LA FRECUENCIA DE RESONANCIA, Y LUEGO RESPECTO A LA MAXIMA FRECUENCIA NORMALIZADA QUE EN LA MAYORIA DE CASOS ES 1. LOS DATOS QUE PIDE EL PROGRAMA SON : 1) LA FRECUENCIA DE RESONANCIA, 2) LIMITES DE LAS FRECUENCIAS (LIMITE INFERIOR Y LIMITE SUPERIOR), 3) NUMERO DE PUNTOS ENTRE LOS

LIMITES, 4) CONSTANTES MULTIPLICATIVAS PARA T1, T2 Y T3 (SOLO SE PIDE PARA T1 Y T3 YA QUE PARA T1 Y T2 ES LA MISMA), 4) MAXIMA FRECUENCIA NORMALIZADA, 5) GRAFICA (S/N).

AL ENCONTRAR LA AMPLITUD, TAMBIEN SE ENCUENTRA LA FASE ASOCIADA AL COMPLEJO, YA QUE COMO SE ESTA TRABAJANDO CON NUMEROS COMPLEJOS SE PUEDE EXPRESAR EN FORMA POLAR ($R\theta$). LAS TABLAS 7.1 A 7.3 CONTIENEN LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA AMPLITUD Y LA FASE ASOCIADA AL COMPLEJO. TAMBIEN SE PUEDEN OBSERVAR LAS GRAFICAS ENCONTRADAS PARA ESTOS RESULTADOS (FIGURA 7.1). DE ESTAS TABLAS Y GRAFICAS PODEMOS DECIR QUE LOS RESULTADOS OBTENIDOS ATRAVES DE LA SIMULACION CONCUERDAN CON LOS ENCONTRADOS POR FLANAGAN (1960) EN SU TRABAJO. PARA PODER COMPARAR, FUERON USADAS LAS TRANSFORMADAS (3), (6) Y (8) DEL APENDICE B, PUDIENDOSE OBSERVAR LA GRAFICA 7.1 Y LA B.8, NOTANDOSE QUE SON BASTANTE SIMILARES.

LA SEGUNDA PARTE CONSISTE EN LA EVALUACION DE LAS TRANSFORMADAS INVERSAS, DONDE SE GRAFICARA LA AMPLITUD CONTRA EL TIEMPO. EN ESTA PARTE NO SE TOMARON EN CUENTA LAS CONSTANTES C1, C2 Y C3 PARA ESTAR EN CONCORDANCIA CON LO PROPUESTO POR FLANAGAN. (APENDICE B SECCION B.3) LAS TRANSFORMADAS INVERSAS EVALUADAS EN EL PROGRAMA: " INV TRAN AMPL " SON LAS EXPRESIONES (9), (10) Y (11) DEL APENDICE B. AGUI COMO EN LA PRIMERA PARTE NOTAMOS QUE LOS RESULTADOS OBTENIDOS ESTAN EN CONCORDANCIA CON LOS ENCONTRADOS POR FLANAGAN, PARA ESTO PODEMOS OBSERVAR LAS TABLAS 7.4 A 7.6 Y LAS GRAFICAS 7.2 Y 7.3.

LOS DATOS PEDIDOS POR EL PROGRAMA " INV TRAN AMPL " SON : 1) FRECUENCIA DE RESONANCIA, 2) LIMITES PARA LA VARIACION DEL TIEMPO, 3) NUMERO DE PUNTOS QUE SE QUIEREN CALCULAR Y 4) GRAFICA (S/N) .

PARA PODER COMPARAR SE PUEDEN VER LAS GRAFICAS 7.2 Y B.9 , CON LO QUE NOTAMOS QUE TAMBIEN PARA ESTA PARTE LOS RESULTADOS COINCIDEN BASTANTE CON LOS DE FLANAGAN.

PARA MAYOR INFORMACION ACERCA DE LOS PROGRAMAS, SE ADJUNTAN LOS LISTADOS CORRESPONDIENTES, DONDE SE ENCUENTRA LA DOCUMENTACION NECESARIA.

TABLA 7.1

TRANSFORMADA 1

FRECUENCIA DE RESONANCIA = 100.000
 CONSTANTE MULTIPLICATIVA = 2.00000
 MAXIMA FRECUENCIA NORMALIZADA = 1.00000

FREC. NORMALIZADA	AMPLITUD	FASE
.100000E-02	.957112E-01	.739967E-02
.100990	.136661	.527121
.200980	.218891	.581465
.300970	.316509	.449704
.400960	.425746	.239609
.500950	.546790	-.202188E-01
.600940	.678246	-.324179
.700930	.812562	-.673949
.800920	.931016	-1.07084
.900910	1.00313	-1.50896
1.00090	.999591	1.17151
1.10089	.915799	.715906
1.20088	.779456	.294030
1.30087	.629671	-.767824E-01
1.40086	.493854	-.392237
1.50085	.382707	-.656626
1.60084	.296367	-.877660
1.70083	.230818	-1.06332
1.80082	.181379	-1.22057
1.90081	.144001	-1.35504
2.00080	.115541	-1.47118
2.10079	.936694E-01	1.56917
2.20078	.766876E-01	1.48013
2.30077	.633654E-01	1.40119
2.40076	.528077E-01	1.33071
2.50075	.443596E-01	1.26737
2.60074	.375375E-01	1.21011
2.70073	.319808E-01	1.15807
2.80072	.274184E-01	1.11055
2.90071	.236442E-01	1.06696
3.00070	.205001E-01	1.02683
3.10069	.178638E-01	.989739
3.20068	.156398E-01	.955352
3.30067	.137528E-01	.923374
3.40066	.121432E-01	.893551
3.50065	.107633E-01	.865666
3.60064	.957473E-02	.839532
3.70063	.854645E-02	.814984
3.80062	.765311E-02	.791877
3.90061	.687394E-02	.770086
4.00060	.619180E-02	.749498
4.10059	.559250E-02	.730014
4.20058	.506422E-02	.711546
4.30057	.459707E-02	.694013
4.40056	.418272E-02	.677346
4.50055	.381415E-02	.661479
4.60054	.348541E-02	.646357
4.70053	.319142E-02	.631925
4.80052	.292785E-02	.618139

4.90051	.269100E-02	.604953
5.00050	.247768E-02	.592329
5.10049	.228512E-02	.580232
5.20048	.211094E-02	.568627
5.30047	.195307E-02	.557487
5.40046	.180971E-02	.546782
5.50045	.167928E-02	.536487
5.60044	.156041E-02	.526578
5.70043	.145188E-02	.517035
5.80042	.135264E-02	.507837
5.90041	.126174E-02	.498965
6.00040	.117835E-02	.490402
6.10039	.110174E-02	.482133
6.20038	.103126E-02	.474140
6.30037	.966334E-03	.466412
6.40036	.906435E-03	.458936
6.50035	.851106E-03	.451697
6.60034	.799935E-03	.444687
6.70033	.752552E-03	.437893
6.80032	.708624E-03	.431305
6.90031	.667854E-03	.424916
7.00030	.629972E-03	.418714
7.10029	.594736E-03	.412693
7.20028	.561929E-03	.406844
7.30027	.531350E-03	.401161
7.40026	.502821E-03	.395635
7.50025	.476179E-03	.390261
7.60024	.451276E-03	.385033
7.70023	.427978E-03	.379943
7.80022	.406162E-03	.374988
7.90021	.385716E-03	.370162
8.00020	.366538E-03	.365458
8.10019	.348535E-03	.360874
8.20018	.331622E-03	.356405
8.30017	.315719E-03	.352045
8.40016	.300757E-03	.347792
8.50015	.286669E-03	.343641
8.60014	.273394E-03	.339588
8.70013	.260876E-03	.335631
8.80012	.249064E-03	.331765
8.90011	.237912E-03	.327989
9.00010	.227375E-03	.324297
9.10010	.217414E-03	.320688
9.20009	.207990E-03	.317160
9.30008	.199069E-03	.313708
9.40007	.190620E-03	.310331
9.50006	.182613E-03	.307027
9.60005	.175020E-03	.303792
9.70004	.167816E-03	.300626
9.80003	.160978E-03	.297525
9.90002	.154483E-03	.294488
10.00000	.148311E-03	.291512

TABLA 7.2

T R A N S F O R M A D A 2

FRECUENCIA DE RESONANCIA = 100.000
 CONSTANTE MULTIPLICATIVA = 2.00000
 MAXIMA FRECUENCIA NORMALIZADA = 1.00000

FREC. NORMALIZADA	AMPLITUD	FASE
.100000E-02	.560843E-03	1.56840
.100990	.574757E-01	1.32696
.200980	.119412	1.07685
.300970	.191817	.808852
.400960	.280876	.512639
.500950	.391076	.176431
.600940	.532889	-.212659
.700930	.696636	-.666731
.800920	.861951	-1.19239
.900910	.981114	1.35855
1.00090	.999624	.729217
1.10089	.902010	.103621
1.20088	.731135	-.475901
1.30087	.549185	-.983150
1.40086	.395170	-1.41140
1.50085	.279495	1.37484
1.60084	.197544	1.08114
1.70083	.140829	.837436
1.80082	.101730	.633592
1.90081	.746007E-01	.461417
2.00080	.555537E-01	.314501
2.10079	.419920E-01	.187893
2.20078	.321919E-01	.777625E-01
2.30077	.250053E-01	-.188604E-01
2.40076	.196606E-01	-.104301
2.50075	.156322E-01	-.180394
2.60074	.125579E-01	-.248603
2.70073	.101843E-01	-.310105
2.80072	.833171E-02	-.365857
2.90071	.687129E-02	-.416641
3.00070	.570923E-02	-.463107
3.10069	.477655E-02	-.505794
3.20068	.402193E-02	-.545154
3.30067	.340679E-02	-.581572
3.40066	.290183E-02	-.615372
3.50065	.248460E-02	-.646836
3.60064	.213773E-02	-.676201
3.70063	.184771E-02	-.703678
3.80062	.160391E-02	-.729448
3.90061	.139792E-02	-.753667
4.00060	.122304E-02	-.776477
4.10059	.107390E-02	-.798000
4.20058	.946161E-03	-.818343
4.30057	.836319E-03	-.837605
4.40056	.741501E-03	-.855871
4.50055	.659350E-03	-.873218
4.60054	.587930E-03	-.889716
4.70053	.525633E-03	-.905427
4.80052	.471123E-03	-.920407

0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0

↑

A

4.90051	.423283E-03	-.934708
5.00050	.381177E-03	-.948374
5.10049	.344016E-03	-.961450
5.20048	.311133E-03	-.973972
5.30047	.281963E-03	-.985977
5.40046	.256024E-03	-.997495
5.50045	.232904E-03	-1.00856
5.60044	.212252E-03	-1.01919
5.70043	.193765E-03	-1.02942
5.80042	.177181E-03	-1.03927
5.90041	.162276E-03	-1.04876
6.00040	.148854E-03	-1.05790
6.10039	.136745E-03	-1.06673
6.20038	.125801E-03	-1.07525
6.30037	.115894E-03	-1.08348
6.40036	.106910E-03	-1.09144
6.50035	.987499E-04	-1.09914
6.60034	.913273E-04	-1.10659
6.70033	.845651E-04	-1.11380
6.80032	.783956E-04	-1.12079
6.90031	.727591E-04	-1.12757
7.00030	.676024E-04	-1.13414
7.10029	.628785E-04	-1.14051
7.20028	.585456E-04	-1.14670
7.30027	.545664E-04	-1.15271
7.40026	.509074E-04	-1.15855
7.50025	.475391E-04	-1.16423
7.60024	.444349E-04	-1.16975
7.70023	.415708E-04	-1.17512
7.80022	.389254E-04	-1.18034
7.90021	.364795E-04	-1.18543
8.00020	.342157E-04	-1.19039
8.10019	.321184E-04	-1.19522
8.20018	.301734E-04	-1.19992
8.30017	.283680E-04	-1.20451
8.40016	.266907E-04	-1.20898
8.50015	.251309E-04	-1.21335
8.60014	.236791E-04	-1.21761
8.70013	.223267E-04	-1.22177
8.80012	.210659E-04	-1.22583
8.90011	.198895E-04	-1.22979
9.00010	.187910E-04	-1.23367
9.10010	.177644E-04	-1.23746
9.20009	.168042E-04	-1.24116
9.30008	.159056E-04	-1.24478
9.40007	.150640E-04	-1.24832
9.50006	.142751E-04	-1.25178
9.60005	.135353E-04	-1.25517
9.70004	.128409E-04	-1.25849
9.80003	.121887E-04	-1.26174
9.90002	.115758E-04	-1.26492
10.0000	.109994E-04	-1.26803



CTI

TABLA 7.3

T R A N S F O R M A D A 3

FRECUENCIA DE RESONANCIA = 100.000
 CONSTANTE MULTIPLICATIVA = 1.73205
 MAXIMA FRECUENCIA NORMALIZADA = 1.00000

FREC. NORMALIZADA	AMPLITUD	FASE
.100000E-02	.553726E-03	1.56875
.100990	.567793E-01	1.39431
.200980	.118127	1.21032
.300970	.189976	1.00773
.400960	.278051	.776830
.500950	.387729	.507715
.600940	.521755	.190979
.700930	.675465	-.180496
.800920	.830279	-.608311
.900910	.951422	-1.08451
1.00090	1.00004	1.55224
1.10089	.958533	1.04712
1.20088	.844872	.570137
1.30087	.698017	.141198
1.40086	.552733	-.231281
1.50085	.427747	-.548021
1.60084	.328143	-.814756
1.70083	.251864	-1.03895
1.80082	.194482	-1.22795
1.90081	.151526	-1.38820
2.00080	.119284	-1.52503
2.10079	.949173E-01	1.49882
2.20078	.763348E-01	1.39672
2.30077	.620203E-01	1.30753
2.40076	.508786E-01	1.22905
2.50075	.421172E-01	1.15954
2.60074	.351590E-01	1.09759
2.70073	.295805E-01	1.04205
2.80072	.250680E-01	.992007
2.90071	.213869E-01	.946683
3.00070	.183605E-01	.905450
3.10069	.158537E-01	.867780
3.20068	.137631E-01	.833231
3.30067	.120082E-01	.801430
3.40066	.105262E-01	.772060
3.50065	.926755E-02	.744852
3.60064	.819286E-02	.719572
3.70063	.727065E-02	.696021
3.80062	.647557E-02	.674025
3.90061	.578704E-02	.653433
4.00060	.518829E-02	.634113
4.10059	.466556E-02	.615948
4.20058	.420750E-02	.598837
4.30057	.380468E-02	.582688
4.40056	.344926E-02	.567422
4.50055	.313466E-02	.552966
4.60054	.285535E-02	.539257
4.70053	.260667E-02	.526236
4.80052	.238464E-02	.513853

4.90051	.218589E-02	.502060
5.00050	.200754E-02	.490816
5.10049	.184711E-02	.480082
5.20048	.170248E-02	.469824
5.30047	.157180E-02	.460010
5.40046	.145348E-02	.450611
5.50045	.134614E-02	.441601
5.60044	.124858E-02	.432956
5.70043	.115973E-02	.424654
5.80042	.107868E-02	.416673
5.90041	.100462E-02	.408997
6.00040	.936827E-03	.401606
6.10039	.874678E-03	.394485
6.20038	.817617E-03	.387619
6.30037	.765147E-03	.380995
6.40036	.716833E-03	.374600
6.50035	.672283E-03	.368422
6.60034	.631151E-03	.362449
6.70033	.593124E-03	.356672
6.80032	.557925E-03	.351081
6.90031	.525304E-03	.345667
7.00030	.495038E-03	.340421
7.10029	.466923E-03	.335335
7.20028	.440781E-03	.330403
7.30027	.416445E-03	.325617
7.40026	.393767E-03	.320971
7.50025	.372614E-03	.316459
7.60024	.352864E-03	.312074
7.70023	.334407E-03	.307812
7.80022	.317141E-03	.303666
7.90021	.300976E-03	.299634
8.00020	.285828E-03	.295709
8.10019	.271621E-03	.291887
8.20018	.258286E-03	.288165
8.30017	.245759E-03	.284539
8.40016	.233983E-03	.281004
8.50015	.222903E-03	.277557
8.60014	.212470E-03	.274196
8.70013	.202641E-03	.270916
8.80012	.193373E-03	.267715
8.90011	.184628E-03	.264590
9.00010	.176371E-03	.261539
9.10010	.168570E-03	.258558
9.20009	.161195E-03	.255645
9.30008	.154216E-03	.252799
9.40007	.147614E-03	.250015
9.50006	.141359E-03	.247294
9.60005	.135430E-03	.244632
9.70004	.129809E-03	.242027
9.80003	.124476E-03	.239478
9.90002	.119413E-03	.236983
10.0000	.114604E-03	.234541

TABLA 7.4

TRANSFORMADA INVERSA 1

FRECUENCIA DE RESONANCIA = 100.000

TIEMPO	AMPLITUD
.000000E+00	.000000E+00
.250000E-02	.000000E+00
.500000E-02	.000000E+00
.750000E-02	.000000E+00
.100000E-01	.000000E+00
.125000E-01	.000000E+00
.150000E-01	.000000E+00
.175000E-01	.000000E+00
.200000E-01	.000000E+00
.225000E-01	.000000E+00
.250000E-01	2.39526
.275000E-01	35.4551
.300000E-01	123.578
.325000E-01	262.504
.350000E-01	430.413
.375000E-01	598.142
.400000E-01	736.955
.425000E-01	823.817
.450000E-01	844.344
.475000E-01	793.780
.500000E-01	676.424
.525000E-01	503.986
.550000E-01	293.324
.575000E-01	63.9578
.600000E-01	-164.305
.625000E-01	-373.406
.650000E-01	-548.576
.675000E-01	-679.315
.700000E-01	-759.821
.725000E-01	-788.906
.750000E-01	-769.520
.775000E-01	-707.970
.800000E-01	-612.967
.825000E-01	-494.613
.850000E-01	-363.425
.875000E-01	-229.471
.900000E-01	-101.668
.925000E-01	12.7095
.950000E-01	108.333
.975000E-01	181.916
.100000	232.145
.102500	259.472
.105000	265.811
.107500	254.173
.110000	228.285
.112500	192.212
.115000	150.026
.117500	105.522
.120000	62.0074
.122500	22.1570
.125000	-12.0606

0112



TABLA 7.5

TRANSFORMADA INVERSA 2

FRECUENCIA DE RESONANCIA = 100.000

TIEMPO	AMPLITUD
.000000E+00	.000000E+00
.250000E-02	.000000E+00
.500000E-02	.000000E+00
.750000E-02	.000000E+00
.100000E-01	.000000E+00
.125000E-01	.000000E+00
.150000E-01	.000000E+00
.175000E-01	.000000E+00
.200000E-01	.000000E+00
.225000E-01	.000000E+00
.250000E-01	.745539E-01
.275000E-01	3.55733
.300000E-01	21.2636
.325000E-01	65.1477
.350000E-01	141.878
.375000E-01	249.801
.400000E-01	378.788
.425000E-01	512.171
.450000E-01	629.894
.475000E-01	712.058
.500000E-01	742.185
.525000E-01	709.704
.550000E-01	611.392
.575000E-01	451.699
.600000E-01	242.034
.625000E-01	-.754009
.650000E-01	-256.450
.675000E-01	-503.763
.700000E-01	-722.564
.725000E-01	-895.819
.750000E-01	-1011.05
.775000E-01	-1061.22
.800000E-01	-1045.00
.825000E-01	-966.494
.850000E-01	-834.453
.875000E-01	-661.196
.900000E-01	-461.280
.925000E-01	-250.120
.950000E-01	-42.6881
.975000E-01	147.626
.100000	309.893
.102500	436.228
.105000	522.068
.107500	566.150
.110000	570.240
.112500	538.656
.115000	477.655
.117500	394.755
.120000	298.041
.122500	195.520
.125000	94.5669



TIME



TABLA 7.6

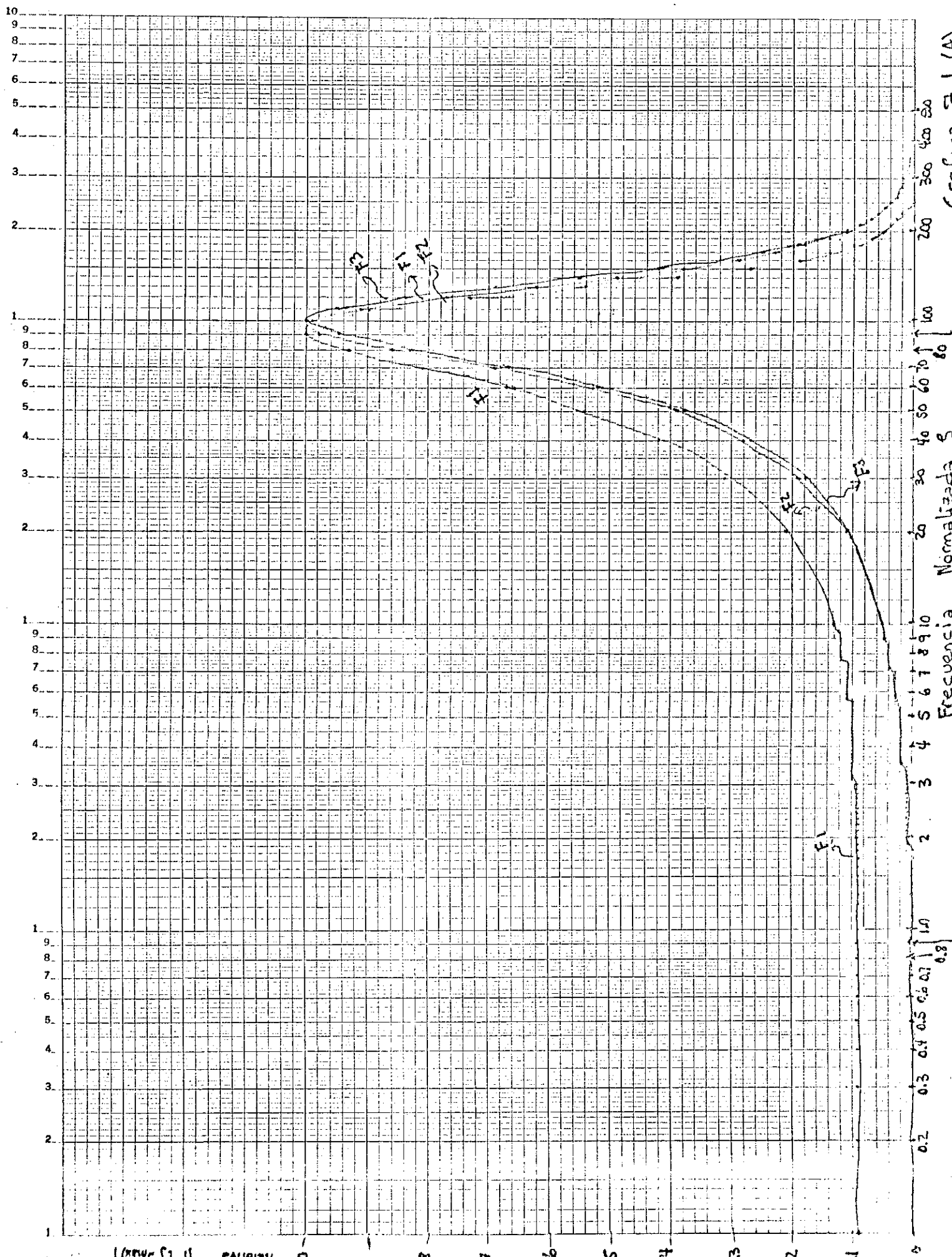
TRANSFORMADA INVERSA 3

FRECUENCIA DE RESONANCIA = 100.000

TIEMPO	AMPLITUD
.000000E+00	.000000E+00
.250000E-02	.000000E+00
.500000E-02	.000000E+00
.750000E-02	.000000E+00
.100000E-01	.000000E+00
.125000E-01	.000000E+00
.150000E-01	.000000E+00
.175000E-01	.000000E+00
.200000E-01	.000000E+00
.225000E-01	.000000E+00
.250000E-01	2.07787
.275000E-01	36.1133
.300000E-01	130.695
.325000E-01	283.150
.350000E-01	468.705
.375000E-01	651.527
.400000E-01	794.737
.425000E-01	868.171
.450000E-01	853.301
.475000E-01	745.288
.500000E-01	552.532
.525000E-01	294.320
.550000E-01	-2.71287
.575000E-01	-308.612
.600000E-01	-594.001
.625000E-01	-833.389
.650000E-01	-1007.59
.675000E-01	-1105.11
.700000E-01	-1122.50
.725000E-01	-1063.86
.750000E-01	-939.561
.775000E-01	-764.609
.800000E-01	-556.698
.825000E-01	-334.326
.850000E-01	-115.085
.875000E-01	85.7300
.900000E-01	256.101
.925000E-01	387.841
.950000E-01	476.739
.975000E-01	522.345
.100000	527.468
.102500	497.490
.105000	439.566
.107500	361.817
.110000	272.562
.112500	179.664
.115000	90.0159
.117500	9.18408
.120000	-58.7866
.122500	-111.419
.125000	-147.723

↑

↑



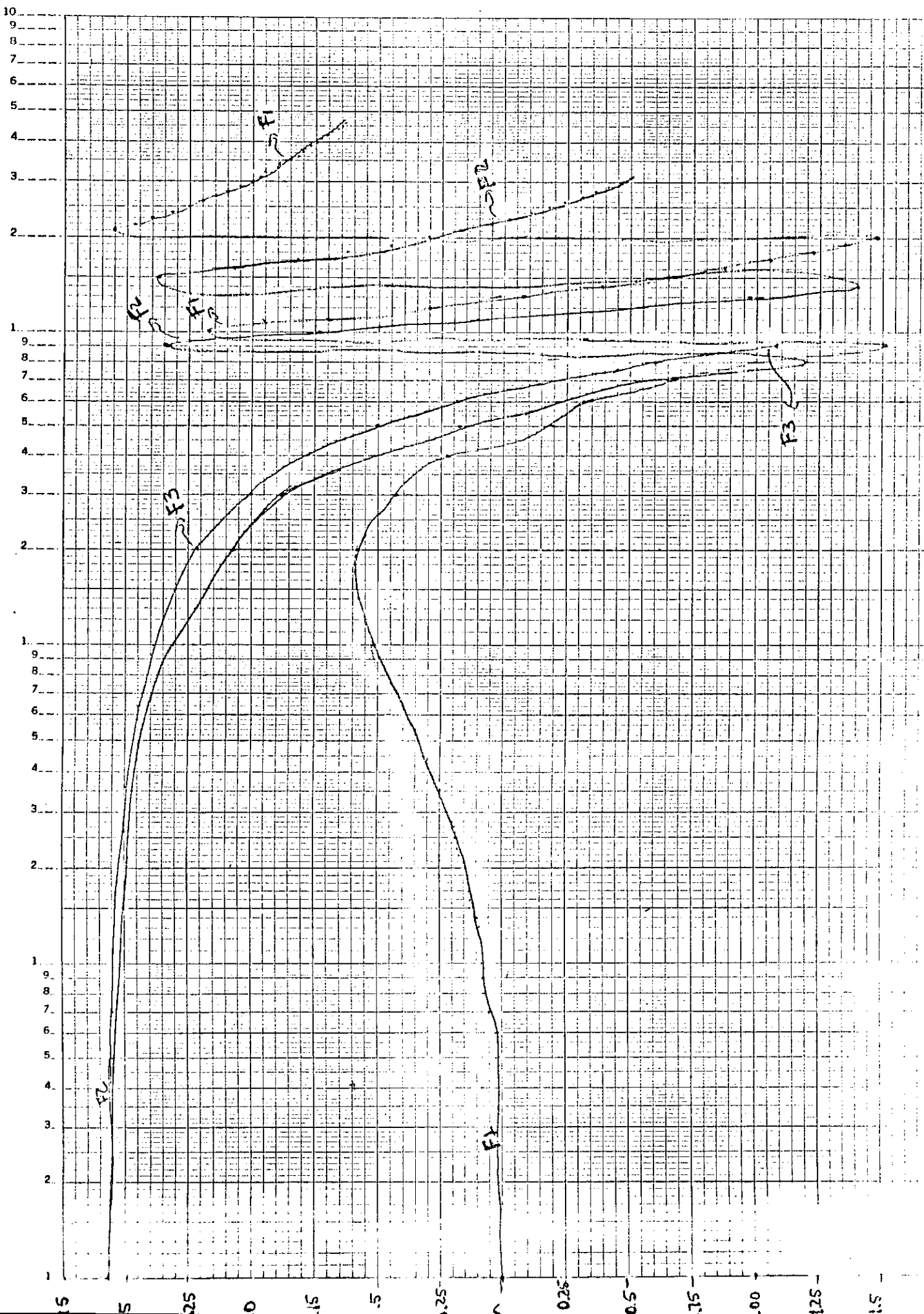
Gráfica 7 (A)

Frecuencia Normalizada

Frecuencia Normalizada

100000

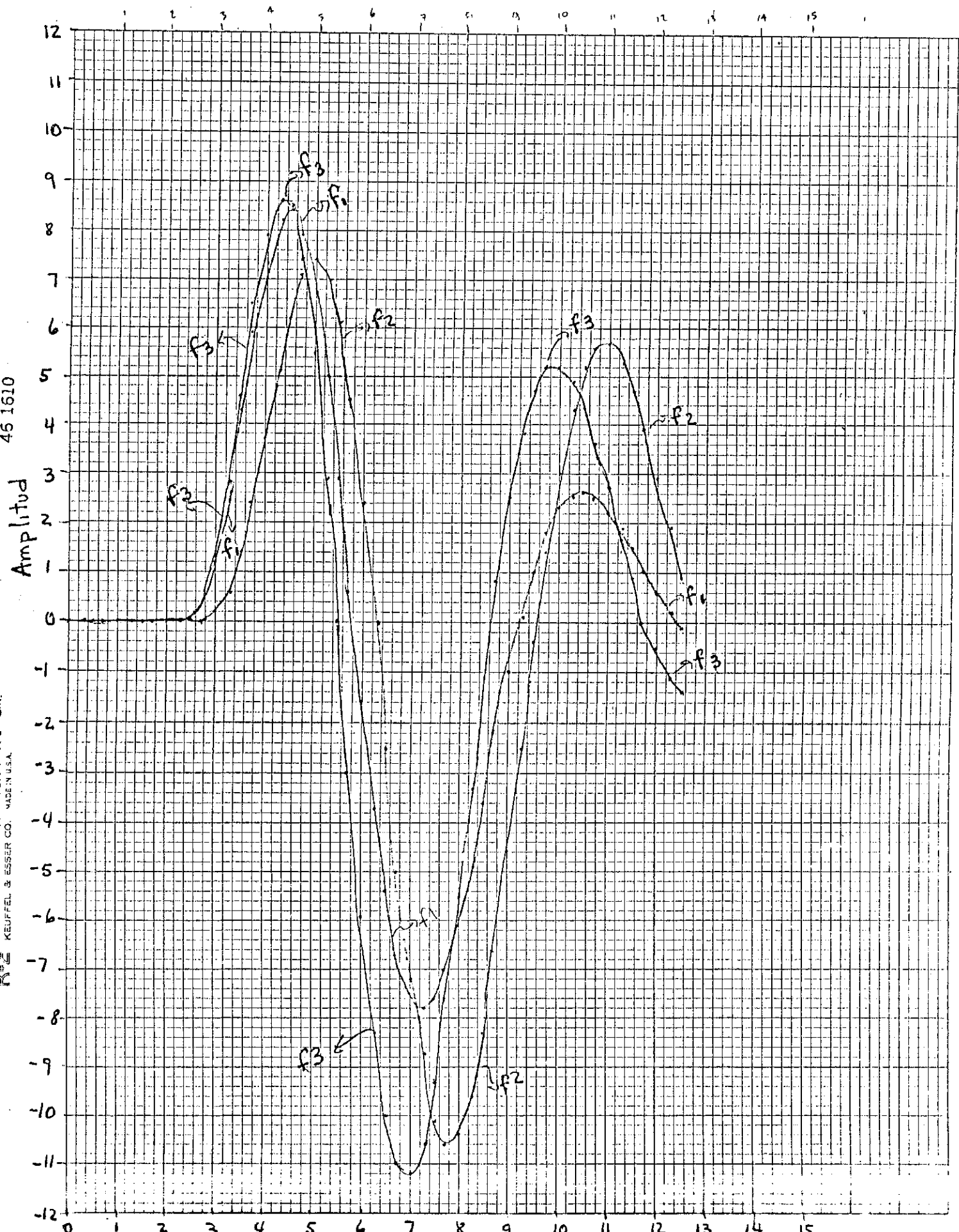
1.3 mm



0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0
 100 200 300 400 500 600 700 800
 1000

45 1610

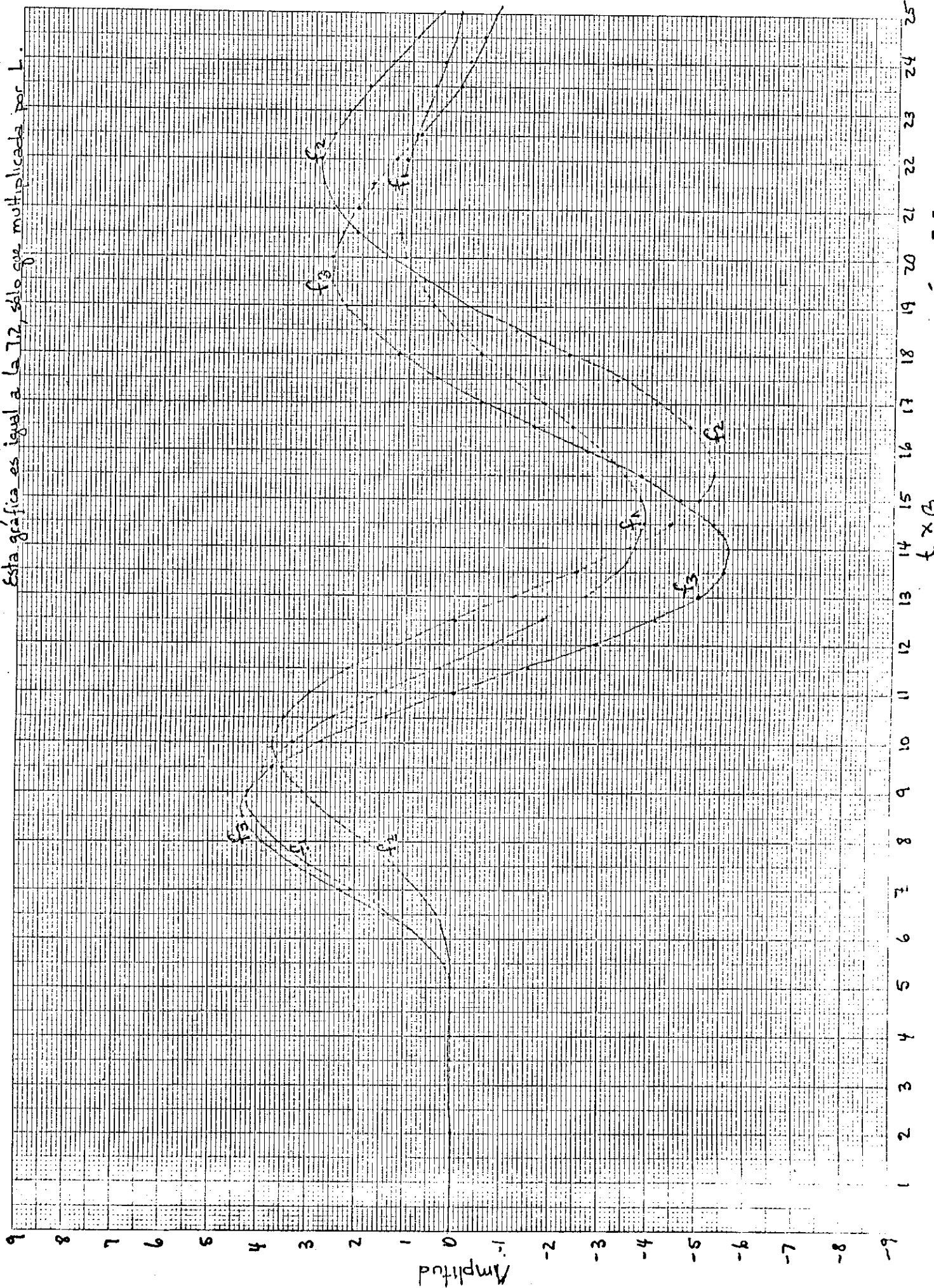
W. E. KEUFFEL & ESSER CO. MADE IN U.S.A.



$t \times \beta$

Gráfica 7.2

Esta gráfica es igual a la T2, sólo que multiplicada por L.



7.3 PROGRAMAS

```

1 $CONTROL INIT,USLINIT,SEGMENT=MACIDO,FILE=8-16
2   PROGRAM AMPL Y FASE OICU
3   SYSTEM INTRINSIC FNUN

```

C

C

```

6 C ESTE PROGRAMA EVALUA NUMERICAMENTE LAS TRES TRANSFORMADAS DE
7 C LAPLACE QUE PRESENTA J. L. FLANAGAN (1) PARA DETERMINAR EL
8 C DESPLAZAMIENTO Y LA FASE CON QUE VIENE LA MEMBRANA BASILAR.
9 C

```

```

10 C ESTAS TRES TRANSFORMADAS SON DERIVADAS PARA AJUSTAR A UNA
11 C FUNCION LOS DATOS EXPERIMENTALES ENCONTRADOS POR BEKESY (2).
12 C

```

C REFERENCIAS:

```

14 C (1) FLANAGAN, J. L., MODELS FOR APPROXIMATING BASILAR
15 C     MEMBRANE DISPLACEMENT, THE BELL SYSTEM TECHNICAL
16 C     JOURNAL, 1960, P. 1175-1177

```

```

17 C (2) VON BEKESY, G., UBER DIE SCHWINGUNGEN DER SCHNECKENTRENNWALD
18 C     BEIM PRAPARAT UND OPHRENMODELL, AKUST. ZEIT., 7, 1942,
19 C     P. 173; J. ACOUST. SOC. AM., 21, 1949, P.233
20 C

```

C VARIABLES USADAS :

C *****

C

```

24 C HFRECRESO      = FRECUENCIA DE RESONANCIA.
25 C RKCONST1      = CONSTANTE MULTIPLICATIVA PARA LAS TRANSFORMADAS
26 C                1 Y 2 . ( BETA = K * ALFA )
27 C RKCONST3      = CONSTANTE MULTIPLICATIVA PARA LA TRANSFORMADA 3.
28 C                ( BETA = K * ALFA ).
29 C RPI           = PI ==> 3.1415927
30 C RKSI          = FRECUENCIA NORMALIZADA ( OMEGA / BETA )
31 C REPSBETA      = EPSILON / BETA (0.1)
32 C RGAMABETA     = GAMA / BETA (1.0)
33 C RR           = 0.83 ( SI SE ACEPTA UN AUMENTO DE 5 DB/OCTAVA EN EL
34 C                PUNTO DE RESONANCIA ).
35 C RDELAY        = ( 3.0 * RPI ) / 4.0
36 C RCON01        = CONSTANTE PARA LA PRIMERA TRANSFORMADA.
37 C RCON02        = CONSTANTE PARA LA SEGUNDA TRANSFORMADA.
38 C RCON03        = CONSTANTE PARA LA TERCERA TRANSFORMADA.
39 C RF01MAX       = TRANSFORMADA 1 VALUADA EN LA MAXIMA FRECUENCIA.
40 C RF02MAX       = TRANSFORMADA 2 VALUADA EN LA MAXIMA FRECUENCIA.
41 C RF03MAX       = TRANSFORMADA 3 VALUADA EN LA MAXIMA FRECUENCIA.
42 C RINICIO       = FRECUENCIA NORMALIZADA INICIAL.
43 C RFIN          = FRECUENCIA NORMALIZADA FINAL.
44 C IPUNTOS       = NUMERO DE PUNTOS ENTRE RFIN Y RINICIO.
45 C RAMPLITUD01   = ARREGLO DONDE ESTA LA AMPLITUD PARA LA 11.
46 C RAMPLITUD02   = ARREGLO DONDE ESTA LA AMPLITUD PARA LA 12.
47 C RAMPLITUD03   = ARREGLO DONDE ESTA LA AMPLITUD PARA LA 13.
48 C RFASE01       = ARREGLO DONDE ESTA LA FASE PARA LA 11
49 C RFASE02       = ARREGLO DONDE ESTA LA FASE PARA LA 12
50 C RFASE03       = ARREGLO DONDE ESTA LA FASE PARA LA 13
51 C

```

C FUNCIONES :

C

```

54 C PARA USAR CON COMPLEJOS: CMPLX, REAL, AIMAG, CABS, CEXP, CONJG
55 C PARA USAR CON REALES: ATAN, RCONSTANTE
56 C

```



```

113 1001 FORMAT(/," ***** PROGRAMA AMPL Y FASE UIDG VERSION ",
114 > "251179.2125 ",/,/,/,/)
115 C
116 WRITE(6,1003)
117 1003 FORMAT(" FRECUENCIA DE RESONANCIA =====> ")
118 READ(5,*) RFRECHESO
119 C
120 WRITE(6,1002)
121 1002 FORMAT(/," LIMITE DE LA FRECUENCIA NORMALIZADA : ",/,
122 > " LIMITE INFERIOR,LIMITE SUPERIOR =====> ")
123 READ(5,*) RINICIO,RFIN
124 C
125 WRITE(6,1004)
126 1004 FORMAT(/," NUMERO DE PUNTOS ENTRE LIMITE INFERIOR Y SUPERIOR ",
127 > " 15X,"=====> ")
128 READ(5,*) IPUNTOS
129 C
130 WRITE(6,1005)
131 1005 FORMAT(/," CONSTANTES MULTIPLICATIVAS PARA T1 Y T3 (K) ",
132 > "=====> ")
133 READ(5,*) RKCONST1,RKCONST3
134 C
135 WRITE(6,1065)
136 1065 FORMAT(/," MAXIMA FRECUENCIA NORMALIZADA =====> ")
137 READ(5,*) RFNG
138 C
139 WRITE(6,1111)
140 1111 FORMAT(/," GUIERE GRAFICA EN LA IMPRESORA (S/N) =====> ")
141 CRESP="N"
142 READ(5,*) CRESP
143 C
144 C CALCULO DEL INCREMENTO PARA LA FRECUENCIA NORMALIZADA.
145 C
146 RINCREMENTO = ( ( RFIN - RINICIO ) / IPUNTOS ) / RFRECHESO
147 C
148 RKSI = RINICIO / RFRECHESO
149 RCONST01 = RCONSTANTE(RR,RCON01)
150 RCONST02 = RCONSTANTE(RR,RCON02)
151 RCONST03 = RCONSTANTE(RR,RCON03)
152 RDELAY = RDELAY(RFRECHESO)
153 C
154 C LOOP GENERAL PARA LAS TRES TRANSFORMADAS.
155 C
156 DO 100 I100=1,IPUNTOS + 1
157 C
158 RFRECU(I100) = RKSI
159 C
160 C
161 C ++++++
162 C
163 C TRANSFORMADA 1
164 C
165 C ++++++
166 C
167 C*****
168 C

```

```

169 C CM101 = EPSILON / BETA + J KSI
170 C
171 CM101 = CMPLX(REPSBETA,RKSI)
172 C
173 CM202 = GAMA / BETA + J KSI
174 C
175 CM201 = CMPLX(RGAMABETA,RKSI)
176 C
177 RVAR01 = ( 1 + 1 / ( K ** 2 ) - KSI ** 2 )
178 C
179 RVAR01 = 1.0 + 1.0 / RKCONST1 ** 2 - RKSI ** 2
180 C
181 RVAR02 = 2 / K * KSI
182 C
183 RVAR02 = ( 2.0 / HKCONST1 ) * RKSI
184 C
185 CM301 = RVAR01 + J RVAR02
186 C
187 CM301 = CMPLX(RVAR01,RVAR02)
188 C
189 CM701 = [ 1 / ( ( 1 + 1 / K ** 2 - KSI ** 2 ) + J 2 / K * KSI ) ]
190 C
191 CM701 = CONJG( CM301 ) / ( CM301 * CONJG( CM301 ) )
192 CM401 = CM701 ** 2
193 C
194 CM501 = EXP ( - J KSI * RET * BETA )
195 C
196 CM501 = CEXP(CMPLX(0.0,-(RKSI * RDELAY)))
197 C
198 RVAR03 = C1 * BETA ** R
199 C
200 RVAR03 = RCCNST01 * ( RFRECRESO ** RR )
201 C
202 CM001 = F1( J KSI )
203 C
204 CMTRANS01(1100) = CMPLX(RVAR03,0.0) * CM401 * CM501 *
205 > ( ( CM101 * CONJG(CM201) ) / ( CONJG(CM201) * CM201 ) )
206 C
207 C ++++++
208 C
209 C TRANSFORMADA 2
210 C
211 C ++++++
212 C
213 C
214 C RVAR10 = C2 * BETA ** R
215 C
216 C RVAR10 = RCCNST02 * ( RFRECRESO ** RR )
217 C
218 C CM102 = [ ( 1 + 1 / K ** 2 - KSI ** 2 ) + J 2 / K * KSI ] ** 3
219 C
220 C CM102 = CM301 ** 3
221 C
222 C CM202 = J KSI / CM102
223 C
224 C CM202 = (CMPLX(0.0,RKSI) * CONJG(CM102)) / (CM102 * CONJG(CM1

```

```

225 C
226 C   CALCULANDO F2( J KSI )
227 C
228 C       CMTRANS02(I100) = CM202 * CM501 * CMPLX(RVAR10,0.0)
229 C
230 C   ++++++
231 C
232 C       TRANSFORMADA 3
233 C
234 C   ++++++
235 C
236 C
237 C   CM103 = ( C3 * BETA ** K ) + J 0
238 C
239 C   CM103 = CMPLX(RCONST103 * RFRECUENSG ** KR,0.0)
240 C
241 C   RVAR20 = 1 / K ** 2 + 1 - KSI ** 2
242 C
243 C   RVAR20 = 1.0 / RKCONST13 ** 2 + 1.0 - RKSI ** 2
244 C
245 C   CM203 = [ RVAR20 + J 2 / K * KSI ] ** 3
246 C
247 C   CM203 = ( CMPLX(RVAR20,(2.0/RKCONST13)*RKSI) ) ** 3
248 C
249 C   RVAR21 = 1 / K ** 2 - 1 / 3 - KSI ** 2
250 C
251 C   RVAR21 = 1.0 / RKCONST13 ** 2 - 1.0 / 3.0 - RKSI ** 2
252 C
253 C   CM303 = RVAR + J ( 2 / K * KSI )
254 C
255 C   CM303 = CMPLX(RVAR21,(2.0/RKCONST13)*RKSI)
256 C
257 C   CM403 = CM303 / CM203
258 C
259 C   CM403 = ( CONJG(CM203) * CM303 ) / ( CM203 * CONJG(CM203) )
260 C
261 C   F3( J KSI )
262 C
263 C   CMTRANS03(I100) = CM103 * CM403 * CM501
264 C
265 C   =====
266 C
267 C   SE INCREMENTA LA FRECUENCIA NORMALIZADA
268 C
269 C   RKSI = RKSI + RINCREMENTO
270 C
271 C   100 CONTINUE
272 C
273 C
274 C   ++++++
275 C
276 C   =====
277 C
278 C
279 C
280 C

```

```

281 C=====
282 C
283 C
284 C
285 C     TRANSFORMADA1 VALLADA EN LA MAXIMA FRECUENCIA NORMALIZADA.
286 C
287        CM01MAX1 = (EXP(CMPLX(0.0,-(RFNO*HDELAY))) *
288        >        CMPLX(RCONST01*(RFRECRESC**RR),0.0)
289        CM01MAX2 = ((CONJG(CMPLX(RGAMABETA,RFNO))*CMPLX(RFPSBETA,RFNO))
290        >        ( CMPLX(RGAMABETA,RFNO)*CONJG(CMPLX(RGAMABETA,RFNO) ) )
291        CM01MAX3 = ( CONJG(CMPLX((1.0+1.0/RKCONST1**2-RFNO**2),
292        >        (2.0/RKCONST1)*RFNO) ) /
293        >        ( CONJG(CMPLX((1.0+1.0/RKCONST1**2-RFNO**2),
294        >        (2.0/RKCONST1)*RFNO) ) *
295        >        CMPLX((1.0+1.0/RKCONST1**2-RFNO**2),
296        >        (2.0/RKCONST1)*RFNO) ) ) ** 2
297        CMTRANSMAX(1) = CM01MAX1 * CM01MAX2 * CM01MAX3
298 C
299 C     TRANSFORMADA2 VALLADA EN LA MAXIMA FRECUENCIA NORMALIZADA.
300 C
301        CM02MAX1 = (EXP(CMPLX(0.0,-(RFNO*HDELAY))) *
302        >        CMPLX(RCONST02*(RFRECRESC**RR),0.0)
303        CM02MAX2 = ( CMPLX((1.0+1.0/RKCONST1**2-RFNO**2),
304        >        (2.0/RKCONST1)*RFNO) ) ** 3
305        CM02MAX3 = ( CMPLX(0.0,RFNO) * CONJG(CM02MAX2) ) /
306        >        ( CM02MAX2 * CONJG(CM02MAX2) )
307        CMTRANSMAX(2) = CM02MAX1 * CM02MAX3
308 C
309 C     TRANSFORMADA3 VALLADA EN LA MAXIMA FRECUENCIA NORMALIZADA.
310 C
311        CM03MAX1 = (EXP(CMPLX(0.0,-(RFNO*HDELAY))) *
312        >        CMPLX(RCONST03*(RFRECRESC**RR),0.0)
313        CM03MAX2 = ( CMPLX((1.0+1.0/RKCONST3**2-RFNO**2),
314        >        (2.0/RKCONST3)*RFNO) ) ** 3
315        CM03MAX3 = (CMPLX((1.0/RKCONST3**2-1.0/3.0-RFNO**2),
316        >        (2.0/RKCONST3)*RFNO)
317        CM03MAX4 = ( CM03MAX3 * CONJG(CM03MAX2) ) /
318        >        ( CM03MAX2 * CONJG(CM03MAX2) )
319        CMTRANSMAX(3) = CM03MAX1 * CM03MAX4
320 C
321 C***** DETERMINACION DE LAS AMPLITUDES Y LAS FASES
322 C***** RENORMALIZADAS
323 C
324 C
325        DO 150 I150=1,IPUNTOS+1
326        CMTRANSREN01(I150)=(CMTRANS01(I150) * CONJG(CMTRANSMAX(1)))
327        >        / ( CMTRANSMAX(1) * CONJG(CMTRANSMAX(1))
328        CMTRANSREN02(I150)=(CMTRANS02(I150) * CONJG(CMTRANSMAX(2)))
329        >        / ( CMTRANSMAX(2) * CONJG(CMTRANSMAX(2))
330        CMTRANSREN03(I150)=(CMTRANS03(I150) * CONJG(CMTRANSMAX(3)))
331        >        / ( CMTRANSMAX(3) * CONJG(CMTRANSMAX(3))
332 C
333 C ++++++        LAS    AMPLITUDES        ++++++
334 C
335        RAMPNOR01(I150) = CABS(CMTRANSREN01(I150))
336        RAMPNOR02(I150) = CABS(CMTRANSREN02(I150))

```



```

393 C
394 DO 200 1200=1,1PUNTOS + 1
395 C
396 C
397 WRITE(8,1030) RFRECU(1200),RAMPNOR01(1200),RFASE01(1200)
398 1030 FORMAT(8X,G12.6,10X,G12.6,4X,G12.6)
399 C
400 WRITE(9,1030) RFRECU(1200),RAMPNOR02(1200),RFASE02(1200)
401 C
402 WRITE(10,1030) RFRECU(1200),RAMPNOR03(1200),RFASE03(1200)
403 C
404 C
405 C
406 200 CONTINUE
407 C
408 C
409 IF(CRESP.EG."N") GO TO 551
410 C
411 C
412 IMP08 = FNLM(11)
413 IMP09 = FNLM(12)
414 IMP10 = FNLM(13)
415 IMP11 = FNLM(14)
416 IMP12 = FNLM(15)
417 IMP13 = FNLM(16)
418 C
419 EJEX="FREC,NOR"
420 EJEY="AMPLITUD"
421 NPTS(1) = 1PUNTOS + 1
422 C
423 CALL JSPL0T(RFRECU,RAMPNOR01,NPTS,1.0,EJEX,
424 > EJ EY,IMP08)
425 C
426 CALL JSPL0T(RFRECU,RAMPNOR02,NPTS,1.0,EJEX,
427 > EJ EY,IMP09)
428 C
429 CALL JSPL0T(RFRECU,RAMPNOR03,NPTS,1.0,EJEX,EJEY,
430 > IMP10)
431 C
432 C
433 EJ EY = " FASE "
434 C
435 C
436 CALL JSPL0T(RFRECU,RFASE01,NPTS,1.,EJEX,EJEY,IMP11)
437 C
438 CALL JSPL0T(RFRECU,RFASE02,NPTS,1.,EJEX,EJEY,IMP12)
439 C
440 CALL JSPL0T(RFRECU,RFASE03,NPTS,1.,EJEX,EJEY,IMP13)
441 C
442 C
443 C
444 C
445 551 STOP
446 END

```

```

1  $CONTROL INIT,USLINIT,SEGMENT=AMPLOIDO,FILE=8-13
2  PROGRAM INV TRAN AMPL1
3  C
4  C
5  C ESTE PROGRAMA SIRVE PARA EVALUAR NUMERICAMENTE LA TRANSFORMADA
6  C INVERSA DE LAPLACE PLANTEADA POR J. L. FLANAGAN(1),
7  C PARA DETERMINAR LA AMPLITUD RELATIVA PARA LA MEMBRANA
8  C BASILAR DEL CICC.
9  C J. L. FLANAGAN PRESENTA TRES APROXIMACIONES PARA DICHA
10 C TRANSFORMADA INVERSA.
11 C ESTAS EXPRESIONES SON LAS TRANSFORMADAS INVERSAS DE LAS
12 C TRES TRANSFORMADAS DE LAPLACE TRABAJADAS EN EL PROGRAMA :
13 C AMPL Y FASE CICC.
14 C
15 C ESTAS TRES TRANSFORMADAS SON DERIVADAS PARA AJUSTAR A UNA
16 C FUNCION LOS DATOS EXPERIMENTALES ENCONTRADOS POR BEKESY(2).
17 C
18 C REFERENCIAS:
19 C (1) FLANAGAN, J. L., MODELS FOR APPROXIMATING BASILAR
20 C MEMBRANE DISPLACEMENT, THE BELL SYSTEM TECHNICAL
21 C JOURNAL, 1960, P. 1178.
22 C (2) VON BEKESY, G., UBER DIE SCHWINGUNGEN DER SCHNECKENTRENNWA
23 C BEIM PREPARAT UND CHRENMODELL, AKUST. ZEIT., 7, 1942,
24 C P. 173; J. ACOUST. SOC. AM., 21, 1949, P.233.
25 C
26 C
27 C VARIABLES USADAS :
28 C *****
29 C
30 C RFRECRESO = FRECUENCIA DE RESONANCIA.
31 C RPI = PI (3.1415927).
32 C RR = 0.83 ( SI SE ACEPTA UN AUMENTO DE 5 DB/OCTAVA EN
33 C PUNTO DE RESONANCIA ).
34 C RCONS01 = CONSTANTE PARA HALLAR LA C1.
35 C RCONS02 = CONSTANTE PARA HALLAR LA C2.
36 C RCONS03 = CONSTANTE PARA HALLAR LA C3.
37 C RLINFERIOR = LIMITE INFERIOR PARA LA VARIACION DEL TIEMPO.
38 C RLISUPERIOR = LIMITE SUPERIOR PARA LA VARIACION DEL TIEMPO.
39 C IPUNTOS = NUMERO DE PUNTOS QUE SE QUIEREN CALCULAR.
40 C RINCREMENTO = INCREMENTO PARA EL TIEMPO.
41 C RCONST01 = C1
42 C RCONST02 = C2
43 C RCONST03 = C3
44 C RTIME = TIEMPO.
45 C RDELAY = RETRAZO ( 3.0 * RPI ) / ( RFRECRESO * 4.0 )
46 C RINVTRANS01 = ARREGLO DONDE ESTA LA TRANSFORMADA INVERSA 1.
47 C RINVTRANS02 = ARREGLO DONDE ESTA LA TRANSFORMADA INVERSA 2.
48 C RINVTRANS03 = ARREGLO DONDE ESTA LA TRANSFORMADA INVERSA 3.
49 C RVARGENE = RFRECRESO * ( RTIME - RDELAY )
50 C
51 C FUNCIONES :
52 C *****
53 C
54 C RCONSTANTE = PARA DETERMINAR LAS DIFERENTES CONSTANTES C1,C2 Y
55 C RDELAY = PARA ENCONTRAR EL RETRAZO, DEPENDIENDO DE LA FRECUENCIA
56 C DE RESONANCIA.

```

```

57 C
58 C     NOTA :
59 C     *****
60 C         ESTE PROGRAMA HA SIDO DESARROLLADO PARA UN AMBIENTE HP-3000
61 C         CON LAS CARACTERISTICAS DE PODER MANEJAR VARIABLES DE DOBLE
62 C         PRECISION USANDO CUATRO PALABRAS, POR LO QUE SI SE USA EN
63 C         UN AMBIENTE CON MENOS PALABRAS PARA LA DOBLE PRECISION SE
64 C         PERDERA UN POCO DE PRECISION EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS.
65 C         CON UNA PALABRA COMPUESTA DE 16 BITS.
66 C
67 C *****
68 C
69 C
70 C     TRABAJO DE GRADUACION    ( TESIS )
71 C     UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.
72 C     AUTOR : LUIS OCTAVIO CORDON   ( TAYO )
73 C     VERSION : 241079.1235
74 C     ASESOR : M.S. FERNANDO NORIEGA.
75 C
76 C
77 C
78 C
79 C
80 C     IMPLICIT DOUBLE PRECISION (R-V)
81 C     SYSTEM INTRINSIC FNOM
82 C     DOUBLE PRECISION DEXP, DSIN, DCOS
83 C     * DIMENSION RINVTRANS01(51),RINVTRANS02(51),RINVTRANS03(51),NPIS(
84 C     REAL KTIMEARRAY(51),KINVTRANS01(51),KINVTRANS02(51),
85 C     >         KINVTRANS03(51)
86 C     CHARACTER*8 EJEX,EJEY,CFESP*1
87 C
88 C     DATA RPI/3.1415927D0/,RR/0.83D0/,RCCNS01/0.66D0/,
89 C     >         RCCNS02/0.92D0/,RCCNS03/0.83D0/,
90 C     >         EJEX/"TIEMPO "/,EJEY/"AMPLITUD"/
91 C
92 C     RFDELAY(RBETA) = ( ( 3.0D0 * RPI ) / ( 4.0D0 * RBETA ) )
93 C     RCONSTANTE(RCNT) = 1.D-7 / ( RCNT * ( 2.0D0 * RPI * 1000.0D0
94 C     >         ** RR )
95 C
96 C
97 C
98 C     WRITE(6,1010)
99 C     1010 FORMAT(/," ***** PROGRAMA INV TRAN AMPLI VERSION 241079.1235
100 C     >         /,/,/)
101 C
102 C     WRITE(6,1011)
103 C     1011 FORMAT(" FRECUENCIA DE RESONANCIA (====> ")
104 C     READ(5,*) RFRECHESU
105 C
106 C     WRITE(6,1012)
107 C     1012 FORMAT(/," LIMITES PARA LA VARIACION DEL TIEMPO : ",/,
108 C     >         " LIMITE INFERIOR,LIMITE SUPERIOR ====> ")
109 C     READ(5,*) RLINFERIOR,RLISUPERIOR
110 C
111 C     WRITE(6,1013)
112 C     1013 FORMAT(/," NUMERO DE PUNTOS QUE SE QUIEREN CALCULAR ====> ")

```

```

113      READ(5,*) IPUNTOS
114      C
115      WRITE(6,1018)
116      1018  FORMAT(/," GUIERE GRAFICA EN LA IMPRESORA (S/N) ====> ")
117      CRESP="N"
118      READ(5,*) CRESP
119      C
120      C
121      RINCREMENTO = ( RLISUPERIOR - RLINFERIOR ) / IPUNTOS
122      C
123      RCONST01 = RCONSTANTE(RCONS01)
124      RCONST02 = RCONSTANTE(RCONS02)
125      RCONST03 = RCONSTANTE(RCONS03)
126      RDELAY = RFDELAY(RFRECRESO)
127      C
128      RTIME = RLINFERIOR
129      C
130      C
131      DO 100 I100=1,IPUNTOS + 1
132          IF(.NOT.(RTIME.LT.RDELAY)) GO TO 110
133              RINVTRANS01(I100) = 0.0000
134              RINVTRANS02(I100) = 0.0000
135              RINVTRANS03(I100) = 0.0000
136              GO TO 120
137      110  CONTINUE
138      C
139          RVARGENE = RFRECRESO * ( RTIME - RDELAY )
140          RVAR01 = DEXP( - (RVARGENE / 2.000) )
141          KTIMEARRAY(I100) = RTIME
142      C
143      C ***** TRANSFORMADA INVERSA 1 *****
144      C
145      C
146          RVARPRIMERA = ( 0.03300 + 0.36000 * RVARGENE ) * RVAR01 *
147      >              CSIN(RVARGENE)
148          RVARSEGUNDA = ( 0.57500 - 0.32000 * RVARGENE ) * RVAR01 *
149      >              CCOS(RVARGENE)
150          RVARTERCERA = 0.57500 * DEXP( - RVARGENE )
151      C
152          RINVTRANS01(I100) = ( RFRECRESO ** (1.000+RR) ) *
153      >              ( RVARPRIMERA + RVARSEGUNDA - RVARTERCERA )
154      C
155      C ***** TRANSFORMADA INVERSA 2 *****
156      C
157          RPRIMER = ( RVARGENE ** 2 / 2.000 + RVARGENE - 3.000 / 2.000 ) *
158      >              * RVAR01 * CSIN(RVARGENE)
159          RSEGUNDA = ( - ( RVARGENE ** 2 ) + 3.000 / 2.000 * RVARGENE ) *
160      >              * RVAR01 * CCOS(RVARGENE)
161      C
162          RINVTRANS02(I100) = ( RFRECRESO ** (1.000+RR) )
163      >              / 8.000 * ( RPRIMER + RSEGUNDA )
164      C
165      C
166      C ***** TRANSFORMADA INVERSA 3 *****
167      C
168      C

```

```

169           RINVTRANS03(I100) = ( ( RFRECHESO ** (1.000+RR))
170     >           / 6.000 * DSIN(RVARGENE) * RVARGENE ** 2
171     >           * DEXP( - ( RVARGENE / 1.73205100 ) ) )
172     C
173     C
174     120           RTIME = RTIME + RINCREMENTO
175     C
176     100     CONTINUE
177     C
178     C
179     C=====
180     C
181     C
182     C=====
183     C
184     C
185     C
186     C     NOTAS :
187     C
188     C     UNIDAD DE SALIDA NUMERO 8 PARA LA TRANSFORMADA INVERSA 1.
189     C     UNIDAD DE SALIDA NUMERO 9 PARA LA TRANSFORMADA INVERSA 2.
190     C     UNIDAD DE SALIDA NUMERO 10 PARA LA TRANSFORMADA INVERSA 3.
191     C
192     C
193           WRITE(8,1040)
194     1040     FORMAT(1H1)
195           WRITE(9,1040)
196           WRITE(10,1040)
197     C
198           WRITE(8,1051)
199     1051     FORMAT(3X,"T R A N S F O R M A D A   I N V E R S A   1",/)
200           WRITE(9,1042)
201     1042     FORMAT(3X,"T R A N S F O R M A D A   I N V E R S A   2",/)
202           WRITE(10,1043)
203     1043     FORMAT(3X,"T R A N S F O R M A D A   I N V E R S A   3",/)
204     C
205           WRITE(8,1045) RFRECHESO
206     1045     FORMAT(5X,"FRECUENCIA DE RESONANCIA = ",G12.6,/,/)
207           WRITE(9,1045) RFRECHESO
208           WRITE(10,1045) RFRECHESO
209     C
210     C
211           WRITE(8,1050)
212     1050     FORMAT(8X,"TIEMPO",10X,"AMPLITUD",/,/)
213           WRITE(9,1050)
214           WRITE(10,1050)
215     C
216     C
217           RINICIO = RINFERIOR
218     C
219           DO 200 I200=1,1PUNTOS + 1
220     C
221           WRITE(8,1060) RINICIO,RINVTRANS01(1200)
222           WRITE(9,1060) RINICIO,RINVTRANS02(1200)
223           WRITE(10,1060) RINICIO,RINVTRANS03(1200)
224     1060     FORMAT(5X,G12.6,5X,G12.6)

```

```
225 C
226 RINICIO = RINICIC + RINCREMENTO
227 C
228 KINVTRANS01(1200) = RINVTRANS01(1200)
229 KINVTRANS02(1200) = RINVTRANS02(1200)
230 KINVTRANS03(1200) = RINVTRANS03(1200)
231 C
232 C
233 C
234 200 CONTINUE
235 C
236 IF(CRESP.EG."N") GO TO 551
237 NPTS(1) = IFUNICS + 1
238 IMPRE11 = FRUM(11)
239 IMPRE12 = FRUM(12)
240 IMPRE13 = FRUM(13)
241 C
242 CALL JSPLIT(KTIMEARRAY,KINVTRANS01,NPTS,1.,EJEX,EJEY,
243 > IMPRE11)
244 C
245 CALL JSPLIT(KTIMEARRAY,KINVTRANS02,NPTS,1.,EJEX,EJEY,
246 > IMPRE12)
247 C
248 CALL JSPLIT(KTIMEARRAY,KINVTRANS03,NPTS,1.,EJEX,EJEY,
249 > IMPRE13)
250 C
251 C
252 551 STOP
253 END
```

```

1 $CONTROL FREE,NOSOURCE,SEGMENT=JSPL0T
2 SUBROUTINE JSPL0T(X,Y,NPTS,NOG,XSCALE,YSCALE,NUMFILE)
3 #
4 # WRITTEN BY JOHN SHEPHERD,PHYSICS DEPT., UW-RIVER FALLS,
5 # WISCONSIN,54022. APRIL '74. LAST MOD. 13 JAN 76
6 # FOR INFORMATION LIST JSPL0T.DOC.LIB
7 #
8 DIMENSION X(1),Y(1),NPTS(1),LLINE(36)&
9 ,LINE10(5),LINE20(10),LINE30(15),LINE40(20),LINE50(25)&
10 ,LINE60(30),LF(1)
11 CHARACTER BLANK,CASH,BAR,LI,LINE*72,SYM*5,NUM*10&
12 ,INTEG5*5,BLANK7*7,BLANK5*5,FW7*7,YW7*7,ST11*11&
13 ,XSCALE*8,YSCALE*8
14 REAL NOG
14.01 SYSTEM INTRINSIC FWRITE
14.02 LOGICAL LFO(1),LINE600(30),LINE500(25),LINE400(20),LINE300(15),&
14.03 LINE200(10),LLINE0(36)
14.04 EQUIVALENCE(LF,LFO),(LINE60,LINE600),(LINE50,LINE500),&
14.05 (LINE40,LINE400),(LINE30,LINE300),(LINE20,LINE200),&
14.06 (LLINE,LLINE0)
15 LOGICAL FIN
16 INTEGER ASCII
17 EQUIVALENCE (BLANK7,BLANK5,LF,BLANK)&
18 ,(LINE,LLINE,YW7,LINE10,LINE20,LINE30,LINE40,LINE50,LINE60)&
19 ,(ST11,LLINE(21))
20 # ALL PRINTING IS DONE FROM LINE*72 EQUIVALENCED WITH
21 # LINE11 ARRAYS. THE SHORTER ARRAYS ARE USED TO SPEED
22 # UP THE PRINTING PROCESS
23 N = NOG
24 NLOT = 0
25 DO 11 I=1,N
26 11 NLOT = NLOT + NPTS(I)
27 IF(NLOT .EQ. 0) RETURN
28 CASH = "-"
29 BAR = "1"
30 NUM = "123456789&"
31 SYM = "*+x0#"
32 BLANK7 = " "
33 L1NLI = 60
34 # SEARCH FOR MAX AND MIN VALLES IN X AND Y
35 XMAX = X(1)
36 XMIN = XMAX
37 YMAX = Y(1)
38 YMIN = YMAX
39 DO 10 I=1,NLOT
40 XMAX = AMAX1(XMAX,X(I))
41 XMIN = AMIN1(XMIN,X(I))
42 YMAX = AMAX1(YMAX,Y(I))
43 YMIN = AMIN1(YMIN,Y(I))
44 10 CONTINUE
45 # SET SCALE FACTORS
46 CALL SCALE(YMAX,YMIN,L1NLI,DY,M,YINT,NY,YSHIFT)
47 90 CALL SCALE(XMAX,XMIN,L1NLI,DX,MX,XINT,NX,XSHIFT)
48 # MX MUST BE 60 FOR A STANDARD TELEPRINTER
49 IF (MX .GT. 60) GOTO 90
50 H0X = 1./DX

```

```

51     SXMIN = XMIN-XSHIFT
52     DYH = DY*0.5
53     *****
54     #PRINTING NOW STARTS
55     *****
56     INTEG5 = BLANK5
57     M1 = M + 1
58     CALL FWRITE(NUMFILE,LF0,-2,%205L)
59     # THE FOLLOWING BLOCK OF INFORMATION IS PRINTED AT THE TOP
60     # AND BOTTOM OF THE GRAPH, BUT IN DIFFERENT ORDERS.
61     # FIN IS TRUE AT THE END OF THE GRAPH.
62     FIN = .FALSE.
63     122 DO 66 J=1,30
64     66 LINE60(J) = LF(1)
65     LINE(22:19) = " ORIGIN SHIFTED BY "
66     IF(XSHIFT .EQ. 0.)GOTO 121
67     LINE(14:8) = XSCALE
68     CALL EFORM(ST11,XSHIFT)
69     CALL FWRITE(NUMFILE,LINE600,-60,%0L)
70     121 IF(YSHIFT .EQ. 0.) GOTO 120
71     LINE(14:8) = YSCALE
72     CALL EFORM(ST11,YSHIFT)
73     CALL FWRITE(NUMFILE,LINE600,-60,%60L)
74     120 IF(FIN) RETURN
75     123 LINE(14:8) = XSCALE
76     LINE(22:14) = " TIMES TEN TO "
77     INTEG5 = BLANK5
78     LEN = ASCII(NXN, \10, INTEG5)
79     LINE(36:5) = INTEG5
80     LINE(7:7) = BLANK7
81     CALL FWRITE(NUMFILE,LINE400,-40,%60L)
82     IF(FIN) GOTO 122
83     124 DO 64 J=1,30
84     64 LLINE(J) = LF(1)
85     DO 65 J=1,7
86     10 = (J-1)*10
87     XH = (FLOOR(ID)*CX+SXMIN)*XINT
88     CALL FORM73(FW7,XH)
89     LINE(10+6:7) = FW7
90     65 CONTINUE
91     CALL FWRITE(NUMFILE,LLINE0,-72,%0L)
92     IF(FIN)GOTO 123
93     # THE MAIN PRINTING LOOP FOLLOWS. ITS ABOUT 85 LINES.
94     DO 20 I=1,M1
95     YP = (FLOOR(I-1))*DY
96     YP = YMAX-YP
97     YPL = YP + DYH
98     YPL = YP - DYH
99     IF(.NOT.((I .EQ. 1) .OR. (I .EQ. M1)))GOTO 13
100    IPOS = 69
101    # FIRST LINE NEEDS TO HAVE UNUSED PARTS BLANKED
102    # IPOS KEEPS TRACK OF HOW LONG A LINE NEED BE PRINTED
103    LINE(1:5) = BLANK5
104    LINE(8:1) = BLANK
105    LINE(68:5) = BLANK5
106    DO 25 J=9,69

```

```

107 LINE(J:1) = DASH
108 IF(MOD(J,10) .EQ. 9) LINE(J:1) = BAR
109 25 CONTINUE
110 GOTO 14
111 # WE ARE SETTING NE BEFORE INSERTING POINTS. WE ARE
112 # ONLY PUTTING GRID MARKS ON THE SIDES ,TOP AND BOTTOM
113 13 DO 26 J=1,35
114 LLINE(J) = LF(1)
115 26 CONTINUE
116 IPCS = 0
117 IF(I .NE. 3) GOTO 41
118 LINE(1:8) = YSCALE
119 IPOS = 8
120 41 IF(I .NE. 5) GOTO 42
121 LINE(1:6) = " TIMES"
122 IPCS = 6
123 42 IF(I .NE. 6) GOTO 43
124 LINE(1:7) = " TEN TO"
125 IPOS = 7
126 43 IF(I .NE. 7) GOTO 44
127 INTEG5 = BLANK5
128 LEN = ASCII(\NYN,\10\,INTEG5)
129 LINE(4:5) = INTEG5
130 IPCS = 6
131 44 CONTINUE
132 IF(MOD(M1-1,5) .NE. 0) GOTO 14
133 # EVERY 5TH. LINE HAS A - AT THE FIRST AND LAST POSITIONS
134 IPCS = 69
135 LINE(9:1) = DASH
136 LINE(69:1) = DASH
137 14 K=1
138 NEW = NPTS(1)
139 KP = 1
140 DO 30 J=1,NIOT
141 IF((Y(J) .GT. YPL) .OR. (Y(J) .LE. YPL)) GOTO 33
142 INDEX = (X(J)-XMIN)*RDX + 9.5
143 LI = LINE(INDEX:1)
144 IPCS = MAX0(IPOS,INDEX)
145 IF((LI.EQ.BLANK).OR.(LI.EQ.BAR).OR.(LI.EQ.DASH)) GOTO 70
146 DO 80 L2=2,9
147 IF(LI.EQ.NUM(L2:1)) GOTO 71
148 80 CONTINUE
149 IF(LI.EQ.NUM(10:1)) GOTO 73
150 LINE(INDEX:1) = INUM(L2:1)
151 GOTO 73
152 70 LINE(INDEX:1) = SYM(KP:1)
153 GOTO 73
154 71 LINE(INDEX:1) = NUM(L2+1:1)
155 73 CONTINUE
156 33 IF(J .LT. NEW) GOTO 30
157 K = K+1
158 NEW = NEW + NPTS(K)
159 KP = MOD(K-1,5) + 1
160 30 CONTINUE
161 IF (MOD(M1-1,10) .EQ. 0) GO TO 55
162 IF(IPOS.NE.0)GOTO140

```

```

163      # NO POINTS OR NUMBERS TO BE PLOTTED
164      CALL FWRITE(NUMFILE,LF0,-2,%0L)
165      GOTO 20
166      140 GOTO(141,143,145,147,149,150),(IPOS/10+1)
167      141 CALL FWRITE(NUMFILE,LINE200,-20,%0L)
168      GOTO 20
169      143 CALL FWRITE(NUMFILE,LINE300,-30,%0L)
170      GOTO 20
171      145 CALL FWRITE(NUMFILE,LINE400,-40,%0L)
172      GOTO 20
173      147 CALL FWRITE(NUMFILE,LINE500,-50,%0L)
174      GOTO 20
175      149 CALL FWRITE(NUMFILE,LINE600,-60,%0L)
176      GOTO 20
177      55 YP = (YP-YSHIFT)*YINT
178      CALL FORM73(YW7,YP)
179      150 CALL FWRITE(NUMFILE,LLINE0,-72,%0L)
180      20 CONTINUE
181      FIN = .TRUE.
182      GOTO 124
183      END
184      #
185      #
186      #
186.01    $CONTROL SEGMENT=SCALE
187      SUBROUTINE SCALE(YMAX,YMIN,LINL1,DY,M,YINT,NY,YSHIFT)
188      #
189      #-----SCALING ROUTINE-----
190      #THIS SCALING ROUTINE USES THE MIN AND MAX VALUES WITH
191      #LINL1 TO SET THE SCALING FACTOR.
192      #
193      #?????TEST FOR NO RANGE IN X OR Y?????????
194      #
195      IF(YMAX.EQ.YMIN) GO TO 800
196      #
197      YSHIFT = 0.
198      810 CONTINUE
199      DY=(YMAX-YMIN)/FLOAT(LINL1)
200      #
201      CALL RUND(DY,RDY,TPY,NY)
202      #
203      DY=RDY
204      DY10 = DY*10.
205      RYX = YMAX/DY10
206      IF(RYX .LE. 10000.)GOTO 808
207      YSHIFT = YMIN
208      YMAX = YMAX-YMIN
209      YMIN = 0.
210      GOTO 810
211      808 I=YMAX/DY10 + 1
212      YMAX=I*DY10
213      I=YMIN/DY10
214      IF(YMIN.LI.0.)I=I-1
215      YMIN=I*DY10
216      M=(YMAX-YMIN)/DY + 0.5
217      IF(YMIN.EQ.0.)GO TO 200

```

```

218 #
219     CALL RUND(YMIN,T,YINI,NY)
220 #
221     GO TO 201
222 800 IF(YMAX.NE.0.)GO TO 850
223 #
224 *****IF THE RANGE IS ZERO RESET YMAX AND YMIN
225 #
226     YMAX = 1.0E-76*FLOAT(LINLI)
227     YMIN = -YMAX
228     GOTO 810
229 850 IF(YMAX.GT.0.) GO TO 860
230     YMAX=0
231     GO TO 810
232 860 YMIN=0
233     GO TO 810
234 200 YINI=0.1*TPY
235     NY=NY+1
236 201 YMAX = YMAX + YSHIFT
237     YMIN = YMIN + YSHIFT
238     RETURN
239     END
240 #
240.01 $CCNTROL SEGMENT=RCNC
241     SUBROUTINE RUND(X,RCNC,TP,N)
242 #
243 #-----THIS IS A ROUNDING ROUTINE-----
244 #
245     ROUND=0
246     IF(X.EQ.0)X = 1.0E-76
247     XP=ABS(X)
248     N = ALOG10(XP)
249     IF(XP-1.0)10,11,12
250     10 N=N-1
251     12 CONTINUE
252     TP = 10.0**(-N)
253     XP=XP*TP
254     XP = XP - 0.002
255     # IF IS SET TO THE NEAREST NUMBER WHICH IS GREATER
256     # OR EQUAL TO XP FROM THE SET 1,2,5 OR 10
257     IXP = XP
258     IXP9= IXP-9
259     IF = (IXP/5)*5+(IXP9/8)*3+(IXP9/9) + 5
260     RCNC = FLOAT(IF)/TP
261     GOTO 15
262     11 TP = 1.
263     ROUND = 1.
264     15 RCNC = SIGN(RCNC,X)
265     RETURN
266     END
267 #
268 #
268.01 $CCNTROL SEGMENT=FORM73
269     SUBROUTINE FORM73(STRING,RN)
270     # THIS SUBROUTINE CONVERTS A REAL VARIABLE RN TO
271     # AN ASCII STRING 7 BYTES LONG WITH 3 DECIMAL PLACES

```

```

272 # CF. FORTRAN F7.3 FCRMAT
273 CHARACTER SUBS1(6),SUBS2(6),STRING*7, NSTRING(7)
274 INTEGER ASCII
275 EQUIVALENCE (NSTRING(3),SUBS1(6)),&
276 (NSTRING(5),SUBS2(4))
277 IF (ABS(RN) .GE. 100.) GOTO 10
278 DO 5 I=1,6
279 SUBS1(I)=" "
280 5 SUBS2(I)=" "
281 IN = RN + SIGN(0.0005,RN)
282 LEN = ASCII(NIN,\-10\,SUBS1(6))
283 IF (LEN .GT. 3) GOTO 10
284 IF ((LEN .EQ. 1) .AND. (RN .LT. 0.)) NSTRING(2) = "-"
285 IN = ABS((RN-FLGAT(IN)))*1000.+0.5
286 LEN = ASCII(NIN,\-10\,SUBS2(6))
287 NSTRING(4)=". "
288 IF (LEN .LT.3) NSTRING(5) = "0"
289 IF (LEN .LT. 2) NSTRING(6) = "0"
290 DO 7 I =1,7
291 7 STRING(I:1) = NSTRING(I)
292 RETURN
293 10 STRING = "OVERFLC"
294 RETURN
295 END
296 #
297 #
297.01 $CONTROL SEGMENT=EFORM
298 SUBROUTINE EFORM(STRING,RN)
299 # THIS SUBROUTINE CONVERTS A REAL NUMBER RN TO
300 # AN ASCII STRING 11 BYTES LONG IN E11.3 FCRMAT
301 CHARACTER STRING*11,SALM*,SUBS(3),ASTRING(11)
302 INTEGER ASCII
303 EQUIVALENCE (SNUM,ASTRING),(N,LN),(SUBS,ASTRING(9))
304 DO 5 I=1,11
305 5 ASTRING(I) = " "
306 IF (RN .EQ. 0.) GOTO 4
307 XP = ABS(RN)
308 N = ALOG10(XP)
309 IF (XP-1.) 1,2,3
310 1 N = N-1
311 3 PI = 10.0**(-N)
312 XP = RN*PI
313 2 CALL FORM73(SALM,XP)
314 IF (N .EQ. 0) GOTO 6
315 ASTRING(8) = "E"
316 LEN = ASCII(NLN,\10\,SUBS)
317 GOTO 6
318 4 SNUM(1:4) = "0.000"
319 6 DO 7 I=1,11
320 7 STRING(I:1) = ASTRING(I)
321 RETURN
322 END

```

CONCLUSIONES

EL OIDO ES UN ORGANISMO TAN IMPORTANTE QUE SUS COMPONENTES TIENEN UN DISEÑO OPTIMO.

LA MEMBRANA BASILAR ES MUY IMPORTANTE YA QUE LAS CELULAS RECEPTORAS AUDITIVAS SE HALLAN LOCALIZADAS EN ELLA.

EL OIDO ES UN INSTRUMENTO EXTREMADAMENTE SENSIBLE: SE PUEDEN DETECTAR AMPLITUDES DE VIBRACIONES DEL TIMPANO MUY PEQUEÑAS (HASTA DE 10^{-7} CM.) Y PERIODOS DE VIBRACIONES MUY CORTOS (HASTA DE 7×10^{-5} SEG.).

EL PATRON DE VIBRACION DEL TIMPANO DEPENDE DEL PATRON COMPLEJO, Y NO DEL SINUSOIDAL DE LA ONDA INCIDENTE.

PARA LA SEPARACION EN COMPONENTES DE DIFERENTES FRECUENCIAS, EXISTE UNA REGION DE RESONANCIA PARA UNA COMPONENTE DE FRECUENCIA DADA (REGION DE LA MEMBRANA BASILAR DONDE LA ONDA CAUSA UNA EXCITACION MAXIMA) QUE ESTA LOCALIZADA EN UNA POSICION QUE DEPENDE DE LA FRECUENCIA.

UNA ONDA COMPLEJA DA LUGAR A UNA MULTIPLICIDAD DE REGIONES DE RESONANCIA, UNA PARA CADA ARMONICA. COMO ESTAS REGIONES NO ESTAN DELIMITADAS EXACTAMENTE, LA CAPACIDAD DE LA MEMBRANA PARA DISTINGUIR ENTRE ARMONICAS DISTINTAS ES LIMITADA.

EL RANGO DE FRECUENCIAS MAS IMPORTANTE EN SENTIDO MUSICAL (APROXIMADAMENTE 20 - 4,000 HZ) LLEGA CASI DOS TERCIOS DE LA EXTENSION DE LA MEMBRANA BASILAR (DE 12 A 35 MM. DESDE LA BASE).

CUANDO LA FRECUENCIA DE UN TONO SE DUPLICA, LA REGION DE RESONANCIA CORRESPONDIENTE SE DESPLAZA UNA CANTIDAD MAS O MENOS CONSTANTE, DE 3.5 A 4 MM., SIN IMPORTAR EL RANGO DE FRECUENCIAS EN EL QUE OCURRA LA DUPLICACION.

LA AMPLITUD DE LAS OSCILACIONES DEL TIMPANO ESTA DIRECTAMENTE RELACIONADA CON LA VARIACION DE PRESION PROMEDIO, Δp , DE LA ONDA SONORA INCIDENTE Y, POR LO TANTO, CON EL FLUJO DE ENERGIA ACUSTICA O INTENSIDAD I QUE ALCANZA AL OIDO.

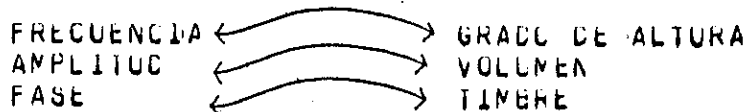
HAY DOS LIMITES DE SENSITIVIDAD PARA UN TONO DE FRECUENCIA: (1) UN LIMITE INFERIOR O UMBRAL DEL OIDO, QUE REPRESENTA LA INTENSIDAD MAS PEQUEÑA QUE SE PUEDE OIR; Y (2) UN LIMITE SUPERIOR DEL OIDO, MAS ALLA DEL CUAL SE EVLCA DOLOR FISIOLOGICO QUE EVENTUALMENTE LLEVA AL DANO FISICO DEL MECANISMO DEL OIDO.

EL PROCESO AUDITIVO CONSISTE FUNDAMENTALMENTE DE TRES PARTES: 1) PROPAGACION DE UNA ONDA COMPLEJA POR MEDIO DEL TIMPANO, LOS HUESILLOS, Y EL FLUIDO COCLEAR; 2) LA TRANSDUCCION DE IMPULSOS MECANICOS (VIBRACION DE LA MEMBRANA BASILAR) A IMPULSOS ELECTRICOS (SENALES NERVIOSAS) Y 3) DECODIFICACION DE SENALES NERVIOSAS EN

MENSAJES QUE PUEDEN O NO TENER ALGUN SIGNIFICADO.

LA PROPAGACION DE LAS ONDAS MECANICAS ESTA DETERMINADA POR TRES CARACTERISTICAS FISICAS: LA AMPLITUD, LA FRECUENCIA Y LA FASE DE CADA COMPONENTE.

EL SONIDO PERCIBIDO ESTA CARACTERIZADO POR TRES ATRIBUTOS PSICOFISICOS: EL GRADO DE ALTURA, EL VOLUMEN Y EL TIMBRE. A GRANDES RASGOS, A CADA CARACTERISTICA FISICA CORRESPONDE UNA PSICOFISICA, DE LA SIGUIENTE MANERA:



ESTA CORRESPONDENCIA NO ES TAN SENCILLA PARA EL CASO DEL TIMBRE, QUE EN REALIDAD ESTA DETERMINADO POR UNA COMBINACION DE GRADOS DE ALTURA Y VOLUMEN (SUPERPOSICION DE ONDAS).

LOS ATRIBUTOS PRINCIPALES DE UN TONO: GRADO DE ALTURA, VOLUMEN SE DETERMINAN SOBRE LA BASE DEL ESTUDIO DE TONOS PUROS DE UNA SOLA FRECUENCIA, MIENTRAS QUE EL TIMBRE SOLO APARECE EN EL CASO DE ONDAS COMPLEJAS, Y DEPENDE DE LA CLASE DE MEZCLA DE SONIDOS PUROS, O COMPONENTES ARMONICOS, DE LA TONO COMPLEJO.

EL USO DE LA SIMULACION EN COMPUTADORAS ES DE GRAN AYUDA CUANDO UN FENOMENO FISICO NO PUEDE SER ESTUDIADO EXPERIMENTALMENTE.

EL MODELO UTILIZADO EN ESTE TRABAJO NO ES UNICO, PRESENTA SOLAMENTE UNA POSIBLE SOLUCION AL PROBLEMA DE LA VIBRACION DE LA MEMBRANA BASILAR.

EL MODELO SE AJUSTA BASTANTE BIEN PARA LOS DATOS EXPERIMENTALES HASTA 1000 CPS.

APENDICE A SIMULACION Y MODELOS:

SE PRESENTA A CONTINUACION UNA DESCRIPCION, SEGUN SHANNON (1975), DE LO QUE SON LOS MODELOS Y LA SIMULACION PARA LA EXPERIMENTACION DE SISTEMAS.

A.1 SIMULACION:

SIMULACION ES EL PROCESO DE DISEÑO DE UN MODELO DE UN SISTEMA REAL PARA PODER REALIZAR EXPERIMENTOS CON EL PROPOSITO TANTO DE ENTENDER EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA COMO EL DE EVALUAR LAS FORMAS (DENTRO DE LOS LIMITES IMPUESTOS POR UN CRITERIO O UN CONJUNTO DE CRITERIOS) DE OPERACION DEL SISTEMA.

LA SIMULACION ES APLICABLE A TODAS LAS DISCIPLINAS (FISICA, ECONOMIA, INGENIERIA, ETC). LA SIMULACION TAL COMO LA CONOCEMOS AHORA TUVO SUS RAICES EN LOS PROGRAMAS AERODISPACIALES.

A.2 MODELOS:

UN MODELO ES LA REPRESENTACION DE UN OBJETO, SISTEMA, O IDEA EN OTRA FORMA QUE NO SEA LA ORIGINAL. SU PROPOSITO ES USUALMENTE EL AYUDARNOS A EXPLICAR, ENTENDER, O MEJORAR, UN SISTEMA.

CASI TODOS LOS AUTORES CIENTIFICOS DICEN QUE UNA DE LAS AYUDAS MAS IMPORTANTES PARA RESOLVER UN PROBLEMA ES LA CONSTRUCCION Y USO DE UN MODELO. DICHO MODELO PUEDE TOMAR MUCHAS FORMAS, PERO UNA DE LAS MAS UTILES Y CIERTAMENTE LA MAS USADA ES LA MATEMATICA, EXPRESANDO ATRAVES DE UN CONJUNTO DE ECUACIONES LAS CARACTERISTICAS MAS IMPORTANTES DEL SISTEMA O FENOMENO QUE SE ESTA ESTUDIANDO.

A.3 FUNCIONES DE UN MODELO

EL CONCEPTO DE REPRESENTAR ALGUN OBJETO, SISTEMA, O IDEA MEDIANTE UN MODELO, ES TAN GENERAL QUE ES DIFICIL CLASIFICAR TODAS LAS FUNCIONES QUE LOS MODELOS PUEDEN DESEMPEÑAR.

ELMAGHRABY (1968) RECONOCE POR LO MENOS CINCO USOS COMUNES:

- 1- UNA AYUDA PARA PENSAR.
- 2- UNA AYUDA PARA COMUNICARSE.
- 3- PARA PROPOSITOS DE ENTRENAMIENTO E INSTRUCCION.
- 4- UNA HERRAMIENTA PARA PREDECIR.
- 5- UNA AYUDA PARA LA EXPERIMENTACION.

LA CONSTRUCCION DE MODELOS NOS FORZA A ORGANIZAR, EVALUAR Y EXAMINAR LA VALIDEZ DE NUESTROS PENSAMIENTOS.

UNA VENTAJA DE LOS MODELOS SOBRE LAS DESCRIPCIONES VERBALES ES QUE PUEDEN REPRESENTAR DE UNA FORMA BASTANTE CONCISA DIVERSAS SITUACIONES.

ES POSIBLE QUE UNO DE LOS MAS IMPORTANTES USOS DE LOS MODELOS, PRACTICA E HISTORICAMENTE, SEA EL PREDECIR LAS CARACTERISTICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LA ENTIDAD QUE ESTA SIENDO MODELADA.

EL USO DE MODELOS NOS PERMITE HACER EXPERIMENTACION CONTROLADA EN SITUACIONES DONDE LA EXPERIMENTACION DIRECTA ES IMPRACTICA O PROHIBITIVA EN COSTO. LA EXPERIMENTACION DIRECTA SOBRE, UN SISTEMA USUALMENTE CONSISTE EN VARIAR ALGUNOS PARAMETROS DEL SISTEMA MIENTRAS SE MANTIENEN TODOS LOS OTROS CONSTANTES, Y SE OBSERVAN LOS RESULTADOS.

A.4 CLASIFICACION DE LOS MODELOS DE SIMULACION:

SE PUEDEN CLASIFICAR LOS MODELOS EN UN SINNUMERO DE FORMAS INFORTUNADAMENTE, NINGUNA ES COMPLETAMENTE SATISFATORIA, SIN EMBARGO CADA UNA SIRVE PARA UN PROPOSITO PARTICULAR. ALGUNOS ESQUEMAS DE ESTAS CLASIFICACIONES PODRIAN SER:

- 1- ESTATICOS (CRUSS-SECTION) VS. DINAMICAS (TIME-SERIES). - ~~III~~
- 2- DETERMINISTICOS VS. ESTOCASTICOS. - ~~Of~~
- 3- DISCRETOS VS. CONTINuos.
- 4- PICTORICOS VS. ANALOGICOS VS. SIMBOLICOS.

SEGUN A.J. ROWE (1963), PODEMOS PENSAR EN LOS MODELOS DE SIMULACION COMO UN ESPECTRO CONTINUO, COMEZANDO CON LOS MODELOS LLAMADOS EXACTOS Y PROSIGUIENDO CON LOS MODELOS MATEMATICOS COMPLETAMENTE ABSTRACTOS.

LOS MODELOS AL COMIENZO DEL ESPECTRO (FIG A.1.1) SON FRECUENTEMENTE LLAMADOS MODELOS FISICOS O PICTORICOS YA QUE ELLOS SE PARECEN AL SISTEMA QUE SE ESTA ESTUDIANDO. LOS MODELOS FISICOS PUEDEN SER ESTATICOS O DINAMICOS Y TAMBIEN A DIFERENTES ESCALAS. LA CARACTERISTICA DISTINTIVA DE UN MODELO FISICO ES QUE DE ALGUNA FORMA "SE PARECE" A LA ENTIDAD QUE ESTA SIENDO MODELADA.

MODELOS ANALOGICOS SON AQUELLOS EN LOS CUALES UNA PROPIEDAD DEL OBJETO REAL ES REPRESENTADA POR UNA PROPIEDAD SUBSTITUIDA QUE A MENUDO SE COMPORTA EN LA MISMA FORMA QUE LA REAL. EL PROBLEMA ES ALGUNAS VECES RESUELTO EN EL ESTADO SUBSTITUIDO Y LUEGO LA RESPUESTA SE TRADUCE AL ESTADO ORIGINAL. UN EJEMPLO PUEDE SER LA REGLA DE CALCULO EN LA CUAL LA PROPIEDAD A MEDIR ES REPRESENTADA POR MEDIDAS LOGARITMICAS A LO LARGO DE UNA ESCALA. UNA GRAFICA ES OTRO EJEMPLO DE MODELO ANALOGICO. OTROS MODELOS ESQUEMATICOS DIFERENTES A LAS GRAFICAS SON TAMBIEN MODELOS ANALOGICOS; EL ORGANIGRAMA ES UN EJEMPLO CLASICO.

CONFORME CAMINAMOS ATRAVES DEL ESPECTRO, NOS ACERCAMOS A AQUELLOS MODELOS EN QUE UN COMPONENTE HUMANO Y UN COMPUTADOR INTERACCIONAN. ESTOS MODELOS SON FRECUENTEMENTE LLAMADOS JUEGOS (GUERRA, ADMINISTRACION, PLANEAMIENTO, ETC).

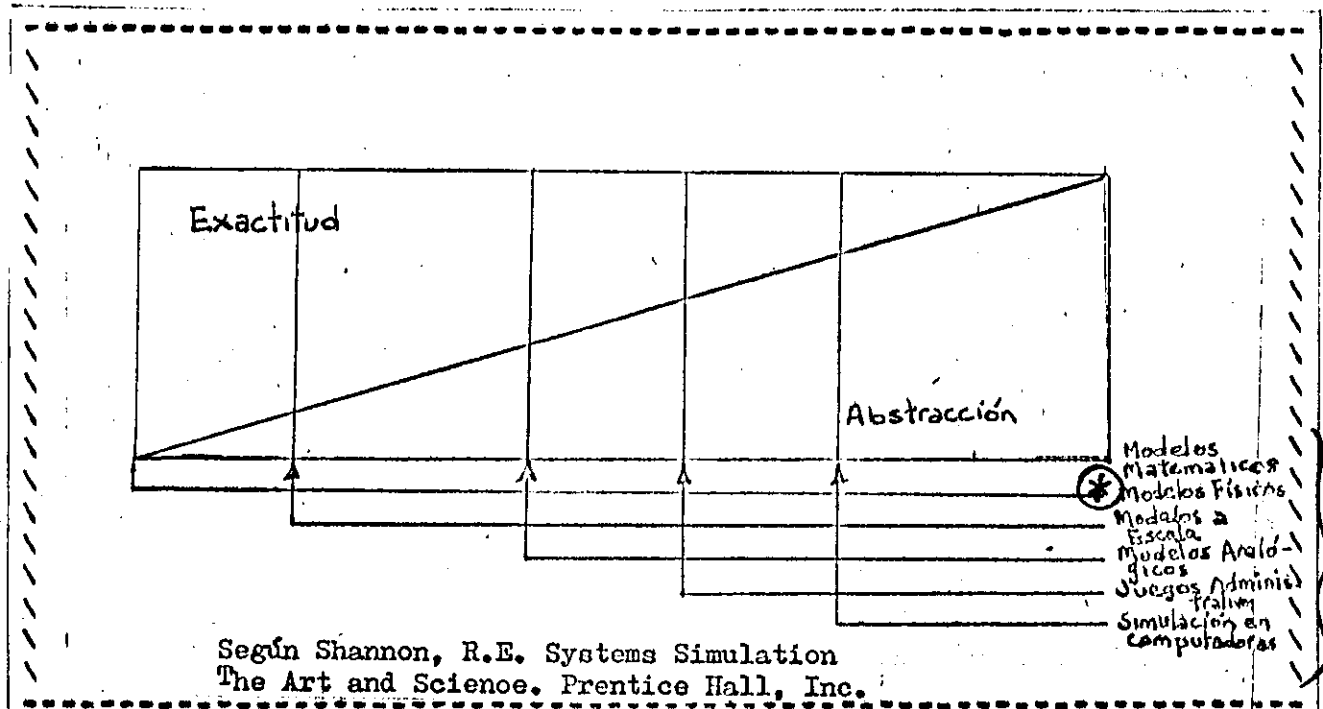


FIGURA A.1.1

MODELOS SIMBOLICOS O MATEMATICOS SON AQUELLOS EN QUE UN SIMBOLO, EN VEZ DE UN DISPOSITIVO FISICO, ES USADO PARA REPRESENTAR UNA ENTIDAD. EL REPRESENTAR UN SISTEMA POR UN CONJUNTO DE ECUACIONES DIFERENCIALES ES UN EJEMPLO CLASICO. DEBIDO A QUE ESTOS MODELOS SON LOS MAS ABSTRACTOS Y POR LO TANTO LOS MAS GENERALES, LOS MODELOS MATEMATICOS SON BASTANTE USADOS EN ESTUDIOS DE SISTEMAS.

A.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SIMULACION:

TODOS LOS MODELOS DE SIMULACION SON MEJOR CONOCIDOS COMO MODELOS "INPUT-OUTPUT". ESTO ES DEBIDO A QUE ELLOS PRODUCEN UN RESULTADO (OUTPUT) CUANDO SE LES DA UN DATO O ORDEN (INPUT) A LOS SUBSISTEMAS QUE INTERACTUAN CON EL SISTEMA. LOS MODELOS DE SIMULACION PUEDEN SERVIR UNICAMENTE COMO UNA HERRAMIENTA PARA EL ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA BAJO CONDICIONES ESPECIFICADAS POR EL EXPERIMENTADOR. AUN ASI, LA SIMULACION NO ES UNA TEORIA PERO SI UNA METODOLOGIA PARA LA RESOLUCION DE PROBLEMAS.

BARISH (1962) DICE QUE "LA EXPERIMENTACION DIRECTA SOBRE UN SISTEMA EN LA VIDA REAL ELIMINA MUCHAS DE LAS DIFICULTADES AL TRATAR DE OBTENER UNA BUENA RELACION ENTRE EL MODELO Y LAS CONDICIONES REALES"; SIN EMBARGO, LAS DESVENTAJAS DE LA EXPERIMENTACION DIRECTA SON ALGUNAS VECES MAYORES.

- 1- SI HAY PERSONAS COMO PARTE INTEGRAL DEL SISTEMA, EL LLAMADO "EFECTO Hawthorne", VA A AFECTAR LOS RESULTADOS. (I.E., EL HECHO DE QUE LAS PERSONAS ESTEN SIENDO OBSERVADAS AFECTARA SU COMPORTAMIENTO).

- 2- VA A SER MUY DIFÍCIL MANTENER LAS MISMAS CONDICIONES DE OPERACION PARA CADA CORRIDA O REPETICION DEL EXPERIMENTO.
- 3- VA A SER MAS CARO Y A TOMAR MAS TIEMPO EL OBTENER EL MISMO TAMAÑO DE MUESTRA.
- 4- NO VA A SER POSIBLE EXPLORAR MUCHOS TIPOS DE ALTERNATIVAS EXPERIMENTALES EN LA VIDA REAL.

SIN EMBARGO, EL ANALISTA DEBE CONSIDERAR EL USO DE LA SIMULACION CUANDO EXISTEN UNA O MAS DE LAS SIGUIENTES CONDICIONES:

- 1- NO EXISTE UNA FORMULACION MATEMATICA COMPLETA DEL PROBLEMA O BIEN LOS METODOS ANALITICOS PARA RESOLVER EL MODELO MATEMATICO NO HAN SIDO TODAVIA DESARROLLADOS.
- 2- EXISTEN METODOS ANALITICOS, PERO LOS PROCEDIMIENTOS MATEMATICOS SON MUY COMPLEJOS Y ARDUOS POR LO QUE LA SIMULACION NOS PROVEE DE UN METODO MAS SIMPLE PARA LA SOLUCION.
- 3- LA SOLUCION ANALITICA EXISTE PERO ESTA MAS ALLA DE LA HABILIDAD MATEMATICA DEL PERSONAL DISPONIBLE. EL COSTO DE DISEÑAR, PROBAR, Y CORRER UNA SIMULACION DEBE SER EVALUADO CONTRA EL COSTO DE OBTENER AYUDA EXTERIOR.
- 4- LA SIMULACION ES LA UNICA POSIBILIDAD YA QUE EXISTE LA GRAN DIFICULTAD DE REALIZAR LOS EXPERIMENTOS Y OBSERVAR LOS FENOMENOS EN SU MEDIO AMBIENTE REAL. POR EJEMPLO: ESTUDIOS DE VEHICULOS ESPACIALES EN VUELOS INTERPLANETARIOS.
- 5- SE DESEA OBSERVAR UN HISTORIAL SIMULADO DEL PROCESO SOBRE UN PERIODO DE TIEMPO ADEMAS DE OBTENER ESTIMACIONES SOBRE CIERTOS PARAMETROS.
- 6- ES NECESARIA UNA DISMINUCION DEL TIEMPO EMPLEADO. PARA SISTEMAS O PROCESOS CON UN TIEMPO DE EJECUCION MUY GRANDE, LA SIMULACION TIENE COMPLETO CONTROL SOBRE EL TIEMPO, YA QUE EL FENOMENO PUEDE SER ACELERADO O PARADO A DESEO DEL EXPERIMENTADOR.

UNA GRAN VENTAJA DE LA SIMULACION ES SU GRAN APLICABILIDAD A LA EDUCACION Y AL ENTRENAMIENTO DE PERSONAL. EL DESARROLLO Y USO DE UN MODELO DE SIMULACION PERMITE AL EXPERIMENTADOR VER Y MANIOBRAR CON EL SISTEMA. ESTO ES DE GRAN AYUDA PARA EL, YA QUE LE PERMITE ENTENDER MEJOR EL PROBLEMA.

A.6 ESTRUCTURA DE LOS MODELOS DE SIMULACION:

AUN CUANDO UN MODELO ES MUY COMPLICADO MATEMATICAMENTE O FISICAMENTE, SU ESTRUCTURA BASICA ES MUY SENCILLA. ESTA ESTRUCTURA BASICA SE PUEDE REPRESENTAR MATEMATICAMENTE COMO: $E = F(X, Y)$

DONDE:

- E ES EL RESULTADO DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA.
- X & Y SON LAS VARIABLES Y LOS PARAMETROS QUE NOSOTROS PODEMOS CONTROLAR.
- F ES LA RELACION ENTRE X & Y, DE DONDE OBTENEMOS E.

EN UNA FORMA MAS GENERAL, SE PUEDE OBSERVAR QUE CASI CUALQUIER MODELO ESTA FORMADO DE ALGUNA COMBINACION DE LOS SIGUIENTES INGREDIENTES:

*¿ de qué?
 Origen =*

- 1- COMPONENTES.
- 2- VARIABLES.
- 3- PARAMETROS.
- 4- RELACIONES FUNCIONALES.
- 5- RESTRICCIONES.
- 6- FUNCIONES DE CRITERIO.

*exogenas
& sus
esto*

- p.ej. - weighting function

POR COMPONENTES ENTENDEMOS LAS PARTES CONSTITUYENTES TALES QUE CUANDO LAS UNIMOS FORMAN EL SISTEMA. ALGUNAS VECES SE LES CONOCE COMO ELEMENTOS O SUBSISTEMAS. POR EJEMPLO: EN EL MODELO DE UNA CIUDAD, LOS COMPONENTES DEBEN SER EL SISTEMA EDUCATIVO, SISTEMA DE SALUD, SISTEMA DE TRANSPORTE, ETC. UN SISTEMA ESTA DEFINIDO COMO UN GRUPO O CONJUNTO DE OBJETOS UNICOS POR ALGUNA FORMA REGULAR DE INTERACCION O INTERDEPENDENCIA QUE EJECUTAN FUNCIONES ESPECIFICAS.

LOS PARAMETROS SON CANTIDADES A LAS CUALES EL OPERADOR DEL MODELO LES PUEDE ASIGNAR VALORES ARBITRARIOS, A DISTINCION DE LAS VARIABLES, LAS CUALES PUEDEN ASUMIR SOLAMENTE AQUELLOS VALORES QUE LA FORMA DE LA FUNCION PERMITA. POR EJEMPLO, EN LA ECUACION $Y = 3X$, EL NUMERO 3 ES UN PARAMETRO; X & Y SON VARIABLES.

PODEMOS RECONOCER DOS TIPOS DE VARIABLES EN EL MODELO DE UN SISTEMA: EXOGENAS Y ENDOGENAS. LAS VARIABLES EXOGENAS SON TAMBIEN LLAMADAS VARIABLES INPUT, I.E., SON VARIABLES ORIGINADAS O PRODUCIDAS FUERA DEL SISTEMA O PRODUCIDAS POR CAUSAS EXTERNAS. LAS VARIABLES ENDOGENAS SON AQUELLAS QUE SON PRODUCIDAS DENTRO DEL SISTEMA O PRODUCIDAS POR CAUSAS INTERNAS. TAMBIEN SE CONOCE A LAS VARIABLES ENDOGENAS COMO VARIABLES DE STATUS (PARA INDICAR SU ESTADO O CONDICION DENTRO DEL SISTEMA) O VARIABLES DE OUTPUT (CUANDO ABANDONAN EL SISTEMA).

TAMBIEN *porque* SE LLAMA A LAS VARIABLES EXOGENAS VARIABLES INDEPENDIENTES, Y A LAS ENDOGENAS VARIABLES DEPENDIENTES.

LAS RELACIONES FUNCIONALES DESCRIBEN A LAS VARIABLES Y A LOS PARAMETROS DE TAL FORMA QUE MUESTRAN SU COMPORTAMIENTO DENTRO DE UN COMPONENTE O ENTRE COMPONENTES DE UN SISTEMA. ESTAS RELACIONES O CARACTERISTICAS DE OPERACION SON TANTO DETERMINISTICAS COMO ESTOCASTICAS. LAS RELACIONES DETERMINISTICAS SON IDENTIDADES O DEFINICIONES QUE RELACIONAN CIERTAS VARIABLES O PARAMETROS DONDE EL OUTPUT DE UN PROCESO ES UNICAMENTE, DETERMINADO POR EL INPUT DADO. LAS RELACIONES ESTOCASTICAS, POR OTRO LADO, SON AQUELLAS EN LAS CUALES EL PROCESO TIENE CARACTERISTICAMENTE UN OUTPUT INCIERTO PARA UN INPUT DADO. AMBOS TIPOS DE RELACIONES USUALMENTE TOMAN LA FORMA DE ECUACIONES MATEMATICAS, RELACIONANDO LAS VARIABLES ENDOGENAS CON LAS EXOGENAS.

LAS RESTRICCIONES SON LIMITACIONES IMPUESTAS SOBRE LOS VALORES DE LAS VARIABLES O EN LA FORMA EN QUE LOS RECURSOS PUEDEN SER DISTRIBUIDOS. ESTAS RESTRICCIONES PUEDEN SER TANTO AUTO-IMPUESTAS

POR EL DISENADOR COMO IMPUESTAS POR LA NATURALEZA DEL SISTEMA.

LA FUNCION DE CRITERIO ES UNA DECLARACION EXPLICITA DE LOS OBJETIVOS O METAS DEL SISTEMA Y COMO ESTAS SERAN EVALUADAS. ESTA DECLARACION EXPLICITA Y NO AMBIGUA DE CRITERIO ES MUY IMPORTANTE POR DOS RAZONES: PRIMERA, TIENE IMPORTANTISIMA INFLUENCIA SOBRE EL DISENO Y MANIPULACION DEL MODELO. SEGUNDA, UNA DECLARACION ERRONEA DE CRITERIO PUEDE LLEVAR A CONCLUSIONES ERRONEAS. LA FUNCION DE CRITERIO ES USUALMENTE UNA PARTE INTEGRAL DEL MODELO, Y LA MANIPULACION DEL MODELO ES GUIADA POR INTENTOS DE OPTIMIZAR O SATISFACER EL CRITERIO ESTABLECIDO.

A.7 CRITERIOS PARA UN BUEN MODELO

SE HA DEFINIDO SIMULACION COMO UN PROCESO PARA DISENAR UN MODELO DE UN SISTEMA REAL Y CONDUCCION EXPERIMENTOS CON EL PROPOSITO DE ENTENDER TANTO EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA COMO LA EVALUACION DE VARIAS ESTRATEGIAS PARA LA OPERACION DE UN SISTEMA. POR LO TANTO, UN MODELO QUE PUEDE DAR RESPUESTAS ABSURDAS DEBE SER CONSIDERADO SUSPECHOSO INMEDIATAMENTE. TODO MODELO DEBE SER EVALUADO EN LOS RANGOS EXTREMOS DE VALORES DE LOS PARAMETROS Y VARIABLES. FINALMENTE SIEMPRE HAY QUE RECORDAR AL USUARIO DE LA INFORMACION GENERADA.

UN BUEN MODELO DE SIMULACION DEBE SER:

- 1-SIMPLE DE ENTENDER POR EL USUARIO.
- 2-DIRIGIDO POR METAS O PROPOSITOS CLAROS.
- 3-APROPIADO, EN EL SENTIDO DE QUE NO DEBE DAR RESPUESTAS ABSURDAS.
- 4-FACIL DE SER MANEJADO Y CONTROLADO POR EL USUARIO, I.E., DEBIERA SER FACIL EL COMUNICARSE CON EL.
- 5-COMPLETO, SOBRE TEMAS IMPORTANTES.
- 6-ADAPTATIVO, CON UN PROCEDIMIENTO SENCILLO PARA LA MODIFICACION O MANTENIMIENTO DEL MODELO.
- 7-EVOLUTIVO, EN EL SENTIDO DE QUE DEBE COMENZAR SIMPLE Y LLEGAR A SER MAS COMPLEJO, AL MISMO TIEMPO QUE EL USUARIO INTERACTUA CON EL.

LA SIMULACION DE MODELOS DEBIERA SER UN PROCESO DE APRENDIZAJE PARA AMBOS, EL MODELADOR Y EL USUARIO.

A.8 EL PROCESO DE LA SIMULACION:

ASUMIENDO QUE SE VA A USAR SIMULACION PARA INVESTIGAR LAS PROPIEDADES DE UN SISTEMA REAL, DEBEN SEGUIRSE LAS SIGUIENTES ETAPAS:

- 1- DEFINICION DEL SISTEMA: DETERMINAR LAS FRONTERAS, RESTRICCIONES Y LA MEDIDA DE LA EFECTIVIDAD A SER USADA EN LA DEFINICION DEL SISTEMA.
- 2- FORMULACION DEL MODELO: REDUCCION O ABSTRACCION DEL SISTEMA REAL A UN DIAGRAMA DE FLUJO.
- 3- PREPARACION DE LOS DATOS: IDENTIFICACION DE LOS DATOS QUE NECESITA EL MODELO, Y SU REDUCCION A UNA FORMA

- APROPIADA.
- 4- TRADUCCION DEL MODELO: DESCRIPCION DEL MODELO EN UN LENGUAJE ACEPTABLE AL COMPUTADOR QUE VA HA SER USADO.
 - 5- VALIDACION: INCREMENTAR A UN NIVEL DE CONFIABILIDAD ACEPTABLE LA VALIDEZ DE UNA INFERENCIA OBTENIDA DEL MODELO.
 - 6- PLANEAMIENTO ESTRATEGICO: DISENO DE UN EXPERIMENTO QUE NOS PROPORCIONA LA INFORMACION DESEADA.
 - 7- PLANEAMIENTO TACTICO: DETERMINACION DE COMO CADA CORRIDA DEL TEST ESPECIFICO EN EL DISENO EXPERIMENTAL VA HA SER EJECUTADA.
 - 8- EXPERIMENTACION: EJECUCION DE LA SIMULACION PARA GENERAR LOS DATOS DESEADOS Y EJECUTAR ANALISIS SENSITIVOS.
 - 9- INTERPRETACION: OBTENER INFERENCIAS DE LOS DATOS GENERADOS POR LA SIMULACION.
 - 10-IMPLEMENTACION: PONER EL MODELO Y/O LOS RESULTADOS A USARSE.
 - 11-DOCUMENTACION: ANOTAR LAS ACTIVIDADES DEL PROYECTO, Y LOS RESULTADOS. TAMBIEN DOCUMENTAR EL MODELO Y SUS USOS.

LOS PASOS ANTERIORES ASUMEN LA MEJOR FORMA DE RESOLVER EL PROBLEMA ES USANDO SIMULACION. LOS PASOS O ELEMENTOS DE UNA SIMULACION Y SUS RELACIONES SON MOSTRADAS EN EL DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FIGURA A.1.2.

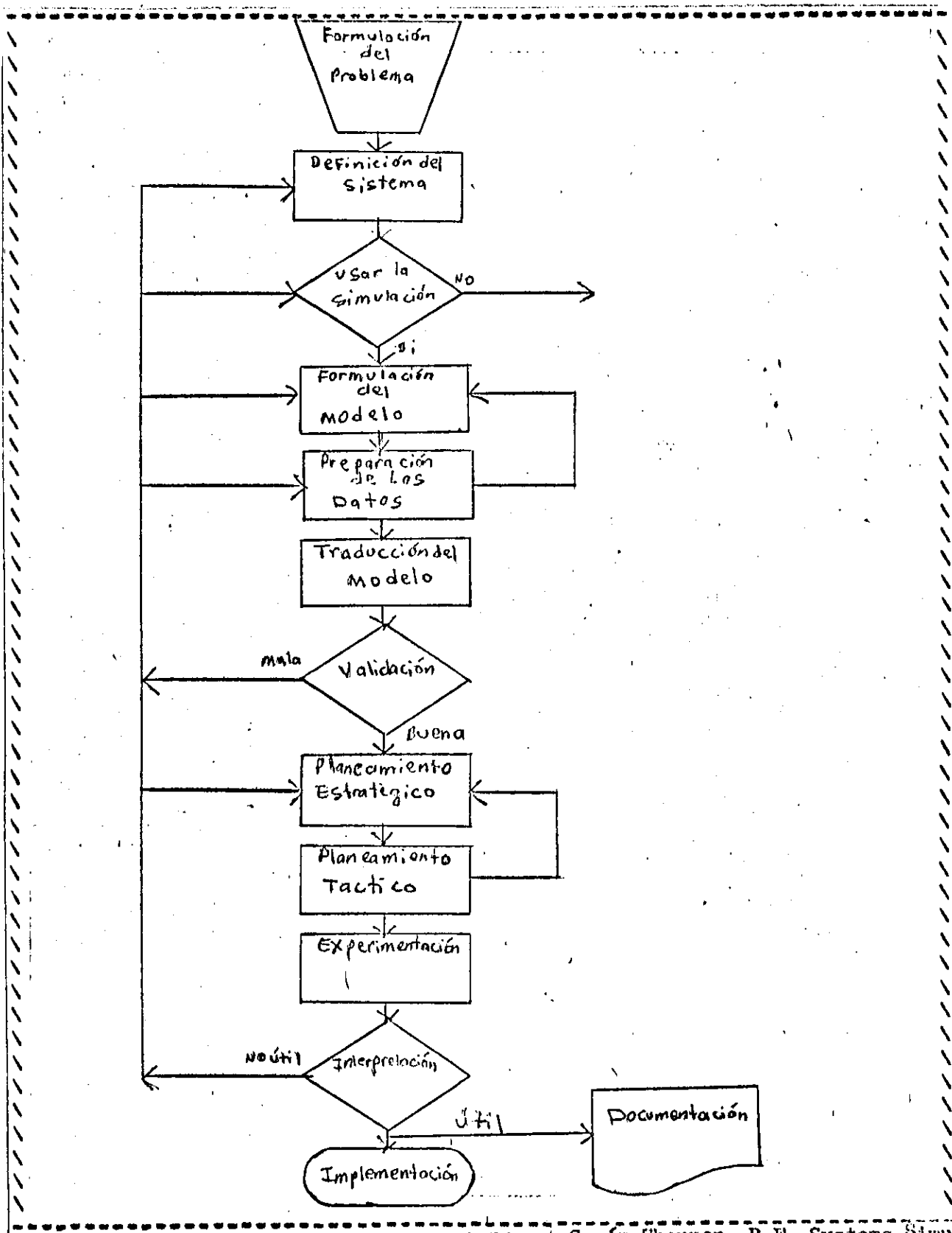


FIGURA A.1.2

Según Shannon, R.E. Systems Simulation The Art and Science. Prentice Hall, Inc.

APENDICE B
MODELOS PARA APROXIMAR EL DESPLAZAMIENTO
DE LA MEMBRANA BASILAR
POR J.L. FLANAGAN (1960)

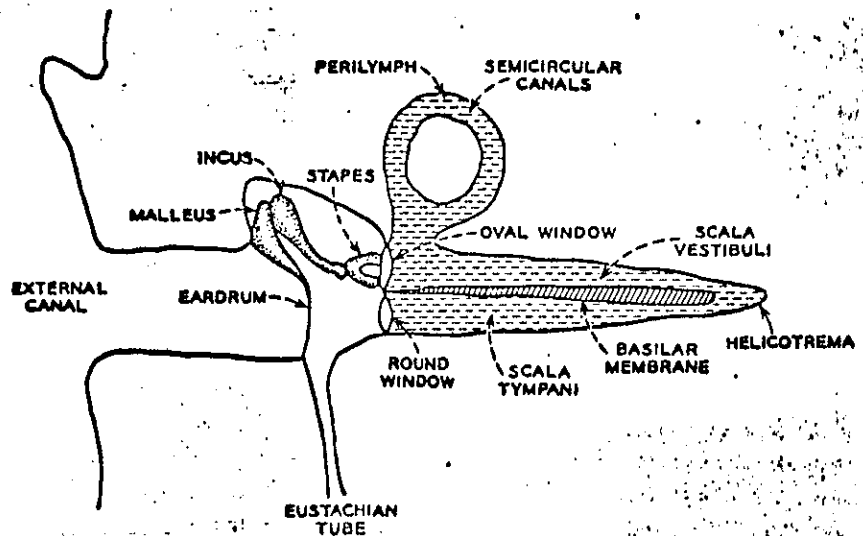
EN ESTE CAPITULO SE DESAROLLAN TRES MODELOS ANALITICOS PARA ESTIMAR EL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR EN EL OIDO HUMANO CUANDO SE CONOCE LA PRESION DEL SONIDO SOBRE EL TIMPANO.

B.1 PROPIEDADES MECANICAS DEL OIDO MEDIO Y LA COCLEA:

PARA RECORDAR DATOS Y ESTABLECER UN MARCO DE REFERENCIA, UN ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL MECANISMO PERIFERICO DE LA AUDICION ES MOSTRADO EN LA FIGURA B.1. LA COCLEA ES PRESENTADA ACÁ DESENROLLADA Y ESTIRADA. CONTIENE UN LIQUIDO LLAMADO PERILINFA Y ESTA PARTIDA LONGITUDINALMENTE POR UN DUCTO FORMADO POR LA MEMBRANA DE REISSNER Y LA MEMBRANA BASILAR. EL DUCTO, APROXIMADAMENTE TRIANGULAR EN SU SECCION TRANSVERSAL, ESTA LLENO DE OTRO FLUIDO, LLAMADO ENDOLINFA. BEKESY (1947) HA ESTABLECIDO QUE LA MEMBRANA BASILAR Y LA MEMBRANA DE REISSNER VIBRAN CON LA MISMA FASE CUANDO EL OIDO ES ESTIMULADO POR SONIDOS EN EL RANGO BAJO DE LAS FRECUENCIAS AUDIBLES. YA QUE EN ESTE TRABAJO NO SE TOMARA EN CUENTA LA MEMBRANA DE REISSNER, SOLO SE DIBUJA LA MEMBRANA BASILAR EN LA FIGURA B.1.

CUANDO UNA ONDA SONORA LLEGA AL OIDO ES TRANSMITIDA A TRAVES DEL CONDUCTO AUDITIVO EXTERNO HACIA EL TIMPANO, AL CUAL PONE A VIBRAR. LA VIBRACION ES TRANSMITIDA POR LA CADENA USCULAR A LA COCLEA, DONDE LA ACCION TIPO PISTÓN QUE HACE EL PIE DEL ESTRIBO PRODUCE UNA ONDA DE COMPRESION EN EL FLUIDO. DEBIDO A SU DISTRIBUCION DE MASA Y A SUS CONSTANTES DE VISCOSIDAD Y ELASTICIDAD, Y TAMBIEN A LA DISMINUCION DE PRESION QUE OCURRE EN LA VENTANA REDONDA, LA MEMBRANA BASILAR VIBRA SELECTIVAMENTE DE ACUERDO A LA FRECUENCIA CONTENIDA EN EL ESTIMULO.

LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LA COCLEA HAN SIDO ESTUDIADAS EN DETALLE POR BEKESY (1949). EL ENCONTRÓ QUE, CUANDO EL ESTRIBO ES MOVIDO SINUSOIDALMENTE CON UNA AMPLITUD DE DESPLAZAMIENTO CONSTANTE, LA AMPLITUD DEL DESPLAZAMIENTO DE LOS PUNTOS A LO LARGO DEL EXTREMO DE BAJAS FRECUENCIAS (O APICAL) DE LA MEMBRANA BASILAR VARIA CON LA FRECUENCIA COMO SE MUESTRA EN LA FIG. B.2. EL DESPLAZAMIENTO PICO DE CADA PUNTO ES NORMALIZADO A LA UNIDAD. LAS MEDICIONES DE BEKESY (1949) DE LA DIFERENCIA DE FASE ENTRE EL DESPLAZAMIENTO DEL ESTRIBO Y EL DEPLAZAMIENTO DE LOS PUNTOS A LO LARGO DE LA MEMBRANA BASILAR SON MOSTRADOS EN LA FIG. B.3. BEKESY (1942) ENCONTRO QUE CUANDO LA PRESION DEL SONIDO ES CONSTANTE EN EL TIMPANO, LA MAGNITUD DEL DESPLAZAMIENTO DE VOLUMEN DE LA

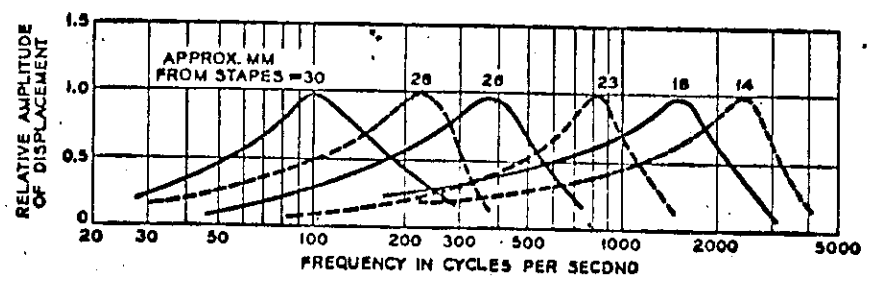


Dibujo esquemático del oído humano. Según Flanagan, J.L. Models for Approximating Basilar Membrane Displacement. Bell Syst. Tech. J.

FIGURA B.1

VENTANA REDONDA ES CASI CONSTANTE HASTA CERCA DE 2000 CPS. SI SUPONEMOS QUE LA PERILINFA ES INCOMPRESIBLE Y LAS PAREDES DE LA COCLEA SON RIGIDAS, EL DESPLAZAMIENTO DEL VOLUMEN DE LA VENTANA REDONDA ES IGUAL AL DEL PIE DEL ESTRIBO.

LOS DATOS REPORTADOS POR ZWISLOCKI (1957) Y POR BEKESY (1942) INDICAN QUE, PARA LAS FRECUENCIAS ABAJO DE LOS 1000 CPS, LA IMPEDANCIA TOTAL DEL OIDO MEDIO Y DE LA COCLEA ES PREDOMINANTEMENTE ELASTICA, DEBIENDOSE PRINCIPALMENTE A LAS CARACTERISTICAS DE LA CAVIDAD DEL OIDO MEDIO, LA MEMBRANA DE LA VENTANA REDONDA Y LOS LIGAMENTOS QUE SOSTIENEN LOS HUESECILLOS Y EL TIMPANO. PARA ESTAS FRECUENCIAS EL DESPLAZAMIENTO DEL ESTRIBO ES ESENCIALMENTE PROPORCIONAL A, Y EN FASE CON, LA PRESION DEL



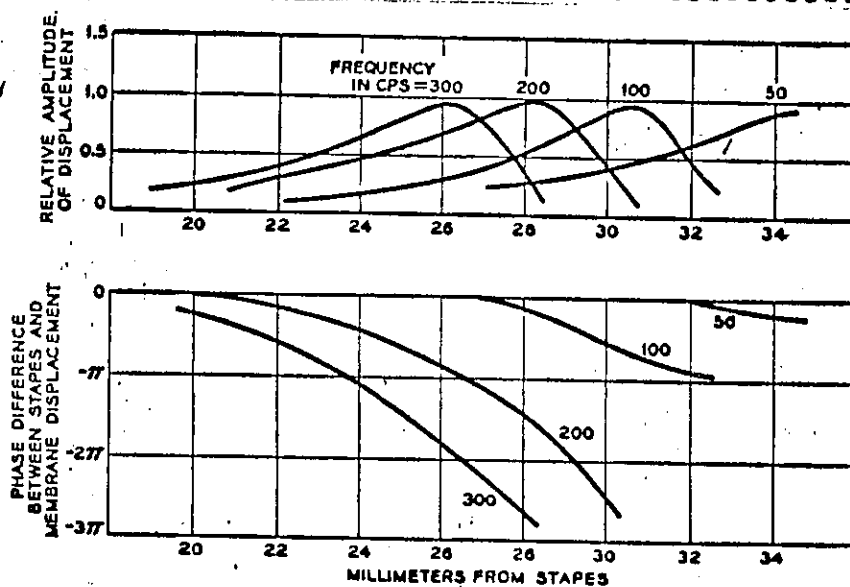
La Amplitud Relativa del desplazamiento como una función de la frecuencia para diferentes puntos a lo largo de la membrana basilar. El estribo se mueve con amplitud constante del desplazamiento. Según Flanagan, J.L. Models for Approximating Basilar Membrane Displacement. Bell Syst. Tech. J.

FIGURA B.2

SCNIDO EN EL TIMPANO. PARA FRECUENCIAS MAS ALLA DE LOS 1000 CPS, LOS ELEMENTOS INERCIALES Y VISCOSOS DEL OIDO MEDIO Y DE LA COCLEA COMIENZAN A SER MAS IMPORTANTES, Y LA VELOCIDAD DEL ESTRIBO APARENTEMENTE PUEDE DISMINUIR EN FASE LA PRESION EN EL TIMPANO COMO $\pi/2$ RADIANTES O MAS. PARA FRECUENCIAS MAS ALLA DE 1000 O 2000 CPS, LA AMPLITUD DEL DESPLAZAMIENTO DEL ESTRIBO COMIENZA A DISMINUIR APRECIABLEMENTE PARA UNA PRESION CONSTANTE EN EL TIMPANO.

DEBIDO A QUE LAS DIMENSIONES FISICAS Y LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LA MEMBRANA BASILAR CAMBIAN A LO LARGO DE SU LONGITUD (POR EJEMPLO, LA MEMBRANA AUMENTA DE ANCHO Y GRUESO Y DISMINUYE LA RESISTENCIA AL IR HACIA EL FINAL APICAL), EL DESPLAZAMIENTO VOLUMETRICO DE LA MEMBRANA POR UNIDAD DE LONGITUD Y POR UNIDAD DE PRESION A TRAVES DE ELLA, CAMBIA CON LA DISTANCIA DESDE EL ESTRIBO. PARA UNA AMPLITUD DE DESPLAZAMIENTO DEL ESTRIBO CONSTANTE, LA AMPLITUD DEL PUNTO QUE MAS SE DESPLAZA NO ES CONSTANTE CON LA FRECUENCIA.

EN MEDICIONES DEL VALOR ABSOLUTO DEL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA, BEKESY ENCONTRÓ QUE EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO A 200 CPS ES DE 10^{-4} CM EN EL UMBRAL DEL SENTIR Y, A TRAVÉS DE EXTRAPOLACION, 10^{-11} CM EN EL UMBRAL DE LA AUDICIÓN (EL DIÁMETRO DEL ÁTOMO DE HIDRÓGENO ES APROXIMADAMENTE DE 10^{-8} CM). PARA UNA FRECUENCIA DADA Y UN PUNTO DADO SOBRE LA MEMBRANA, LOS DATOS DE BEKESY INDICAN QUE LAS VIBRACIONES MECANICAS DEL ESTRIBO Y DE LA MEMBRANA BASILAR SON ESENCIALMENTE RELACIONES LINEALES HASTA QUE SE LLEGA A PRESIONES SONORAS MAS ALLA DEL UMBRAL DE SENSACION.



Amplitud Relativa y fase del desplazamiento de la membrana basilar

como una función de distancia a lo largo de la membrana. Según Flanagan, J. L. Models for Approximating Basilar Membrane Displacement. Bell Syst. Tech. J.

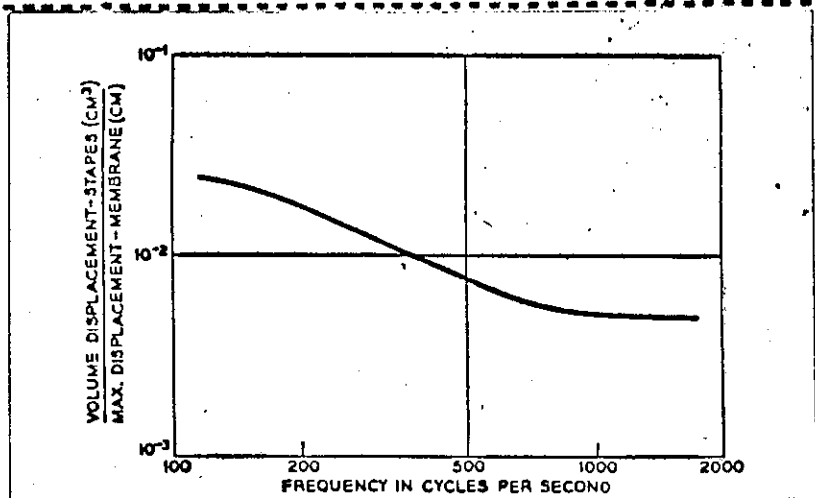
FIGURA B.3

LO QUE SE VA A TRATAR DE HACER ES ENCONTRAR UNA RELACION ANALITICA PARA ESTIMAR EL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR EN UN PUNTO DADO CONOCIENDO LA PRESION SONORA EN EL TIMPANO, VALIDA HASTA POR LO MENOS EN EL RANGO DE LAS FRECUENCIAS MENORES QUE 1000 CPS. ES EN ESTE RANGO QUE EL DESPLAZAMIENTO DEL ESTRIBO SE ENCUENTRA EN FASE , Y ES PROPORCIONAL CON LA PRESION EN EL TIMPANO.

B.2 MODELOS PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR:

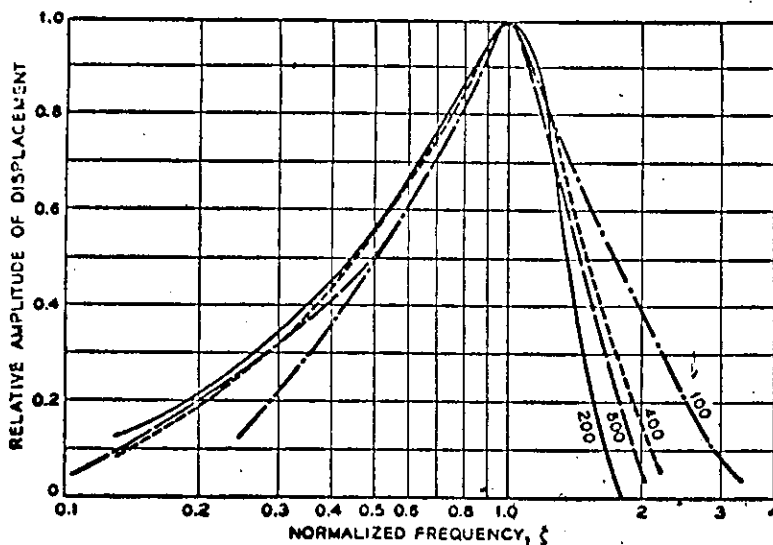
UN MODELO PARA CALCULAR EL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA BASILAR EN UN PUNTO DADO DEBE AJUSTARSE A LOS DATOS DEL DOMINIO DE FRECUENCIA QUE SE MUESTRAN EN LAS FIGURAS B.2 Y B.3. LOS VALORES PICO DE LAS CURVAS DE LA FIGURA B.2 HAN SIDO NORMALIZADOS A LA UNIDAD, PERO, COMO SE PUEDE OBSERVAR DE LA FIGURA B.4, LA RESPUESTA PICO SUBE EN EL RANGO DE FRECUENCIAS HASTA DE 1000 CPS., ARRIBA DE APROXIMADAMENTE 2000 CPS., LA RESPUESTA PICO DECAE , Y EL DESPLAZAMIENTO DEL ESTRIBO YA NO ESTA EN FASE CON LA PRESION EN EL TIMPANO.

SI LOS DATOS DE LAS FIGURAS B.2 Y B.3 SON NORMALIZADOS CON RESPECTO A LA FRECUENCIA DE LA RESPUESTA MAXIMA, LAS CURVAS DE LAS FIGURAS B.6 Y B.7 SON OBTENIDAS RESPECTIVAMENTE. EXCEPTO PARA EL CASO DE 150 CPS., LAS CURVAS DE FASE SON ESTIMADAS LEYENDO PUNTOS VERTICALMENTE DE LA FIGURA B.3. LA CURVA DE 150 CPS. ES UNA SOLA REPUESTA DE FASE COMPLETA PUBLICADA POR BEKESY(1947).



Razón del desplazamiento del volumen del estribo al desplazamiento máximo de la membrana basilar. Según Flanagan, J.L. Models for Approximating Basilar Membrane Displacement. Bell Syst. Tech.J

FIGURA B.4

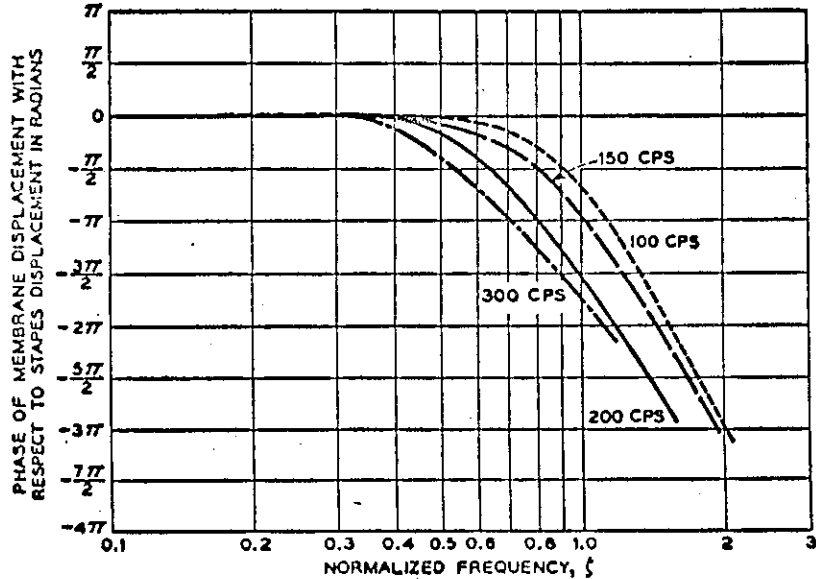


Los datos experimentales del desplazamiento de la Fig. B.2 son graficados con frecuencia normalizada con respecto a la frecuencia del desplazamiento máximo. Según Flanagan, J. L. Models for Approximating Basilar Membrane Displacement, Bell Syst. Tech. J.

FIGURA B.6

SE OBSERVA QUE, EXCEPTO EN EL CASO DE 100 CPS., LAS CURVAS DE AMPLITUD SE ACERCAN ENTRE SI Y REPRESENTAN RESONANCIAS CUYOS ANCHOS DE BANDA SON ESENCIALMENTE PORCENTAJES CONSTANTES DE LAS FRECUENCIAS RESONANTES. LA CURVA DE 100 CPS. ES MAS AMPLIA QUE LAS OTRAS.

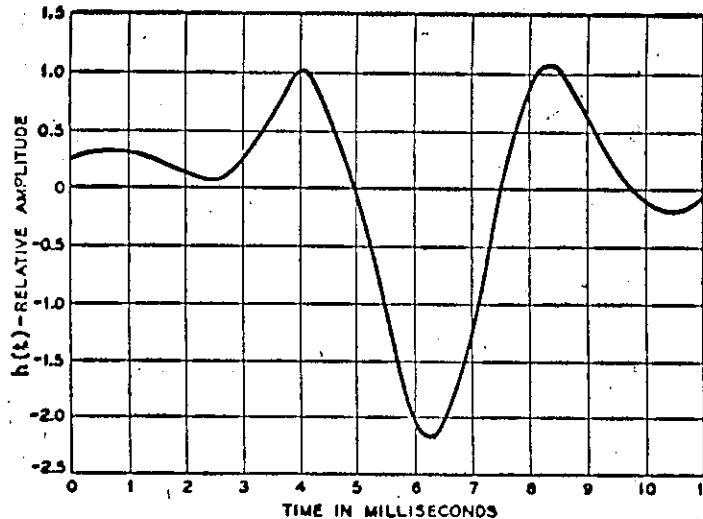
EL CAMBIO TOTAL DE FASE AL PASAR A TRAVES DE UNA RESONANCIA ES DEL ORDEN DE 3π . LAS CURVAS DE FASE PARA LOS PUNTOS DE MENOR FRECUENCIA TIENEN MAYORES PENDIENTES (I.E., $d\Phi/d\omega$), Y EL RETRASO DE LOS PUNTOS DE MENOR FRECUENCIA ES, POR LO TANTO MAYOR. (ESTO ES, POR SUPUESTO, COMO DEBE SER PUES EL TIEMPO REQUERIDO PARA PROPAGAR ENERGIA DEL TIMPANO A PUNTOS CERCANOS AL EXTREMO APICAL DE LA MEMBRANA ES MAYOR QUE PARA PUNTOS QUE SE ENCUENTRAN EN EL EXTREMO BASAL.)



Respuestas de fase deducidas de los datos de la Fig. B.3. La frecuencia esta normalizada como en la Fig. B.6.

Según Flanagan, J.L. Models for Approximating Basilar Membrane Displacement. Bell Syst. Tech. J.

FIGURA B.7



Respuesta de impulso del punto sobre la membrana basilar caracterizada por los datos de amplitud y fase. La transformada inversa de Fourier es

obtenida por integración gráfica de los datos experimentales de dominio de frecuencia. Según Flanagan, J.L. Models for Approximating Basilar Membrane Displacement. Bell Syst. Tech. J.

FIGURA B.5

COMO UNA DISGRESION MENOR, ES INTERESANTE NOTAR QUE LAS PENDIENTES DE LAS CURVAS DE FASE EN LA VECINDAD DE LA RESONANCIA INDICAN VALORES DE RETRASO DE APROXIMADAMENTE EL DOBLE DEL TAMAÑO DE LOS TIEMPOS DE TRANSITO MEDIDOS POR BEKESY(1949). MIDIENDO LAS PENDIENTES DE LAS CURVAS DE FASE EN ESTA REGION (USANDO UNA GRAFICA LINEAL), RESULTA:

FRECUENCIA RESONANTE, f	RETRASO DE FASE, $d\Phi/d\omega$	$2\pi f (d\Phi/d\omega)$
100 CPS.	11.8 MSEC.	7.4 RADIANES
150	7.2	6.8
200	6.4	8.0
300	4.5	8.5

ESTOS TIEMPOS REPRESENTAN LOS RETRASOS DE LAS COMPONENTES DE FRECUENCIA QUE CONTIENEN LA MAYOR PORCION DE ENERGIA DE ESTIMULO, Y NO REPRESENTAN LOS TIEMPOS EN LOS CUALES APARECE UNA RESPUESTA POR PRIMERA VEZ (I.E. LOS TIEMPOS DE TRANSITO). REGRESANDO A LA RESPUESTA DE IMPULSO DETERMINADA GRAFICAMENTE PARA EL PUNTO DE 200 CPS. (FIG. B.5), SE OBSERVA QUE EL MAYOR DESPLAZAMIENTO OCURRE APROXIMADAMENTE A LOS 6.3 MILISEGUNDOS. EL TIEMPO AL CUAL ESENCIALMENTE EMPIEZA LA RESPUESTA ES DEL ORDEN DE 2.5 MILISEGUNDOS, LO CUAL CASI CORRESPONDE CON LAS MEDICIONES DE BEKESY. TAMBIEN ES INTERESANTE NOTAR QUE EL PRODUCTO DE LA FRECUENCIA RESONANTE Y EL RETRASO CERCA DE LA RESONANCIA (I.E., LA TERCERA COLUMNA) ES, A GRANDES RAZGOS, CONSTANTE. ESTE HECHO VA A SER UTILIZADO PARA AJUSTAR LA RESPUESTA DE FASE DE LOS MODELOS.

PARA REGRESAR AL PROBLEMA DE AJUSTAR UNA FUNCION A LOS DATOS DEL DOMINIO DE FRECUENCIA, POR LO MENOS EN EL RANGO DE FRECUENCIAS DEBAJO DE 1000 CPS., SE CONSIDERA UN MODELO CUYA TRANSFORMADA DE LAPLACE ES LA RAZON DE POLINOMIOS RACIONALES. HABRAN, POR SUPUESTO, UN NUMERO INFINITO DE POSIBILIDADES PARA AJUSTAR LOS DATOS, DEPENDIENDO DEL CRITERIO Y PRECISION DEL AJUSTE. SE QUISIERA TENER, SIN EMBARGO, UNA APROXIMACION QUE SEA TANTO COMPUTACIONALMENTE SIMPLE COMO ADECUADA PARA EXPLICAR CIERTOS RESULTADOS SUBJETIVOS EN LA CORRESPONDENCIA DE TONOS. CUALQUIER CRITERIO DE AJUSTE DEBE TENER SUS RAICES EN FENOMENOS PSICOACUSTICOS.

LAS PENDIENTES DE LAS ORILLAS DE LAS CURVAS DE AMPLITUD SUGIEREN UNA FUNCION DE FRECUENCIA QUE TIENE UN CERO SIMPLE EN LA VECINDAD DEL ORIGEN DEL PLANO COMPLEJO DE FRECUENCIA, Y UN DENOMINADOR CUYO GRADO ES ALREDEDOR DE CUATRO O CINCO VECES MAS GRANDE QUE EL DEL NUMERADOR. LA RELACION ENTRE LAS PARTES REALES E IMAGINARIAS DE SUS POLOS COMPLEJOS CONJUGADOS DEBERIA SER TAL QUE MANTENGA EL CARACTER DE PORCENTAJE DE ANCHO DE BANDA DE LAS RESPUESTAS CONSTANTE. LA AMPLITUD EN LA RESONANCIA DEBERIA VARIAR DE LA MANERA PRESCRITA ANTERIORMENTE, Y LAS CARACTERISTICAS DE FASE Y RETRASO SUPUESTAMENTE DEBERIAN SER REPRESENTATIVAS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES. (LA CUESTION DE LA FASE A BAJAS FRECUENCIAS VA A RECIBIR NECESARIAMENTE MAS CONSIDERACION.)

COMO UNA DE LAS POSIBILIDADES MAS SIMPLES PARA APROXIMAR DATOS DE AMPLITUD Y DE FASE, SE CONSIDERA UNA FUNCION CON DOS PARES DE

POLOS COMPLEJOS-CONJUGADOS SINTONIZADOS SINCRONICAMENTE, UN POLO EN EL EJE REAL NEGATIVO Y UN CERO EN EL EJE REAL NEGATIVO CERCA DEL ORIGEN. ADORNADA CON LAS CONSTANTES NECESARIAS, TAL FUNCION TIENE UNA TRANSFORMADA DE LAPLACE DE LA FORMA:

$$F_i(s) = c_i \beta^{4+r} \left(\frac{s+\epsilon}{s+\gamma} \right) \left[\frac{1}{(s+a)^2 + \beta^2} \right]^2 e^{-sT} \quad (1)$$

DONDE:

c_i ES UN FACTOR DE ESCALA REAL POSITIVO QUE DA EL VALOR ABSOLUTO DEL DESPLAZAMIENTO CORRECTO;

β^{4+r} ES UN FACTOR QUE PRODUCE LA ADECUADA VARIACION EN LA AMPLITUD DE RESONANCIA CON LA FRECUENCIA RESONANTE (SI ES ACEPTADO UN INCREMENTO DE 5 DB/OCTAVA EN EL PICO RESONANTE, ENTONCES $r = 0.83$);

e^{-sT} ES UN FACTOR DE RETRASO (T SEGUNDOS) PARA COORDINAR LA RESPUESTA DE FASE CON LOS DATOS EXPERIMENTALES DE FASE.

LA FUNCION TIENE POLOS DE SEGUNDO ORDEN EN $s = -a \pm j\beta$, UN POLO SIMPLE EN $s = -\gamma$ Y UN CERO SIMPLE EN $s = -\epsilon$. DEBIDO A LAS PROPIEDADES DEL PORCENTAJE DE ANCHO DE BANDA CONSTANTE DE LAS RESONANCIAS DE LA MEMBRANA, SE PERMITE QUE β Y a ESTEN RELACIONADAS POR MEDIO DE UNA CONSTANTE: $\beta = k a$. EL VALOR DE LA FUNCION PARA FRECUENCIAS REALES (I.E., $s = j\omega$) ES:

$$F_i(j\omega) = c_i \beta^{4+r} \left(\frac{\epsilon + j\omega}{\gamma + j\omega} \right) \left[\frac{1}{(\beta^2 + \frac{\beta^2}{k^2} - \omega^2) + j \frac{2\beta}{k} \omega} \right]^2 e^{-j\omega T} \quad (2)$$

AL IGUAL QUE CON LOS DATOS EXPERIMENTALES, ES CONVENIENTE TRABAJAR CON LA FRECUENCIA NORMALIZADA. SEA $s = (\omega/\beta)$, LA FRECUENCIA NORMALIZADA. (ESTO ES NORMALIZA LA FRECUENCIA REAL CON RESPECTO A LA PARTE IMAGINARIA DEL POLO DE LA FRECUENCIA). ENTONCES (2) SE CONVIERTE EN:

$$F_i(jS) = c_i \beta^r \left(\frac{\frac{\epsilon}{\beta} + jS}{\frac{\gamma}{\beta} + jS} \right) \left[\frac{1}{(1 + \frac{1}{k^2} - S^2) + j \frac{2}{k} S} \right]^2 e^{-jS\beta T} \quad (3)$$

SE PUEDE NOTAR QUE AJUSTAR LOS DATOS DE FASE Y AMPLITUD DE BEKESY CERCA DE LA FRECUENCIA CERO PRESENTA CIERTO DILEMA. PARA DISMINUIR LA RESPUESTA A LA AMPLITUD EN FRECUENCIAS BAJAS, SE NECESITA EL CERO DE LA FUNCION QUE ESTE CERCA DEL ORIGEN. A PESAR DE QUE LA FASE EN LA FRECUENCIA CERO OBTIENE SIEMPRE SIENDO CERO MIENTRAS LA FUNCION CERO ESTE EN EL SEMIPLANO IZQUIERDO, LA FASE SE "ABULTA" POSITIVAMENTE DE UNA MANERA APRECIABLE EN FRECUENCIAS BAJAS SI EL CERO ES COLOCADO DEMASIADO CERCA DEL ORIGEN. POR AJUSTAMIENTO EMPIRICO DE LOS PARAMETROS, SE OBTUVO UNA POSICION INTERMEDIA PARA EL CERO, Y SE DEDUJERON VALORES CORRESPONDIENTES PARA k , T Y γ . LOS VALORES A QUE SE LLEGO SON:

$$\frac{\epsilon}{\beta} = 0.1 \quad ; \quad k = 2.0 \quad (4)$$

$$\frac{\gamma}{\beta} = 1.0 \quad ; \quad T = \frac{3\pi}{4\beta} \text{ SEGUNDOS}$$

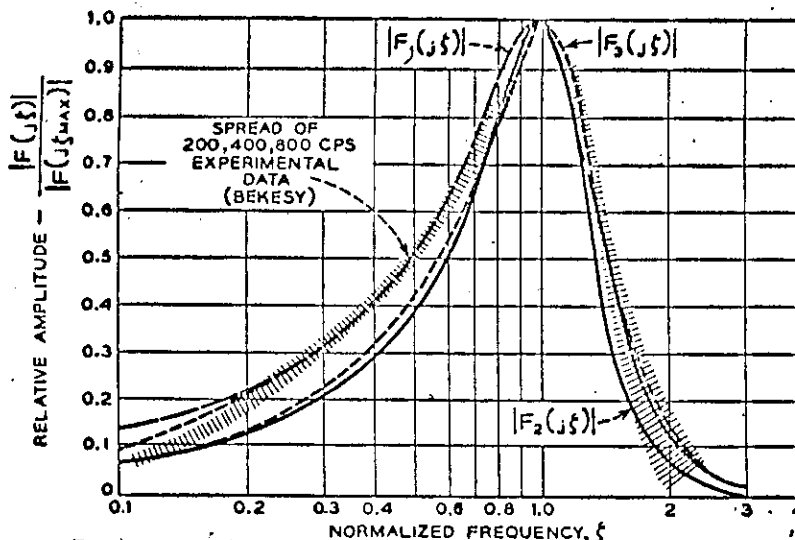
PARA CORRESPONDER CON LAS RESPUESTAS DE FASE, SE OBSERVA QUE EL RETRASO, τ , SE TOMA PARA QUE VARIE INVERSAMENTE CON LA FRECUENCIA RESONANTE, β . PARA LA CONSTANTE ESCOGIDA, EL RETRASO ADICIONAL EN 100 CPS., POR EJEMPLO, ES DE 4 MILLISEGUNDOS. ESTE RETRASO, CONJUNTAMENTE CON EL RETRASO ω -DEPENDIENTE, ESTA RAZONABLEMENTE DE ACUERDO CON LAS MEDICIONES DE BEKESY DEL TIEMPO DE TRANSITO A LO LARGO DE LA MEMBRANA. UNA GRAFICA DE

$$\frac{|F_1(j\omega)|}{|F_1(j\omega_{max})|}$$

DONDE ω_{max} ES LA FRECUENCIA DEL DESPLAZAMIENTO PICO, SE DA EN LA FIGURA B.8. LA REGION SOMBRADA REPRESENTA; POR COMPARACION, LA VARIABILIDAD ENTRE LAS CURVAS DE 200; 400 Y 800 CPS.

SI LOS DATOS EXPERIMENTALES DE FASE A FRECUENCIAS BAJAS NO SON TOMADOS MUY SERIAMENTE, Y LA FASE DE (3) PUEDE ACERCARSE A $\pi/2$, ENTONCES EL CERO PUEDE SER COLOCADO EN EL ORIGEN (I.E., $\epsilon = 0$). LA RESPUESTA DE AMPLITUD PARA ESTA SITUACION ESTA DADA POR LA PORCION PUNTEADA DE LA CURVA EN LA FIGURA B.8.

A FRECUENCIAS ALTAS, LA FUNCION (3) SE ATENUA COMO ω^{-4} . ALGUNOS DE LOS DATOS DE BEKESY INDICAN ATENUACIONES LIGERAMENTE MAS GRANDES QUE ESTA. COMO OTRA POSIBILIDAD, ENTONCES, FUE NECESARIO CONSIDERAR UNA FUNCION CON UN CERO SIMPLE EN EL ORIGEN Y PARES COMPLEJOS-CONJUGADOS DE TERCER ORDEN. SU TRANSFORMADA DE LAPLACE ES:



Respuestas de frecuencia de los modelos comparadas con los datos experimentales. Según Flanagan, J.L. Models for Approximating Basilar Membrane Displacement. Bell Syst. Tech. J.

FIGURA B.8

$$F_2(s) = C_2 \beta^{2+r} \frac{s}{[(s+d)^2 + \beta^2]^3} e^{-sT} \quad (5)$$

DONDE LAS CONSTANTES SON DEFINIDAS DE MANERA SIMILAR A (7). LA RESPUESTA DE FRECUENCIA REAL, EN TERMINOS DE FRECUENCIA NORMALIZADA ES:

$$F_2(j\omega) = C_2 \beta^r \frac{j\omega}{[(1 + \frac{1}{k^2} - \omega^2) + j \frac{2}{k} \omega]^3} e^{-j\omega\beta T} \quad (6)$$

UN AJUSTE RAZONABLE AL ANCHO DE BANDA RESONANTE SE OBTIENE PARA $k = 2.0$ CON $\beta T = 3\pi/4$, COMO ANTERIORMENTE. PARA ESTOS VALORES, UNA GRAFICA DE $|F_2(j\omega)| / |F_2(j\omega_{max})|$ ESTA DADA EN LA FIGURA B.8.

PENSANDO EN TRANSFORMADAS INVERSAS PARA LAS FUNCIONES DE APROXIMACION, UNA FUNCION QUE PROVEE UN AJUSTE RESPETABLE Y QUE TIENE UNA TRANSFORMADA INVERSA ESPECIALMENTE SIMPLE ES LA SIGUIENTE:

$$F_3(s) = C_3 \beta^{4+r} \frac{s^2 + 2ds + (\alpha^2 - \frac{\beta^2}{2})}{[(s+d)^2 + \beta^2]^3} e^{-sT} \quad (7)$$

O, EN TERMINOS DE FRECUENCIA REAL NORMALIZADA:

$$F_3(j\omega) = C_3 \beta^r \frac{(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{2} - \omega^2) + j \frac{2}{k} \omega}{[(\frac{1}{k^2} + 1 - \omega^2) + j \frac{2}{k} \omega]^3} e^{-j\omega\beta T} \quad (8)$$

ESTA FUNCION TIENE CEROS SIMPLES EN $s = \alpha(-1 \pm k/\sqrt{3})$ Y POLOS DE TERCER ORDEN EN $s = \alpha(-1 \pm jk)$. LA FUNCION OBTIENE SE VUELVE DE FASE NO-MINIMA EN $k > \sqrt{3}$. YA QUE LA SEPARACION ENTRE CEROS ES $2k\sqrt{3}$, EL CERO EN $s = \alpha(-1 + k/\sqrt{3})$ TIENE LA MAYOR INFLUENCIA SOBRE LA RESPUESTA DE LA AMPLITUD PARA LAS CONDICIONES MINIMAS DE FASE (I.E., $k \leq \sqrt{3}$). PARA VALORES DE $k = 1.7$ Y $\beta T = 3\pi/4$, LA RESPUESTA DE AMPLITUD (8) SE MUESTRA EN LA FIGURA B.8.

B.3 TRANSFORMADAS INVERSAS DE LOS MODELOS:

ES PERTINENTE EXAMINAR LAS TRANSFORMACIONES INVERSAS DE LOS MODELOS (1), (5) Y (7) (I.E., SUS RESPUESTAS A IMPULSOS UNITARIOS APLICADOS EN $t = 0$) Y COMPARAR ESTAS RESPUESTAS CON LA RESPUESTA DE IMPULSO OBTENIDA PARA LOS DATOS EXPERIMENTALES (FIG. B.5).

PARA LA FUNCION $F_1(s)$, LA RESPUESTA DE IMPULSO RESULTA SER:

$$f_1(t) = C_1 \beta^{1+r} \left\{ [0.033 + 0.360\beta(t-T)] e^{-\beta(t-T)/2} \sin \beta(t-T) \right. \\ \left. + [0.575 - 0.320\beta(t-T)] e^{-\beta(t-T)/2} \cos \beta(t-T) \right. \\ \left. - 0.575 e^{-\beta(t-T)} \right\} \quad \text{PARA } t \geq T \quad (9)$$

$$f_1(t) = 0$$

PARA $t < T$

DONDE T ES EL RETRASO YA ESPECIFICADO. DE MANERA SIMILAR, LA TRANSFORMADA INVERSA DE $F_2(s)$ ES:

$$f_2(t) = \frac{c_2 \beta^{1+r}}{8} \left\{ \frac{[\beta(t-T)]^2}{2} + \beta(t-T) - \frac{3}{2} \right\} e^{-\beta(t-T)/2} \text{sen } \beta(t-T) \quad (10)$$

$$+ \left\{ -[\beta(t-T)]^2 + \frac{3}{2} \beta(t-T) \right\} e^{-\beta(t-T)/2} \text{cos } \beta(t-T) \quad \text{PARA } t \geq T$$

$$f_2(t) = 0$$

PARA $t < T$

COMO SE INDICO ANTERIORMENTE, LA TRANSFORMADA INVERSA DE $F_3(s)$ ES ESPECIALMENTE SIMPLE, SIENDO ESTA LA PRINCIPAL RAZON PARA PRESENTAR SU AJUSTE. SU INVERSA ES:

$$f_3(t) = \frac{c_3 \beta^{1+r}}{6} [\beta(t-T)]^2 e^{-\beta(t-T)/1.7} \text{sen } \beta(t-T) \quad \text{PARA } t \geq T \quad (11)$$

$$f_3(t) = 0$$

PARA $t < T$

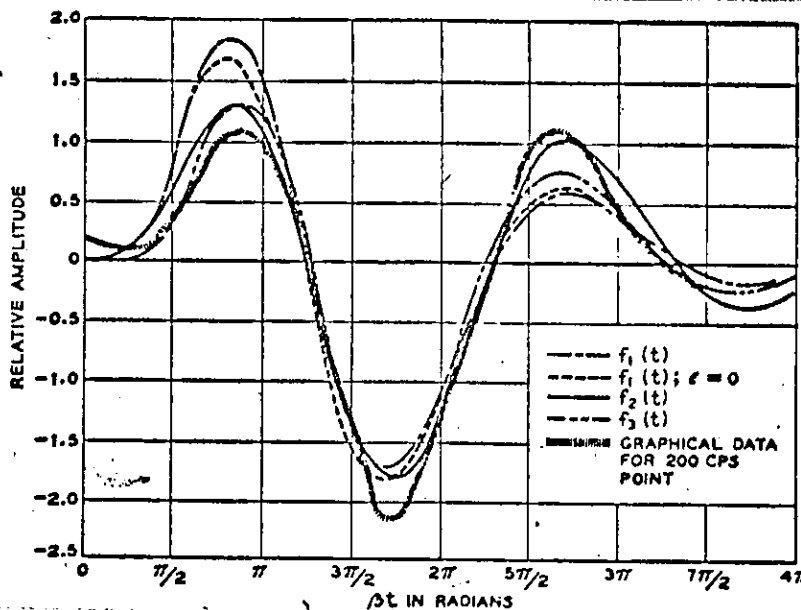
PARA PROPOSITOS DE COMPARACION, LAS RESPUESTAS DE IMPULSO $f_1(t)$, $f_2(t)$ Y $f_3(t)$ SON GRAFICADAS EN LA FIGURA B.9, JUNTO CON LA RESPUESTA DETERMINADA GRAFICAMENTE DE LA FIGURA B.5. COMO LAS CONSTANTES DE ESCALA c_1 , c_2 Y c_3 NO HAN SIDO TOMADAS EN CUENTA, LAS ESCALAS DE AMPLITUD PARA LAS DIFERENTES CURVAS SON RELATIVAS. SIN EMBARGO, LAS CURVAS HAN SIDO GRAFICADAS PARA VALORES DE PICO-A-PICO QUE SON APROXIMADAMENTE IGUALES. SE PUEDE NOTAR QUE, EN LA MAYORIA DE LOS CASOS, LOS IMPULSOS POSITIVOS PRODUCEN LA MAYOR DEFLEXION EN LA DIRECCION NEGATIVA. LA UNIFORMIZACION DE LOS RETRASOS PARA HACER COINCIDIR LAS CURVAS FUERON HECHAS A MANERA DE CORRER LOS ORIGENES ABSOLUTOS ($\beta t = 0$) PARA CADA RESPUESTA EL SIGUIENTE NUMERO DE RADIANES A LA IZQUIERDA:

FUNCION	RADIANES A LOS ORIGENES ABSOLUTOS
200 CPS., EXPERIMENTAL	2.3
$f_1(t)$	1.9
$f_2(t)$	2.4
$f_3(t)$	1.5

DE LAS FUNCIONES MOSTRADAS, $f_2(t)$ Y $f_3(t)$ PARECEN AJUSTARSE AL IMPULSO DERIVADO DE LA GRAFICA MEJOR QUE $f_1(t)$. EN LOS DOMINIOS DE FRECUENCIA, SIN EMBARGO, $F_1(s)$ PARECE TENER UN AJUSTE LIGERAMENTE MEJOR.

B.4 SOBRE LAS AMPLITUDES RELATIVAS DEL DESPLAZAMIENTO:

COMO LA AMPLITUD RELATIVA DEL DESPLAZAMIENTO PUEDE SER DE IMPORTANCIA EN LA CONVERSION DEL DESPLAZAMIENTO DE LA MEMBRANA A ACTIVIDAD NERVIOSA, VALE LA PENA EXAMINAR MAS A FONDO LAS



Respuestas de impulso de los modelos. para comparar formas de ondas. Las
 Estas funciones de desplazamiento son localizaciones de los orígenes absolutos
 las transformadas inversas de los datos son dados en el texto. Según Flanagan, J.
 del dominio de frecuencia en la Fig. B.8. L. Models for Approximating Basilar
 El retraso temporal ha sido equalizado Membrane Displacement. Bell Syst. Tech. J

FIGURA B.9

RELACIONES DE AMPLITUD. SI LA MEMBRANA ES EXCITADA CON IMPULSOS PERIODICOS A UNA FRECUENCIA FUNDAMENTAL A LA CUAL UN PUNTO CERCAÑO AL EXTREMO APICAL (BAJA FRECUENCIA) ES RESONANTE, ESTE PUNTO EJECUTA UN DESPLAZAMIENTO QUE ES CASI LA SINUSOIDE FUNDAMENTAL. UN PUNTO CERCAÑO AL EXTREMO BASAL (ALTA FRECUENCIA), CUYA CURVA DE RESONANCIA COMPRENDE UN NUMERO SUSTANCIAL DE ARMONICAS, DA UNA RESPUESTA PERIODICA QUE ES ESENCIALMENTE UNA SUCESSION DE RESPUESTAS DE IMPULSO QUE APENAS SE TRASLAPAN. DEBIDO A QUE TALES PUNTOS RESPONDEN SIMULTANEAMENTE (EXCEPTO POR UN RETRASO DE TRANSITO), Y COMO SUS AMPLITUDES PICO TIENEN IMPLICACIONES EN HIPOTESIS ACERCA DE LA PERCEPCION PICO, SE COMPARAN LAS AMPLITUDES PICO DE UN PUNTO QUE "RESPONDE FUNDAMENTALMENTE" CON LAS DE UN PUNTO QUE "RESPONDE A IMPULSOS". CON EL PROPOSITO DE VARIAR MAS LOS EJEMPLOS, SE TRABAJARA CON EL MODELO $F_2(s)$, EN (7), Y SU RESPUESTA DE IMPULSO $f_2(t)$, EN (11). EL INTERES ESTA CENTRADO EN EL EXTREMO ABSOLUTO DE (11). LOS TIEMPOS DE LOS EXTREMOS PUEDEN ENCONTRARSE DIFERENCIANDO (11), IGUALANDO A CERO Y RESOLVIENDO, LO CUAL DA:

$$t_{max} = \frac{1}{\beta} \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{1.7\beta(t-T)}{\beta(t-T)-3.4} \right], \quad t > T \quad (12)$$

LA ENVOLVENTE MAXIMA OCURRE EN:

$$t_{max\ env} = \left(\frac{3.4}{\beta} + T \right) \quad (13)$$

NO ES NECESARIO RESOLVER LA RELACION TRASCENDENTAL (12), PUES YA SE HA GRAFICADO (11) HASTA LOGRAR UNA PRECISION RAZONABLE EN LA FIGURA B.9. USANDO LOS ULTIMOS DATOS, SE OBTIENE, PARA EL MAXIMO ABSOLUTO DE $f_3(t)$,

$$|f_3(t)|_{\max} = \frac{c_3 \beta_p^{1+r}}{6} (1.4) = (0.23) c_3 \beta_p^{1+r} \quad (14)$$

DONDE EL SUBINDICE DENOTA UN PUNTO CERCANO AL EXTREMO DE ALTA FRECUENCIA DE LA MEMBRANA. DE UNA MANERA PARALELA, LA AMPLITUD DE UN PUNTO, q , SINTONIZADA CON LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL, PUEDE SER OBTENIDA. EN ESTE CASO, $\beta_q = \omega_0 y$

$$\begin{aligned} |q_3(t)|_{\text{fund}} &\approx \frac{\omega_0}{2\pi} \cdot 2 |F_3(s=1)| \\ &\approx \frac{\omega_0}{\pi} c_3 \beta_q^r (0.83) \\ &\approx c_3 \beta_q^{1+r} (0.26) \end{aligned} \quad (15)$$

DONDE $q_3(t)$ ES LA RESPUESTA PERIODICA PARA LA TERCERA TRANSFORMADA INVERSA $f_3(t)$. LA RAZON DE ESTOS DOS DESPLAZAMIENTOS PICO ES, POR LO TANTO,

$$R_3 = \frac{|f_3(t)|_{\max}}{|q_3(t)|_{\text{fund}}} = (0.88) \left(\frac{\beta_p}{\beta_q} \right)^{1+r} \quad (16)$$

SI SE HACEN LOS MISMOS CALCULOS PARA LOS OTROS DOS MODELOS, $F_1(s)$ Y $F_2(s)$, LAS RAZONES SON:

$$\begin{aligned} R_1 &= (0.80) \left(\frac{\beta_p}{\beta_q} \right)^{1+r} \\ R_2 &= (0.82) \left(\frac{\beta_p}{\beta_q} \right)^{1+r} \end{aligned} \quad (17)$$

COMO $\beta_p > \beta_q$ Y YA QUE EL EXPONENTE DETERMINADO EXPERIMENTALMENTE $r \approx 0.8$, LAS AMPLITUDES PICO DE LOS PUNTOS QUE "RESPONDEN A IMPULSOS" EXCEDEN AQUELLAS DE LOS PUNTOS QUE "RESPONDEN FUNDAMENTALMENTE", AL MENOS EN EL RANGO DE FRECUENCIAS DEBAJO DE 1000 CPS. (I.E., APROXIMADAMENTE ENCIMA DE LA MITAD APICAL DE LA MEMBRANA).

B.5 EVALUACION DE LAS CONSTANTES DE ESCALA c_1 , c_2 Y c_3

LOS DATOS DE BEKESY MUESTRAN QUE LA DEFLEXION MAXIMA DE LA MEMBRANA BASILAR A UNA FRECUENCIA DE 1000 CPS. Y A UN NIVEL DE PRESION DE SONIDO DE 134 DB. REFERIDO A 0.0002 DINA/CM² (I.E., 10³ DINA/CM²) ES APROXIMADAMENTE 10⁻⁴ CM. SUS MEDIDAS TAMBIEN INDICAN QUE EL FUNCIONAMIENTO MECANICO DEL CIDO MEDIO E INTERNO ES ESENCIALMENTE LINEAL RESPECTO DEL UMBRAL DE SENSACION. EN LOS MODELOS, POR LO TANTO, LAS CONSTANTES c_1 , c_2 Y c_3 DEBERIAN SER

ESCOGIDAS PARA PROVEER DESPLAZAMIENTOS PICO EN LA RESONANCIA IGUALES A:

$$(10^{-7} \text{ cm}^3/\text{dina}) \left[\frac{\beta}{2\pi(1000)} \right]^r$$

LAS RESPUESTAS DE AMPLITUD DE LOS MODELOS EN LA RESONANCIA SON:

$$\begin{aligned} |F_1(s=1.0)| &= c_1 \beta^r (0.66) \\ |F_2(s=1.0)| &= c_2 \beta^r (0.92) \\ |F_3(s=1.0)| &= c_3 \beta^r (0.82) \end{aligned} \quad (18)$$

LOS VALORES DE LAS CONSTANTES, POR LO TANTO, DEBERIAN SER:

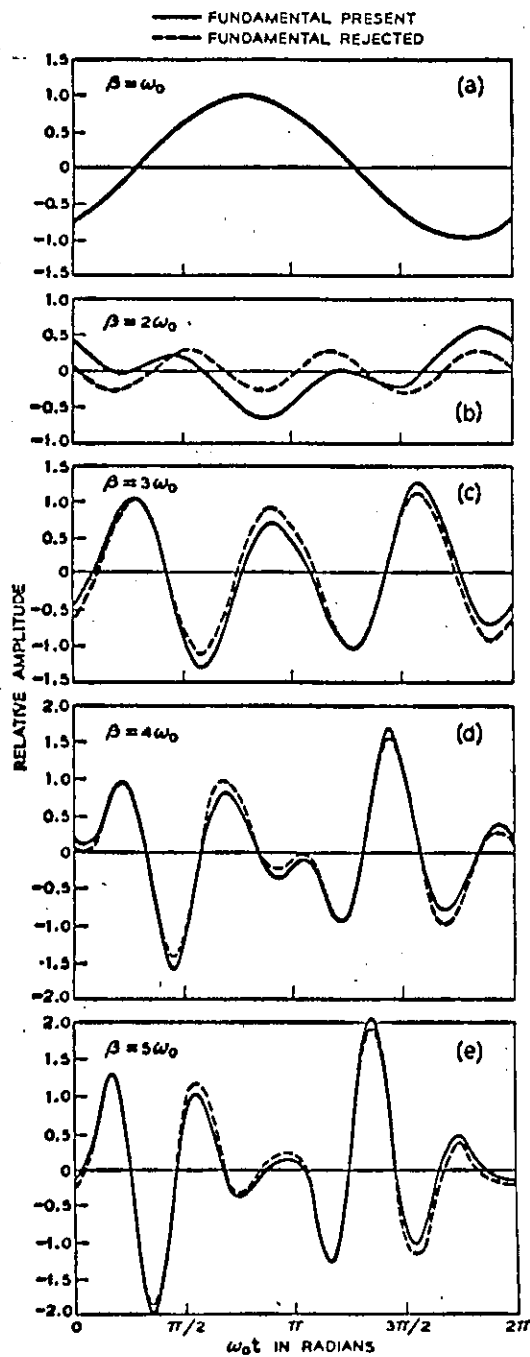
$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{10^{-7}}{(0.66) [2\pi(1000)]^r} \\ c_2 &= \frac{10^{-7}}{(0.92) [2\pi(1000)]^r} \\ c_3 &= \frac{10^{-7}}{(0.83) [2\pi(1000)]^r} \end{aligned} \quad (19)$$

B.6 APLICACION A LA PERCEPCION DEL GRADO DE ALTURA:

EN LOS EXPERIMENTOS SOBRE EL TONO SE VOLVIO NECESARIO EXPLICAR COMO APARECEN TRES MODOS DIFERENTES DE PERCIBIR EL TONO CUANDO VARIOS TRENES DE PULSOS PERIODICOS ESTIMULAN EL OIDO. UN MODO HACE CORRESPONDER AL ESTIMULO UN TONO QUE ES IGUAL A LA VELOCIDAD DEL PULSO, SIN TOMAR EN CUENTA EL PATRON DE PLARIDAD DEL TREN; EN OTRAS PALABRAS, LOS PULSOS POSITIVOS (CONDENSACIONES) NO SON DISCRIMINADOS DE LOS PULSOS NEGATIVOS (RAREFACCIONES). UN SEGUNDO MODO LE HACE CORRESPONDER UN TONO IGUAL A LA FUNDAMENTAL MATEMATICA SI HAY ENERGIA PRESENTE EN ESTA FRECUENCIA; ESTE MODO INCLUYE LA SITUACION QUE HA SIDO DENOMINADA FENOMENO "RESIDUAL". EL TERCER MODO ASIGNA AL ESTIMULO UN TONO IGUAL A LA FRECUENCIA DE EL MENOR COMPONENTE ESPECTRAL PRESENTE EN EL ESTIMULO.

EL PRIMER MODO OPERA CARACTERISTICAMENTE A VALORES BAJOS DE VELOCIDAD DE PULSO (GENERALMENTE POR DEBAJO DE 100 CPS. EN SITUACIONES DESCUBIERTAS). EL SEGUNDO USUALMENTE FUNCIONA PARA FRECUENCIAS FUNDAMENTALES EN EL RANGC APRDXIMADO DE 200 A 500 CPS. EL TERCERO PARECE OPERAR PARA FRECUENCIAS FUNDAMENTALES ALREDEDOR DE 1000 CPS.

SIN EXTENDERSE DEMASIADO EN LOS DETALLES DE LOS EXPERIMENTOS PSICOFISICOS, LA APLICABILIDAD DE LOS MODELOS A LA PERCEPCION DE PULSOS PUEDE, POR LO MENOS, SER INDICADA. ES IMPORTANTE, POR EJEMPLO, ESTABLECER HASTA QUE PUNTO LOS MODOS SUBJETIVOS DE TONO SON MANIFESTADOS EN EL FUNCIONAMIENTO MECANICO DE LA COCLEA. VIENDO LA FIGURA B.10 DE NUEVO, SE PUEDEN OBSERVAR PATRONES DE DESPLAZAMIENTO QUE PUEDEN SER CONSIDERADOS FAVORABLES, POR DAR ORIGEN A LOS MODOS DE TONO QUE ACABAN DE SER DESCRITOS. ESTO



Respuestas de desplazamiento del modelo $F_1(s)$ a excitación periódica por medio de impulsos positivos y negativos

alternados. Las cinco condiciones representan los desplazamientos de puntos de la membrana respectivamente resonantes a: (a) frecuencia fundamental;

(b) segunda armónica; (c) tercera armónica; (d) cuarta armónica; y (e) quinta armónica. Las curvas punteadas son los desplazamientos cuando la componente fundamental es eliminada del estímulo. Según Flanagan, J.L. Models for Approximating Basilar Membrane Displacement. Bell Syst. Tech. J.

FIGURA B.10

SUPONE, POR SUPUESTO, ALGUNAS HIPOTESIS ACERCA DEL MECANISMO PARA CONVERTIR INFORMACION ACERCA DEL DESPLAZAMIENTO A DESCARGAS ELECTRICAS EN LA FIBRA NERVIOSA.

CUANDO LA MEMBRANA ES EXCITADA SOBRE LA MAYOR PARTE DE SU LONGITUD POR EL ESTIMULO DE UN PULSO PERIODICO, LA PORCION DE FRECUENCIA MAS ALTA ES PROBABLEMENTE EFECTIVA SOLO EN PROVEER INFORMACION SOBRE LA VELOCIDAD DEL PULSO, SIN TOMAR EN CUENTA EL PATRON DE POLARIDAD DEL TREN. EN ESTA REGION DE LA MEMBRANA, LOS PULSOS ESTAN BIEN RESUELTOS EN EL TIEMPO (I.E., EL DESPLAZAMIENTO CONSISTE ESENCIALMENTE DE RESPUESTAS DE IMPULSOS QUE NO SE TRASLAPAN), Y LA SOBRECARGA DE LA RESPUESTA RESPECTO DE CADA PULSO ES SUBSTANCIAL. BAJO CIERTAS SUPOSICIONES SOBRE LA TRANSDUCCION DEL DESPLAZAMIENTO A LA ACTIVIDAD NERVIOSA, ESTE ULTIMO HECHO PUEDE SER INTERPRETADO COMO FAVORABLE POR EXTRAER DESCARGAS NERVIOSAS EN SINCRONIA CON CADA PULSO.

LA INFORMACION SOBRE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL PUEDE SER MANIFESTADA DE DOS MANERAS: (A) SI LA COMPONENTE FUNDAMENTAL ESTA PRESENTE EN EL ESTIMULO, ENTONCES EL PUNTO DE LA MEMBRANA QUE ESTA SINTONIZADO CON LA FUNDAMENTAL RESPONDE FUERTEMENTE CON UN DESPLAZAMIENTO CASI SINUSOIDAL. (B) SI, POR OTRA PARTE, LA FUNDAMENTAL ESTA AUSENTE, LA PARTE DE FRECUENCIA MAS BAJA DE LA MEMBRANA QUE RECIBE LA EXCITACION VA A INCLUIR UN NUMERO PEQUEÑO DE LINEAS ESPECTRALES DENTRO DE SU RESPUESTA DE FRECUENCIA. SU DESPLAZAMIENTO GENERALMENTE VA A EXHIBIR LA PERIODICIDAD FUNDAMENTAL DE UNA MANERA QUE FAVORECE LA PRODUCCION DE UNA DESCARGA NERVIOSA POR PERIODO FUNDAMENTAL.

HASTA AHORA ESTOS COMENTARIOS NO HAN CONSIDERADO LA IMPORTANCIA DE AMPLITUDES RELATIVAS DE DESPLAZAMIENTO. ESTA CUESTION PARECE SER DE IMPORTANCIA ESPECIAL EN EVOCAR EL SEGUNDO (O FUNDAMENTAL) MODO DE TONO. AUNQUE TODO INDICA QUE LA INFORMACION NEURAL MAS SIGNIFICATIVA SE ORIGINA EN EL PUNTO DE MAYOR DESPLAZAMIENTO, HAY EVIDENCIA DE QUE EN ALGUNOS CASOS SE PODRIA DAR PREFERENCIA AL MODO DE VELOCIDAD DE PULSO, A PESAR DE QUE EL PRIMERO PUEDE ESTAR CORRELACIONADO CON MENORES DESPLAZAMIENTOS DE LA MEMBRANA QUE EL SEGUNDO. LAS AMPLITUDES RELATIVAS DE DESPLAZAMIENTO MUY PROBABLEMENTE SUFREN TRANSFORMACIONES NO-SIMPLES EN EL PROCESO DE CONVERSION NEURAL.

TAMBIEN QUEDA ABIERTA LA PREGUNTA SOBRE EL TERCER MODO DE TONO. AUNQUE LOS MODELOS ESTAN LIMITADOS AL RANGO DE FRECUENCIAS POR DEBAJO DE 1000 CPS. (PORQUE NO EXPLICAN ADECUADAMENTE LA TRANSMISION EN EL OIDO MEDIO ARRIBA DE ESTA FRECUENCIA), UNA EXPLICACION DEBIL PUEDE SER SUGERIDA PARA EL TERCER MODO. LOS DATOS DE BEKESY SUGIEREN QUE LA AMPLITUD DEL DESPLAZAMIENTO MAXIMAL DE LA MEMBRANA DECAE APRECIABLEMENTE PARA FRECUENCIAS ARRIBA DE 1000 CPS. EN ESTA REGION, ENTONCES, ESA PARTE DE LA MEMBRANA QUE RESPONDE AL COMPONENTE DE FRECUENCIA MAS BAJA DEBERIA EXCEDER EN AMPLITUD A AQUELLAS PARTES QUE RESPONDEN A LOS COMPONENTES DE FRECUENCIA MAS ALTA. SI LA AMPLITUD DEL DESPLAZAMIENTO ES UN FACTOR IMPORTANTE EN EL PROCESO DE CONVERSION (Y PROBABLEMENTE LO ES), ENTONCES EL TERCER MODO ES FAVORECIDO

SIEMPRE QUE EL COMPONENTE DE FRECUENCIA MAS BAJA NO SEA DEMASIADO ALTO EN LO QUE RESPECTA A NUMERO ARMONICO. COMO SE INDICO ANTERIORMENTE, EL TERCER MODO HA SIDO OBSERVADO CUANDO LA FUNDAMENTAL, O LA SEGUNDA ARMONICA FUNDAMENTAL, ES RECHAZADA DEL ESTIMULO.

APENDICE C
DECUCCIONES VARIAS:

C.1 VELOCIDAD DE PROPAGACION DEL SONIDO EN EL AIRE

ECUACION :
$$v_L = \sqrt{\frac{P}{\rho}}$$

EN LA FIGURA C.1 SE MUESTRA UNA CARA DE UN TUBO LARGO CON UN PISTON. LAS LINEAS VERTICALES REPRESENTAN CAPAS DE MOLECULAS DE AIRE, IGUALMENTE ESPACIADAS CUANDO EL AIRE ESTA EN REPOSO (EN LA PRIMERA FIGURA DE LA C.1). SI EL PISTON ES EMPUJADO HACIA ADELANTE, LAS CAPAS DE AIRE QUE ESTAN ENFRETE DE EL SERAN COMPRESIONADAS. ESTAS A SU VEZ COMPRESIONAN A LAS QUE ESTAN ENFRETE, Y ASI SE FORMARA UN PULSO DE COMPRESION QUE VIAJARA A TRAVES DEL TUBO. SI EL PISTON ES EMPUJADO HACIA ADELANTE Y LUEGO ES REGRESADO A SU POSICION ORIGINAL, COMO EN LA FIGURA C.1, UN PULSO DE COMPRESION, SEGUIDO DE UNO DE RAREFACCION, VIAJARA A TRAVES DEL TUBO. ESTOS PULSOS SON ANALOGOS EN TODOS LOS SENTIDOS A LOS PULSOS TRANSVERSALES VIAJANDO A TRAVES DE UNA CUERDA, EXCEPTUANDO QUE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LA PARTICULA SON LONGITUDINALES EN VEZ DE TRANSVERSALES. EL TUBO EN CUESTION SE CONSIDERARA LO SUFICIENTEMENTE LARGO COMO PARA QUE LAS REFLEXIONES DE LOS EXTREMOS LEJANOS NO SE NECESITEN CONSIDERAR.

TOMANDO EL EJE "X" A LO LARGO DE LA DIRECCION DEL TUBO SE CONSIDERA UN ELEMENTO DE LONGITUD DE GAS EN EL TUBO, LIMITADO POR PLANOS CUYAS COORDENADAS SON X Y X+Δx CUANDO EL GAS ESTA EN EQUILIBRIO (VER FIGURA C.2). SEA LA PRESION EN EQUILIBRIO P. (GENERALMENTE SERA LA PRESION ATMOSFERICA). A MEDIDA QUE LA ONDA AVANZA A LO LARGO DEL TUBO, EL ELEMENTO OSCILA A REDOR DE SU PUNTO DE EQUILIBRIO (FIGURA C.1). SE UTILIZARA LA LETRA "y" PARA REPRESENTAR EL DESPLAZAMIENTO DE CUALQUIER PLANO DE SU POSICION DE EQUILIBRIO. EN ESTE CASO, DESDE LUEGO, EL DESPLAZAMIENTO ES HACIA LA DERECHA O HACIA LA IZQUIERDA EN LUGAR DE HACIA ARRIBA O ABAJO. EN GENERAL LOS PLANOS QUE LIMITAN UN ELEMENTO SE DESPLAZARAN EN DIFERENTES CANTIDADES. ENTONCES EL VOLUMEN DEL ELEMENTO CAMBIA Y LA PRESION VARIA DE PUNTO A PUNTO.

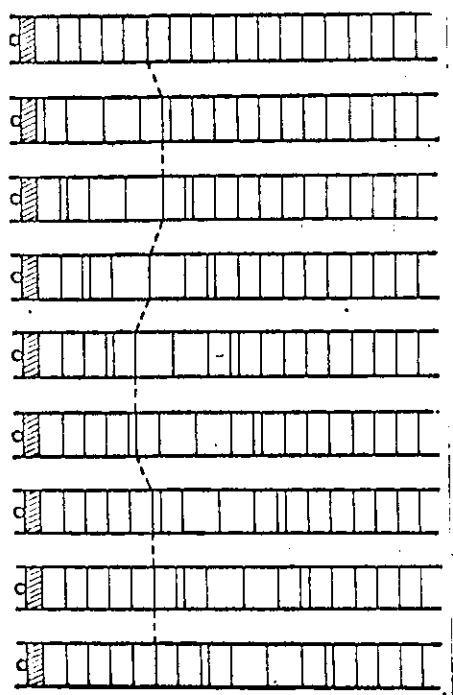
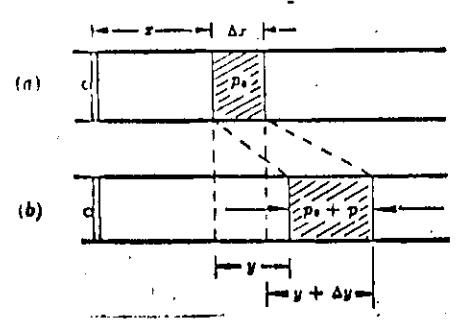


Diagrama esquemático de un pulso de compresión en un gas. Según Sears, F.W. Mechanics, Heat and Sound. Addison-Wesley.

FIGURA C.1

EL DESPLAZAMIENTO DE LA CARA IZQUIERDA DEL ELEMENTO ESTA REPRESENTADO POR " y " Y EL DE LA CARA DERECHA POR " $y + \Delta y$ ". SEA p



Elemento de gas en un tubo en el cual hay una onda longitudinal; (a) posición de equilibrio; (b) posición desplazada. Según Sears, F.W. Mechanics, Heat and Sound. Addison-Wesley.

FIGURA C.2

LA CANTIDAD DE PRESION EN LA CARA IZQUIERDA DEL ELEMENTO, Y $p + \Delta p$ EN LA CARA DERECHA. SI EL ELEMENTO ES MUY CORTO, Δp ES PEQUEÑO Y PUEDE SER CONSIDERADO COMO LA CANTIDAD DE PRESION MANOMETRICA A LA CUAL EL ELEMENTO ES SOMETIDO COMO UN TDC. LA PRESION "ABSOLUTA" EN EL ELEMENTO (MANOMETRICA MAS ATMOSFERICA) ES $p_0 + p$, Y LAS PRESIONES ABSOLUTAS EN LAS CARAS SON $p_0 + p$ Y $p_0 + p + \Delta p$.

SI LA SECCION TRANSVERSAL DEL TUBO ES "A", LA FUERZA EN LA CARA DERECHA DEL ELEMENTO ES: $-(p_0 + p + \Delta p)A$ Y EN LA CARA IZQUIERDA ES $(p_0 + p)A$. LA FUERZA RESTAURADORA NETA ES ENTONCES $-\Delta p A$. SEA ρ_0 LA DENSIDAD CUANDO EL GAS ESTA EN SU PRESION DE EQUILIBRIO ES p_0 .

EL ELEMENTO DE MASA ES $\rho_0 A \Delta x$. ENTONCES DE LA SEGUNDA LEY DE NEWTON,

$$F = ma$$

$$-\Delta p A = \rho_0 A \Delta x \frac{d^2 y}{dt^2}$$

$$\frac{dy^2}{dt^2} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

Y EN EL LIMITE, CUANDO Δx ES MUY PEQUEÑO:

$$\frac{dy^2}{dt^2} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

EL VOLUMEN DEL ELEMENTO EN SU POSICION DE EQUILIBRIO ES $A \Delta x$. EN SU POSICION DESPLAZADA (VER FIGURA C.2), LA COORDENADA DE LA CARA DERECHA ES $x + \Delta x + y + \Delta y$ Y LA COORDENADA DE LA CARA IZQUIERDA ES $x + y$. LA LONGITUD DEL ELEMENTO DESPLAZADO ES $(x + \Delta x + y + \Delta y) - (x + y) = \Delta x + \Delta y$ Y SU VOLUMEN ES $A(\Delta x + \Delta y)$. EL CAMBIO DE VOLUMEN ES, POR LO TANTO: $A(\Delta x + \Delta y) - A \Delta x = A \Delta y$. DE LA DEFINICION GENERAL DE COMPRESIBILIDAD "K":

$$K = - \frac{1}{\text{VOLUMEN ORIGINAL}} \cdot \frac{\text{CAMBIO EN VOLUMEN}}{\text{CAMBIO EN PRESION}}$$

$$K = - \frac{1}{A \Delta x} \cdot \frac{A \Delta y}{(p_0 + p) - p_0} = - \frac{\Delta y}{p \Delta x}$$

ENTONCES:

$$p = -\frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Y EN EL LIMITE

$$p = -\frac{1}{k} \cdot \frac{dy}{dx} \quad (2)$$

DIFERENCIANDO CON RESPECTO A "X" SE OBTIENE:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{1}{k} \frac{d^2y}{dx^2}$$

CUANDO ESTA EXPRESION PARA dp/dx SE SUSTITUYE EN LA ECUACION (1) SE LLEGA A:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{1}{k\rho_0} \cdot \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3)$$

SE NOTARA QUE, EXCEPTO POR EL TERMINO CONSTANTE, ESTA ECUACION TIENE LA MISMA FORMA QUE LA ECUACION

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{T}{\mu} \cdot \frac{d^2y}{dx^2}$$

(QUE ES LA ECUACION DIFERENCIAL DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO, PARA EL CASO ESPECIAL DE ONDAS EN UNA DIMENSION) PARA ONDAS TRANSVERSALES EN UNA CUERDA. SE PUEDE CONCLUIR ENTONCES, QUE LAS ONDAS DE COMPRESION EN UN GAS VIAJAN CON UNA VELOCIDAD DE PROPAGACION:

$$v = \sqrt{\frac{1}{k\rho_0}} \quad (4)$$

COMO EL MODULO DE BULK ES EL RECIPROCO DE LA COMPRESIBILIDAD, LA ECUACION PUEDE SER ESCRITA DE LA SIGUIENTE FORMA:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}} \quad (5)$$

AUNQUE DERIVADAS PARA ONDAS EN UN GAS, LAS ECUACIONES (4) Y (5) SE APLICAN TAMBIEN PARA ONDAS EN UN LIQUIDO, PERO NO PARA ONDAS SUPERFICIALES. UN ARGUMENTO SIMILAR MUESTRA QUE LAS ONDAS COMPRESORAS EN UNA BARRA VIAJAN CON UNA VELOCIDAD:

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho_0}} \quad (6)$$

DONDE "Y" ES EL MODULO DE YOUNG.

ES UN HECHO FAMILIAR QUE LA COMPRESION DE UN GAS CAUSA UN INCREMENTO EN SU TEMPERATURA (Y VICEVERSA) A MENOS QUE EL CALOR DE COMPRESION SEA RETIRADO DE ALGUNA FORMA. A MEDIDA QUE LA ONDA COMPRESORA AVANZA A TRAVES DEL GAS, LAS REGIONES QUE SON COMPRIMIDAS EN UN INSTANTE DADO SON LEVEMENTE CALENTADAS MIENTRAS QUE LAS RAREFACCIONES SON LEVEMENTE ENFRIADAS. ENTONCES HABRA UN FLUJO DE CALOR DE LAS COMPRESIONES A LAS RAREFACCIONES. DE CUALQUIER MANERA LAS DISTANCIAS ENTRE LAS COMPRESIONES Y LAS RAREFACCIONES SON TAN LARGAS Y LAS ALTERACIONES DE TEMPERATURA OCURREN TAN RAPIDO QUE, DE HECHO, NO HAY PRACTICAMENTE INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE LAS REGIONES MAS CALIENTES Y MAS FRIAS DE LA ONDA. LAS COMPRESIONES SON, POR LO TANTO ADIABATICAS EN LUGAR DE ISOTERMICAS, Y ES LA COMPRESIBILIDAD ADIABATICA LA QUE DEBE DE SER UTILIZADA EN LA ECUACION DE LA ONDA.

UTILIZANDO EL HECHO DE QUE LA COMPRESIBILIDAD ADIABATICA DEL GAS ESTA DADA POR:

$$k_{ad} = \frac{1}{\gamma p}$$

DONDE P ES LA PRESION Y $\gamma = c_p/c_v$, SE PUEDE ESCRIBIR LA ECUACION (4) ASI:

$$V = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho_0}}$$

DONDE p_0 ES LA PRESION ABSOLUTA DE EQUILIBRIO Y PUEDE SER EXPRESADA EN LB/PIE, NEWTON/M² O DINAS/CM². LA DENSIDAD ρ_0 PUEDE ESTAR EN SLUGS/PIE, KG/M³ O GRAMO/CM³. γ ES UN NUMERO PURO, CORRESPONDIENDOLE UNIDADES DE VELOCIDAD PIE/SEG, M/SEG O CM/SEG.

DE LA ECUACION PARA UN GAS IDEAL TENEMOS QUE:

$$\frac{p_0}{\rho_0} = \frac{RT}{M}$$

DONDE M ES EL PESO MOLECULAR. OTRA FORMA DE LA ECUACION (7) ES, ENTONCES:

$$V = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Y, DADO QUE PARA UN GAS DADO, γ , R Y M SON CONSTANTES, VEMOS QUE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION ES PROPORCIONAL A LA RAZ CUADRADA DE LA TEMPERATURA ABSOLUTA.

C.2 INTENSIDAD DEL SONIDO :

DESDE UN PUNTO DE VISTA GEOMETRICO, AGUELLO QUE ES PROPAGADO POR UNA ONDA VIAJERA ES LA FORMA DE LA ONDA. DESDE UN PUNTO DE VISTA FISICO, ALGO MÁS ES PROPAGADO POR UNA ONDA, ESTO ES, LA ENERGIA. EL EJEMPLO MAS SOBRESALIENTE ES LA ENERGIA SUMINISTRADA A LA TIERRA POR EL SOL POR MEDIO DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS. LA INTENSIDAD "I" DE UNA ONDA VIAJERA SE DEFINE COMO LA "RAZON PROMEDIO DE TIEMPO A LA CUAL LA ENERGIA ES TRANSPORTADA POR LA ONDA POR UNIDAD DE AREA A LO LARGO DE UNA SUPERFICIE PERPENDICULAR A LA DIRECCION DE PROPAGACION". MAS BREVEMENTE, LA INTENSIDAD ES LA POTENCIA MEDIA TRANSPORTADA POR UNIDAD DE AREA.

LA ENERGIA EN UN MEDIO, A TRAVES DEL CUAL UNA ONDA SONORA ESTA VIAJANDO, ES EN PARTE POTENCIAL, ASOCIADA CON LA ENERGIA DE COMPRESION DEL MEDIO, Y EN PARTE CINETICA, ASOCIADA CON EL MOVIMIENTO DE LAS PARTICULAS DEL MEDIO. EN CUALQUIER PEQUEÑO VOLUMEN LAS CANTIDADES RELATIVAS DE LAS DOS FORMAS DE ENERGIA ESTAN CONTINUAMENTE CAMBIANDO, PERO EL TOTAL PERMANECE CONSTANTE. UN PROBLEMA ANALOGO ES EL DE LA VIBRACION DE UNA MASA SUSPENDIDA DE UN RESORTE DONDE LA ENERGIA ALTERNA ENTRE POTENCIAL Y CINETICA.

POR BREVEDAD, SE LLAMARA A LA ENERGIA ASOCIADA CON LA COMPRESION DEL MEDIO, ENERGIA DE PRESION. EL TRABAJO "W" HECHO EN UN SISTEMA EN UN PROCESO DE COMPRESION ES:

$$W = - \int p dV$$

DONDE V ES EL VOLUMEN. DE LA DEFINICION DE COMPRESIBILIDAD, K ,

$$dV = -K V_0 dp$$

ENTONCES:

$$W = - \int K V_0 p dp$$

EN CUALQUIER ONDA SONORA QUE SE ENCUENTRA EN LA PRACTICA, LAS VARIACIONES DE PRESION SON TAN PEQUEÑAS QUE K Y V_0 PUEDEN CONSIDERARSE CONSTANTES. EL TRABAJO HECHO EN INCREMENTAR LA PRESION MANOMETRICA DE 0 A P ES, ENTONCES:

$$W = K V_0 \int_0^P p dp = \frac{1}{2} K V_0 P^2$$

LA ENERGIA DE PRESION POR UNIDAD DE VOLUMEN ES:

$$\frac{W}{\Delta t} = \frac{1}{2} K P^2$$

EN UN INSTANTE, CUANDO LA PRESION MANOMETRICA IGUALA A LA PRESION MAXIMA P, LA ENERGIA DE PRESION ES UN MAXIMO TAMBIEN. LA ENERGIA CINETICA ES ENTONCES CERO, EN ESTE INSTANTE; LA ENERGIA ES TOTALMENTE ENERGIA DE PRESION, Y LA ENERGIA DE PRESION ES IGUAL A LA ENERGIA TOTAL. PERO LA ENERGIA TOTAL ES LA MISMA EN TODOS LOS INSTANTES, DE TAL FORMA QUE LA ENERGIA TOTAL POR UNIDAD DE VOLUMEN ES:

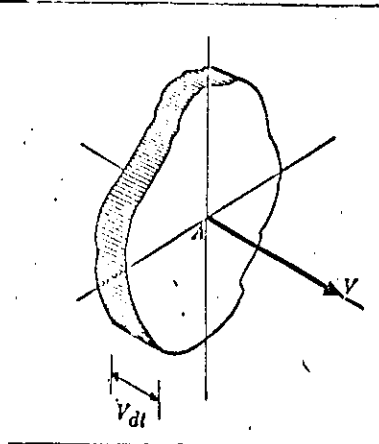
$$\frac{W}{\Delta t} = \frac{1}{2} K P^2 \quad (1)$$

CONSIDERESE AHORA EL ELEMENTO DE VOLUMEN DE LA FIGURA C.3, CUYOS EXTREMOS DE AREA A SON PERPENDICULARES A LA DIRECCION DE PROPAGACION DE LA ONDA SONORA, Y CUYA LONGITUD ES $V \Delta t$, DONDE V ES LA VELOCIDAD DE PROPAGACION. LA ENERGIA SONORA EN ESTE VOLUMEN ES EL PRODUCTO DE LA ENERGIA POR UNIDAD DE VOLUMEN, Y EL VOLUMEN DEL ELEMENTO.

$$\text{ENERGIA EN UN ELEMENTO DE VOLUMEN} = \frac{1}{2} K P^2 \times A V \Delta t$$

EN UN TIEMPO Δt , TODA LA ENERGIA EN EL ELEMENTO DE VOLUMEN CRUZARA LA CARA DE AREA A. ENTONCES LA ENERGIA CRUZANDO, POR UNIDAD DE AREA Y POR UNIDAD DE TIEMPO, O DE INTENSIDAD I, ES:

$$I = \frac{\frac{1}{2} K P^2 \times A V \Delta t}{A \Delta t} = \frac{1}{2} K P^2 V \quad (2)$$



Según Sears, F.W. Mechanics, Heat and Sound. Addison-Wesley.

FIGURA C.3

PERO

$$V = \sqrt{\frac{1}{k \epsilon_0}}$$

Y

$$k = \frac{1}{\epsilon_0 V^2}$$

CUANDO ESTA EXPRESION PARA K SE INSERTA EN LA ECUACION (2) SE OBTIENE:

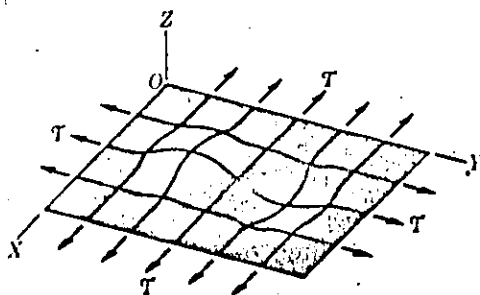
$$I = \frac{P^2}{2 \epsilon_0 V}$$

SE DEBE NOTAR QUE LA INTENSIDAD ES PROPORCIONAL AL CUADRADO DE LA AMPLITUD, UN RESULTADO QUE ES VERDADERO PARA CUALQUIER CLASE DE MOVIMIENTO ONDULATORIO.

C.3 VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LAS ONDAS EN LA SUPERFICIE DE UNA MEMBRANA :

SE CONSIDERARA UNA MEMBRANA DELGADA Y TENSA, LA CUAL PARA SIMPLIFICAR, SE SUPONDRÁ RECTANGULAR, AUNQUE ESTA LIMITACION NO ES NECESARIA (FIGURA C.4). LA MEMBRANA ESTA MONTADA SOBRE UN MARCO, EL CUAL EJERCE UNA TENSION T POR UNIDAD DE LONGITUD, EXPRESADA EN N/M. SI LA MEMBRANA SE DEFORMA EN UN PUNTO PARTICULAR Y EXPERIMENTA UN DESPLAZAMIENTO EN DIRECCION PERPENDICULAR A ELLA; ESTA DEFORMACION SE PROPAGARA POR LA MEMBRANA, RESULTANDO UNA ONDA SUPERFICIAL.

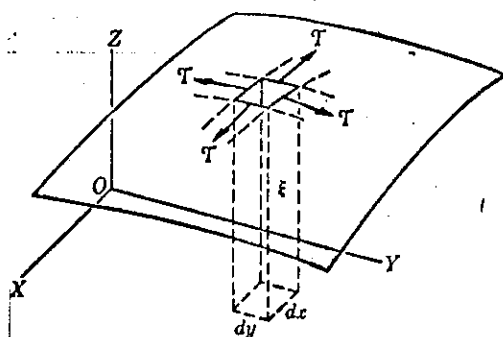
PARA OBTENER LA ECUACION DE ESTE MOVIMIENTO ONDULATORIO, SE CONSIDERARA UNA SUPERFICIE ELEMENTAL DE LA MEMBRANA DE LADOS dx , Y dy (FIGURA C.5). EN UN INSTANTE DADO ESTA SUPERFICIE EXPERIMENTARA UN DESPLAZAMIENTO HACIA ARRIBA; DEBIDO A QUE LA MEMBRANA ES CURVA, EL DESPLAZAMIENTO ES UNA FUNCION DE x Y y . LAS FUERZAS SOBRE LOS LADOS DEL AREA ELEMENTAL NO SON DIRECTAMENTE OPUESTAS. PARA OBTENER LA FUERZA VERTICAL NETA SE HARA LA DEDUCCION PARA UNA CUERDA SOMETIDA A UNA TENSION T PRIMERO, Y LUEGO SE PASARA AL CASO DE LA MEMBRANA, YA QUE ES POSIBLE PARA UNA MEMBRANA EL COMPORTRARSE COMO UNA COLECCION DE CUERDAS PARALELAS, CON ONDAS CUYAS CRESTAS ESTAN EN LINEAS PARALELAS, PERPENDICULARES A SU DIRECCION DE PROPAGACION. EL COMPORTAMIENTO DE ESTAS ONDAS ES EXACTAMENTE IGUAL AL COMPORTAMIENTO DE ONDAS EN UNA CUERDA FLEXIBLE: LAS ONDAS VIAJAN SIN CAMBIAR DE FORMA (CUANDO LA FRICCION ES DESPRECIABLE), Y CADA UNA DE ESTAS ONDAS VIAJA CON LA MISMA VELOCIDAD.



Onda superficial en una membrana tensa.

Según Alonso, M. y E.J. Finn. Física: Volumen II. Fondo Educativo, S.A.

FIGURA C.4



Fuerzas que se ejercen sobre un elemento de superficie de una membrana tensa.

Según Alonso, M. y E.J. Finn. Física:
Volumen II. Fondo Educativo, S.A.

FIGURA C.5

SE CONSIDERA EL CASO DE UNA CUERDA SOMETIDA A UNA TENSION T . EN CONDICIONES DE EQUILIBRIO LA CUERDA ESTA EN LINEA RECTA. SI SE DESPLAZA LA CUERDA PERPENDICULARMENTE A SU LONGITUD, EN UNA PEQUEÑA CANTIDAD, COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA C.6, ENTONCES UNA PORCION AB DE LA CUERDA, DE LONGITUD dx , SE DESPLAZA DE SU POSICION DE EQUILIBRIO UNA DISTANCIA z . EN CADA EXTREMO ACTUA UNA FUERZA TANGENCIAL T ; EN EL EXTREMO B, ESTA FUERZA ES PRODUCIDA POR LA TENSION DE LA CUERDA A LA DERECHA Y EN EL EXTREMO A POR LA TENSION DE LA CUERDA A LA IZQUIERDA. DEBIDO A LA CURVATURA DE LA CUERDA, ESTAS DOS FUERZAS NO SON DIRECTAMENTE OPUESTAS. LA COMPONENTE VERTICAL DE CADA FUERZA ES $T_y' = T \text{sen } \alpha'$, $T_y = -T \text{sen } \alpha$. LA FUERZA RESULTANTE SOBRE LA PORCION AB DE LA CUERDA ES:

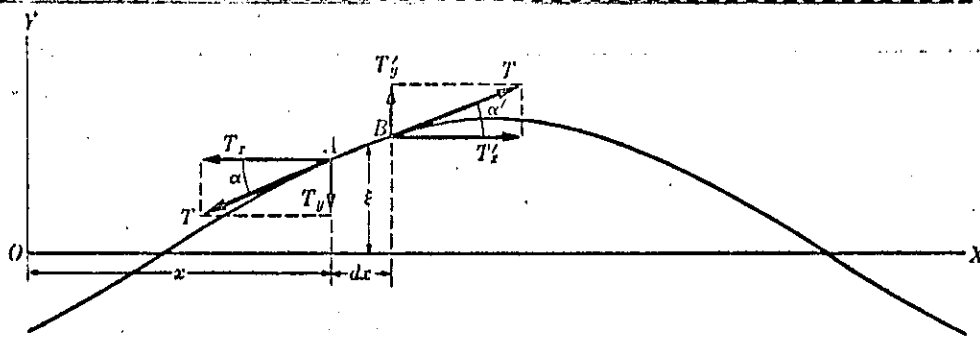
$$F_y = T(\text{sen } \alpha' - \text{sen } \alpha)$$

SI LA CURVATURA DE LA CUERDA NO ES MUY GRANDE, LOS ANGULOS α Y α' SON PEQUEÑOS Y SUS SENOS SE PUEDEN REEMPLAZAR POR SUS TANGENTES, DE MODO QUE LA FUERZA HACIA ARRIBA ES:

$$F_y = T(\text{tg } \alpha' - \text{tg } \alpha) = T d(\text{tg } \alpha) = T \frac{\partial}{\partial x}(\text{tg } \alpha) dx$$

DONDE SE USAN DERIVADAS PARCIALES PORQUE $\text{tg } \alpha$ DEPENDE DE x Y DE t . COMO $\text{tg } \alpha$, QUE ES LA PENDIENTE DE LA CURVA FORMADA POR LA CUERDA, ES IGUAL A $\frac{\partial z}{\partial x}$, SE TIENE QUE:

$$F_y = T \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) dx = T \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} dx$$



Fuerzas que se ejercen sobre una sección de una cuerda desplazada transversalmente.

Según Alonso, M. y E.J. Finn. Física:
Volumen II. Fondo Educativo, S.A.

FIGURA C.6

SEGUN LA DEDUCCION ANTERIOR SE PUEDE NOTAR QUE PARA EL CASO DE LA MEMBRANA, LOS LADOS PARALELOS AL EJE Y ESTAN SUJETOS A FUERZAS σdy Y LA RESULTANTE VERTICAL DE ESTAS FUERZAS ES:

$$(\sigma dy) \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx = \sigma \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx dy$$

ANALOGAMENTE, LOS LADOS PARALELOS AL EJE X ESTAN SUJETOS A LAS FUERZAS σdx , CUYA RESULTANTE ES:

$$(\sigma dx) \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} dy = \sigma \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} dx dy$$

POR LO TANTO, LA FUERZA NETA VERTICAL ES LA SUMA DE LAS DOS:

$$F_z = \sigma \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right) dx dy$$

SI LA MASA POR UNIDAD DE AREA (O DENSIDAD SUPERFICIAL, EXPRESADA EN KG/M^2 , DE LA MEMBRANA ES σ , LA MASA DE ESTA PORCION DE MEMBRANA ES $\sigma dx dy$, Y COMO SU ACELERACION VERTICAL ES $\partial^2 \xi / \partial t^2$, SE PUEDE

ESCRIBIR LA ECUACION DE MOVIMIENTO DE ESTA PORCION DE MEMBRANA EN LA FORMA:

$$(\sigma dx dy) \frac{\partial^2 g}{\partial t^2} = \tau \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \right) dx dy$$

O SEA:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial t^2} = \frac{\tau}{\sigma} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \right)$$

SI SE COMPARA ESTA EXPRESION CON LA EXPRESION GENERAL PARA ONDAS BIDIMENSIONALES:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial t^2} = v^2 \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \right)$$

SE PUEDE NOTAR AL COMPARARLAS QUE:

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\sigma}} \quad \text{o} \quad v^2 = \frac{\tau}{\sigma}$$

DONDE ESTA EXPRESION ES LA EXPRESION PARA LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE UNA ONDA EN LA SUPERFICIE DE UNA MEMBRANA.

ESTA EXPRESION PUEDE SER VERIFICADA DIMENSIONALMENTE DE LA SIGUIENTE FORMA:

σ EN kg/m^2

τ EN N/m^2

CON $\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{seg}^2$

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\sigma}}$$

DIMENSIONALMENTE $\sqrt{\frac{\text{N}}{\text{m}} \times \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}}$

$$= \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{seg}^2} \times \frac{\text{m}}{\text{seg}}}$$

$$= \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{seg}^2}}$$

$$= \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

C.4 DEDUCCION DE LAS CONDICIONES $k_1 = \frac{\omega_1 \pi}{a}$ Y $k_2 = \frac{\omega_2 \pi}{b}$.

SE HA DICHO QUE SOBRE LA MEMBRANA HAY UNA SUPERPOSICION DE CUATRO ONDAS QUE CORRESPONDEN A LAS CUATRO COMBINACIONES POSIBLES DE $\pm k_1$ Y $\pm k_2$. EL SISTEMA DE LAS CUATRO ONDAS DA UNA RESULTANTE ξ , DE ACUERDO CON:

$$\begin{aligned} \xi = & \xi_0 \text{sen} [\omega t - (k_1 x + k_2 y)] + \xi_0' \text{sen} [\omega t - (k_1 x - k_2 y)] \\ & + \xi_0'' \text{sen} [\omega t - (-k_1 x - k_2 y)] + \xi_0''' \text{sen} [\omega t - (-k_1 x + k_2 y)] \end{aligned} \quad (1)$$

QUE ES LA EQUIVALENTE DE LA EXPRESION PARA UNA DIMENSION. PARA TODOS LOS PUNTOS DONDE $x = 0$, SE DEBE TENER $\xi = 0$. HACIENDO $x = 0$ EN LA ECUACION (1), Y AGRUPANDO LOS TERMINOS EQUIVALENTES, SE PUEDE ESCRIBIR:

$$\xi = (\xi_0 + \xi_0''') \text{sen} (\omega t - k_2 y) + (\xi_0' + \xi_0'') \text{sen} (\omega t + k_2 y) = 0$$

LO CUAL REQUIERE QUE:

$$\xi_0 + \xi_0''' = 0 \quad \xi_0' + \xi_0'' = 0 \quad (2)$$

ANALOGAMENTE, PARA TODOS LOS PUNTOS DONDE $y = 0$, SE DEBE TENER $\xi = 0$ DE MODO QUE LA ECUACION (1) PRODUCE:

$$\xi = (\xi_0 + \xi_0') \text{sen} (\omega t - k_1 x) + (\xi_0'' + \xi_0''') \text{sen} (\omega t + k_1 x) = 0$$

QUE A SU VEZ REQUIERE QUE:

$$\xi_0 + \xi_0' = 0 \quad \xi_0'' + \xi_0''' = 0 \quad (3)$$

COMBINANDO LAS ECUACIONES (2) Y (3), SE ENCUENTRA QUE:

$$\xi_0 = -\xi_0' = -\xi_0'' = -\xi_0'''$$

QUE DA LOS CAMBIOS DE FASE CORRESPONDIENTES A CADA REFLEXION DE ACUERDO CON EL RESULTADO SIMILAR OBTENIDO PARA EL CASO DE UNA CUERDA. POR LO QUE LA ECUACION (1) SE CONVIERTE EN:

$$\begin{aligned} \xi = & \xi_0 \{ \text{sen} [\omega t - (k_1 x + k_2 y)] - \text{sen} [\omega t - (k_1 x - k_2 y)] \\ & + \text{sen} [\omega t - (-k_1 x - k_2 y)] - \text{sen} [\omega t - (-k_1 x + k_2 y)] \} \end{aligned}$$

TRANSFORMANDO CADA LINEA DE LA ECUACION ANTERIOR EN UN PRODUCTO, POR MEDIO DE LA ECUACION:

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin (\alpha - \beta) + \sin (\alpha + \beta)]$$

SE TIENE:

$$\begin{aligned} \xi &= 2\zeta_0 [-\sin k_2 y \cos (wt - k_1 x) + \sin k_2 y \cos (wt + k_1 x)] \\ &= 2\zeta_0 [\sin k_2 y [-\cos (wt - k_1 x) + \cos (wt + k_1 x)]] \end{aligned}$$

TRANSFORMANDO DE NUEVO LA DIFERENCIA DE LOS COSENO EN UN PRODUCTO, SE OBTIENE:

$$\xi = -4 \zeta_0 \sin k_1 x \sin k_2 y \sin wt$$

EL SIGNO NEGATIVO AL FRENTE CARECE DE IMPORTANCIA Y NO TIENE SIGNIFICADO ESPECIAL. SE PUEDE VERIFICAR LA PRIMERA CONDICION DE CONTORNO HACIENDO $x=0$ O $y=0$, Y OBSERVANDO QUE SE OBTIENE $\xi=0$ QUE CONSTITUYE LA PRIMERA CONDICION.

SE PUEDE VERIFICAR LA SEGUNDA CONDICION DE CONTORNO; ESTO ES, $\xi=0$ PARA $x=a$ O $y=b$. ESTAS CONDICIONES REQUIEREN QUE $\sin k_1 a = 0$ O $\sin k_2 b = 0$, CON LO CUAL RESULTA QUE $k_1 a = n_1 \pi$ Y $k_2 b = n_2 \pi$.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALONSO, M., Y E.J.FINN. 1976. FISICA: VOLUMEN II. FONDO EDUCATIVO, S.A., MEXICO.
- [2] BARISH, N.N. 1962. ECONOMIC ANALYSIS FOR ENGINEERING AND MANAGERIAL DECISION-MAKING. MC GRAH-HILL BOOK COMPANY, NEW YORK.
- [3] DALLOS, P., M.C.BILLONE, J.D.DURRANT, C.-Y.WANG, Y S. RAYNOR. 1972. COCHLEAR INNER AND OUTER HAIR CELLS: FUNCTIONAL DIFFERENCES. SCIENCE. 177:356.
- [4] DAVIS, H. 1962. ADVANCES IN THE NEUROPHYSIOLOGY AND NEURO-ANATOMY OF THE COCHLEA. J. ACOUST. SOC. AMER. 34:1377
- [5] ELMAGHRABY, S.E. 1968. THE ROLE OF MODELING IN I.E. DESIGN. THE JOURNAL OF INDUSTRIAL ENGINEERING. VOL. XIX, NO. 6, JUNE.
- [6] FLANAGAN, J.L. 1960. MODELS FOR APPROXIMATING BASILAR MEMBRANE DISPLACEMENT. BELL SYST. TECH. J. 39:1163.
- [7] FLETCHER, H., Y W.A. MUNSON. 1933. LOUDNESS, ITS DEFINITION, MEASUREMENT AND CALCULATION. J. ACOUST. SOC. AMER. 5:82.
- [8] FRUMENTO, A. 1972. BIFISICA. EDITORIAL INTERMEDICA, S.A.I.C.I., BUENOS AIRES.
- [9] GUYTON, A.C. 1971. TRATADO DE FISILOGIA MEDICA. EDITORIAL INTERAMERICANA, MEXICO.
- [10] HOUTSMA, A.J.M., Y J.L. GOLDSTEIN. 1972. PERCEPTION OF MUSICAL INTERVALS: EVIDENCE FOR THE CENTRAL ORIGIN OF THE FITCH OF COMPLEX TONES. J. ACCUST. SOC. AMER. 51:520.
- [11] KIANG, N.Y.-S., T. WATANABE, E.C. THOMAS, Y L.F. CLARK. 1965. DISCHARGE PATTERNS OF SINGLE FIBERS IN THE CAT'S AUDITORY NERVE. MIT PRESS, CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS.
- [12] MCLINO, J.A. 1973. PURE-TONE EQUAL-LOUDNESS CONTOURS FOR STANDARD TONES OF DIFFERENT FREQUENCIES. PERCEPT. PSYCHOPHYS. 14:1.
- [13] NILSON, L., J. LINDBERG, D.H. INGVAR, S. NORDFELT, Y R. PETERSON. 1975. DESCUBRIR EL HOMBRE. SALVAT EDITORES, S.A., MEXICO.
- [14] PLOMP, R. 1964. THE EAR AS A FREQUENCY ANALYZER. J. ACOUST. SOC. AMER. 36:1628.

- (115) PLOMP, R. 1965. DETECTABILITY THRESHOLD FOR COMBINATION TONES. J. ACOUST. SOC. AMER. 37:1110.
- (116) PLOMP, R. 1967. BEATS OF MISMATCHED CONSONANCES. J. ACOUST. SOC. AMER. 42:462.
- (117) PLOMP, R. 1970. TIMBRE AS A MULTIDIMENSIONAL ATTRIBUTE OF COMPLEX TONES. IN FREQUENCY ANALYSIS AND PERIODICITY DETECTION IN HEARING. R. PLOMP. AND F.G. SMOGRENBURG, EDS. A.W. SUIJTHOFF, LEIDEN.
- (118) RHOADE, W.S. Y L. ROBLES. 1974. EVIDENCE FROM MÜSSBAUER EXPERIMENTS FOR NONLINEAR VIBRATION IN THE COCHLEA. J. ACOUST. SOC. AMER. 55:588.
- (119) ROEDERER, J.G. 1975. INTRODUCTION TO THE PHYSICS AND PSYCHOPHYSICS OF MUSIC. SPRINGER-VERLAG, NEW YORK.
- (120) HOWE, A.J. 1963. SIMULATION-A DECISION- AIDING TOOL. A.I.I.E. INTERNATIONAL CONFERENCE PROCEEDINGS, NEW YORK.
- (121) SEARS, F.W. 1950. MECHANICS, HEAT AND SOUND. ADDISON-WESLEY PRESS, INC.
- (122) SHANNON, R.E. 1975. SYSTEMS SIMULATION THE ART AND SCIENCE. PRENTICE HALL, INC., ENGLEWOOD CLIFFS, N.J.
- (123) STEVENS, S.S., J. VOLKMAN, Y E.B. NEWMAN. 1937. A SCALE FOR THE MEASUREMENT OF PSYCHOLOGICAL MAGNITUDE PITCH. J. ACOUST. SOC. AMER. 8:185.
- (124) STEVENS, S.S. 1955. MEASUREMENT OF LOUDNESS. J. ACOUST. SOC. AMER. 27:815.
- (125) STEVENS, S.S. 1970. NEURAL EVENTS AND THE PSYCHOPHYSICAL LAW. SCIENCE. 170:1043.
- (126) TERHARDT, E. 1971. PITCH SHIFTS OF HARMONICS, AN EXPLANATION OF THE OCTAVE ENLARGEMENT PHENOMENON. PRCC. 7TH INT. CONGR. ACOUST. BUDAPEST. 3:621.
- (127) VON BEKESY, G. 1942. ÜBER DIE SCHWINGUNGEN DER SCHNECKENTRENNWAND BEIM PRÄPARAT UND OHRENMODELL. AKUST. ZEIT. 7:173.
- (128) VON BEKESY, G. 1947. VARIATIONS OF PHASE ALONG THE BASILAR MEMBRANE WITH SINUSOIDAL VIBRATIONS. J. ACOUST. SOC. AMER. 19:452
- (129) VON BEKESY, G. 1949. ÜBER DIE RESONANZKURVE UND DIE ABKLINGZEIT DER VERSCHIEDENEN STELLEN DER SCHNECKENTRENNWAND. J. ACOUST. SOC. AMER. 21:245.
- (130) VON BEKESY, G. 1960. EXPERIMENTS IN HEARING. MC GRAW-HILL BOOK COMPANY, NEW YORK.

- [31] WALLISER, K. 1969. ÜBER DIE ABHÄNGIGKEITEN DER
TONHÖHENEMPFINDUNG VON SINUSTÖNEN VON SCHALLPEGEL, VON
ÜBERLAGERTEM DROSSLENDEN STÖRSCHALL UND VON DER DARBIETUNGSDAUER.
ACUSTICA 21:211.
- [32] ZWICKER, E.G. FLICHTORF, Y S.S. STEVENS. 1957. CRITICAL
BANDWIDTH IN LOUDNESS SUMMATION. J. ACOUST. SOC. AMER. 29:548.
- [33] ZWISLOCKI, J. 1957. SOME IMPEDANCE MEASUREMENTS ON NORMAL AND
PATHOLOGICAL EARS. J. ACOUST. SOC. AMER. 29:1312.