
Transductors acústics

Micròfons, altaveus i acceleròmetres

PID_00221940

Pere Artís Gabarró

Temps mínim de dedicació recomanat: 5 hores



**Pere Artís Gabarró**

Enginyer de telecomunicació per la UPC, especialista en acústica, soroll i vibracions. Després d'haver treballat a Applus, Enginyeria i Arquitectura La Salle i en diferents laboratoris acústics, acredita una sòlida experiència en la consultoria i formació acústica.

Actualment, és gerent de Keacoustics, enginyeria especialitzada en projectes que inclouen assajos acústics, xarxes de monitorització acústica, gestió de la contaminació acústica en *smartcities*, control de soroll, acústica subaquàtica, simulacions numèriques, i formació. Apassionat de l'acústica, membre de telecos.cat i de l'associació catalana de consultors acústics, participa en la redacció de legislació.

Primera edició: febrer 2019

© Pere Artís Gabarró

Tots els drets reservats

© d'aquesta edició, FUOC, 2019

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Realització editorial: FUOC

Cap part d'aquesta publicació, incloent-hi el disseny general i la coberta, no pot ser copiada, reproduïda, emmagatzemada o transmesa de cap manera ni per cap mitjà, tant si és elèctric com químic, mecànic, òptic, de gravació, de fotocòpia o per altres mètodes, sense l'autorització prèvia per escrit dels titulars del copyright.

Índex

Introducció	5
Objectius	6
1. Micròfons	7
1.1. Propietats generals dels micròfons	7
1.1.1. Sensibilitat	7
1.1.2. Resposta en freqüència	8
1.1.3. Directivitat	8
1.2. Classificació i tipus de micròfons	10
1.2.1. Micròfons en funció del camp acústic	10
1.2.2. Micròfons en funció de la transducció acústica- mecànica (TAM)	11
1.2.3. Micròfons en funció de la transducció mecànica- elèctrica (TME)	16
1.3. Micròfons de mesura	23
1.3.1. Directivitat dels micròfons de mesura	24
1.3.2. Micròfons de camp lliure i micròfons de camp difús	25
1.3.3. Efectes ambientals i estabilitat	29
1.3.4. Pantalla protectora antivent	30
1.3.5. Accessoris per a equips exteriors	31
1.3.6. Preamplificador	31
1.3.7. Marge dinàmic	32
2. Altaveus	33
2.1. Propietats generals dels altaveus	34
2.1.1. Classificació dels altaveus	34
2.1.2. Impedància elèctrica	35
2.1.3. Rendiment	35
2.1.4. Sensibilitat	36
2.1.5. Potència elèctrica	36
2.2. Altaveu dinàmic de bobina mòbil	36
2.3. Altaveus plans	38
2.3.1. Altaveus electrostàtics	39
2.3.2. Altaveus DML	40
2.4. Botzines	41
2.5. Caixes acústiques	43
3. Acceleròmetres	47
3.1. L'efecte piezoelèctric	47
3.2. Estructura de l'acceleròmetre piezoelèctric	47

3.2.1. Acceleròmetres piezoelèctrics de cisalla	49
3.3. Paràmetres dels acceleròmetres	50
3.3.1. Rang freqüencial	50
3.3.2. Sensibilitat transversal	52
3.3.3. Linealitat i rang dinàmic	53
3.4. Sistema de muntatge	53
Resum	55
Exercicis d'autoavaluació	57
Solucionari	58
Bibliografia	59

Introducció

El mòdul de transductors acústics tracta dels principals mètodes de transducció en el món de l'electroacústica i els mesuraments vibroacústics.

En primer lloc s'estudien els micròfons, els transductors que converteixen energia acústica en energia elèctrica i que serveixen per a múltiples aplicacions d'àudio i d'enginyeria acústica. En aquesta secció, s'especifiquen les principals propietats dels micròfons i es van desgranant aspectes com ara la sensibilitat, la resposta en freqüència i la directivitat. Es presenten els tipus de micròfons més emprats avui en dia: els electrodinàmics i els electrostàtics. També, es detallen els tipus de micròfon en funció del tipus de camp acústic a què han de respondre. Finalment, es descriu amb major precisió un tipus de micròfon: el micròfon de mesura.

A continuació, s'aborda l'estudi dels altaveus, iniciant-s'hi amb els seves propietats més importants. Anàlogament al cas dels micròfons, es descriuen les tecnologies més utilitzades avui en dia: altaveu electrodinàmic, electrostàtic i DML. S'aborda la problemàtica de la poca eficiència de radiació i s'introdueix el concepte de botzina acústica. Finalment, es detallen les diferents tecnologies existents per ampliar la resposta en baixa freqüència a partir de caixes acústiques.

Finalment, el mòdul es centra en l'estudi dels acceleròmetres, els transductors que converteixen energia de vibració en energia elèctrica. Se'n descriuen les principals característiques que cal conèixer a l'hora d'escollir un tipus d'acceleròmetre per a una o altra mesura vibroacústica.

Objectius

Els principals objectius d'aquest mòdul són els següents:

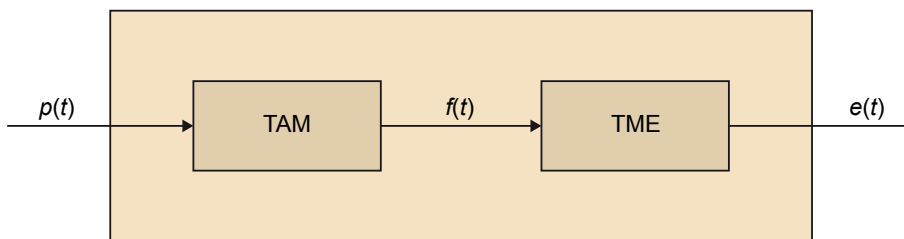
- 1.** Conèixer els principals mecanismes de transducció acústica-elèctrica i mecànica-acústica.
- 2.** Conèixer les propietats principals dels altaveus i dels micròfons.
- 3.** Conèixer, identificar i distingir els diferents tipus de micròfons.
- 4.** Conèixer, identificar i distingir els diferents tipus d'altaveus.
- 5.** Conèixer les propietats principals dels acceleròmetres.

1. Micròfons

Un micròfon és un dispositiu transductor d'energia acústica a energia elèctrica, per ser, en general, amplificada.

Si bé el micròfon és el transductor que converteix l'energia acústica en energia elèctrica, realitzant la funció oposada a un altaveu, aquesta transducció no és directa, i consisteix en una transducció acústica-mecànica (TAM) i en una transducció mecànica-elèctrica (TME): la TAM converteix les variacions de pressió ($p(t)$) en un moviment d'alguna part del micròfon ($f(t)$), mentre que la TME tradueix aquests moviments en senyals elèctrics de baix nivell ($e(t)$).

Figura 1. El micròfon com a transductor: transducció acústica-mecànica (TAM) i transducció mecànica-elèctrica (TME)



1.1. Propietats generals dels micròfons

Les tres principals propietats que caracteritzen el comportament d'un micròfon són les següents: la sensibilitat, la resposta en freqüència i la directivitat.

1.1.1. Sensibilitat

La sensibilitat d'un micròfon mesurala capacitat del transductor de transformar energia acústica en energia elèctrica. Expressada matemàticament, és la relació de la sortida del micròfon a una ona de pressió acústica al corresponent diafragma quan es disposa del micròfon en circuit obert:

$$S = \frac{V}{p} \quad (1)$$

essent S la sensibilitat del micròfon, expressada en mV/Pa ; V la tensió de sortida del micròfon, expressada en mV ; i p la pressió exercida sobre el diafragma del micròfon, expressada en Pa (pascals).

La sensibilitat també es pot expressar en unitats de dB a partir de la sensibilitat de referència $S_{ref} = 1V/P_a$, o de, si és el cas, la referència que especifiqui el fabricant:

$$L_S = 20 \log_{10} \left(\frac{S}{S_{ref}} \right) \quad (2)$$

essent L_S la sensibilitat expressada en dB, S la sensibilitat expressada en unitats lineals, i S_{ref} la sensibilitat de referència expressada en les mateixes unitats que S . Si no s'especifica el contrari, **la sensibilitat d'un micròfon es dona per a la freqüència d'1 kHz i un angle d'incidència de 0°, és dir, en la direcció axial del micròfon.**

La sensibilitat d'un micròfon és funció de la freqüència (f) i de l'angle d'incidència de l'ona acústica (θ), dependències que queden caracteritzades per la **resposta en freqüència** i la **directivitat** del micròfon, respectivament.

1.1.2. Resposta en freqüència

La **resposta en freqüència** d'un micròfon s'espera **màximament plana en tot el rang freqüencial**. Entre d'altres paràmetres, depèn tant del tipus de micròfon com de les seves dimensions. La resposta en freqüència és un paràmetre fonamental que aporta informació sobre la **fidelitat del micròfon**, que no és altra cosa que la **variació de la sensibilitat en una banda freqüencial**.

El rang freqüencial del micròfon serà funció de l'aplicació per a la qual estigui pensat. No serà el mateix un micròfon destinat a la reproducció de la veu humana ($f \leq 20$ kHz), que un micròfon destinat a la mesura d'ultrasons ($f > 20$ kHz).

1.1.3. Directivitat

Hi ha un conjunt de patrons típics que presenten els micròfons reals:

- Per als **micròfons omnidireccionals**, la sensibilitat no depèn de l'angle d'incidència (és a dir, capten per igual les ones acústiques provinents de qualsevol direcció de l'espai).
- Els **micròfons bidireccionals** presenten un diagrama de radiació en forma de 8.
- Els **micròfons unidireccionals** tenen un diagrama de radiació amb un lòbul principal molt major que els lòbuls secundaris. Els micròfons unidireccionals poden ser **cardioides**, **supercardioides** i **hipercardioides**, essent cadascun d'ells més directiu que l'anterior.

La gràfica polar d'un micròfon dona una mesura de la sensibilitat del micròfon en funció de l'angle d'incidència de l'ona acústica i es representa mitjançant la següent equació polar:

$$R(\theta) = \frac{p(\theta)}{p_{max}} \quad (3)$$

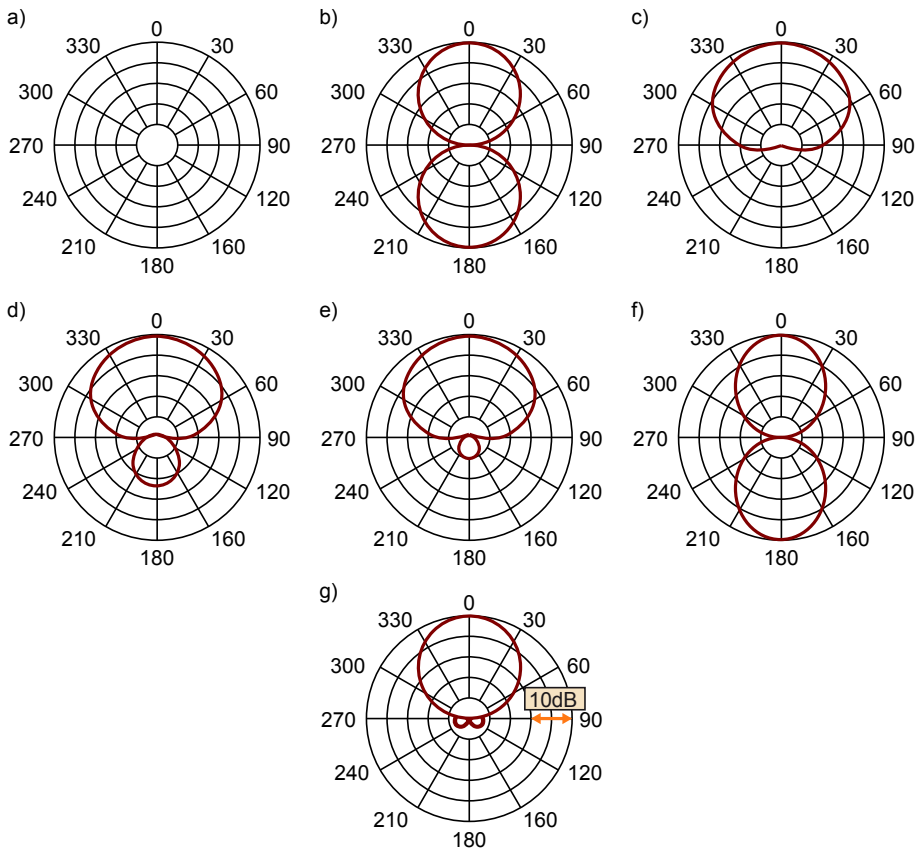
essent $R(\theta)$ la gràfica polar del micròfon en funció de l'angle d'incidència θ , i a on $p(\theta)$ i p_{max} són, respectivament, la pressió incident amb angle θ i la pressió màxima.

La taula 1 i la figura 2 mostren l'expressió de l'equació polar i el diagrama polar, o de radiació, de cadascun dels tipus de micròfon abans esmentats, respectivament.

Taula 1. Equacions polars dels patrons estàndard de micròfons

Característica	Equació polar
a) Omnidireccional	$R(\theta) = 1$
b) Bidireccional	$R(\theta) = \cos\theta$
c) Cardioide	$R(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta)$
d) Hipercardioide	$R(\theta) = \frac{1}{4}(1 + 3\cos\theta)$
e) Supercardioide	$R(\theta) = \frac{1}{2}[(\sqrt{3} - 1) + (3 - \sqrt{3})\cos\theta]$
f) Bidireccional de 2n. ordre	$R(\theta) = \cos^2\theta$
g) Cardioide de 2n. ordre	$R(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta)\cos\theta$

Figura 2. Diagrames de radiació dels patrons estàndard de micròfons



1.2. Classificació i tipus de micròfons

Els micròfons es poden classificar en funció de diferents criteris:

- La seva **directivitat** (veure subapartat 1.1.3).
- El **tipus de camp acústic** a què responen (veure subapartat 1.2.1).
- La **tècnica de conversió** del senyal acústic al senyal elèctric (TAM i TME) (veure subapartats 1.2.2 i 1.2.3).

1.2.1. Micròfons en funció del camp acústic

En general, es consideren tres tipus diferents de camps acústics: camp lliure, camp difús i camp de pressió.

El **camp lliure** (*free field*) es dona quan el **senyal acústic que es vol capturar prové, bàsicament, d'una única direcció**. En aquest tipus de micròfons, el disseny cerca trobar la millor resposta en freqüència en la seva direcció axial.

Pel que fa al **camp difús** (*random incidence*), és aquell en què **la densitat d'energia és uniforme en tot el camp i, per tant, la probabilitat que arribi una ona acústica en qualsevol direcció és la mateixa**. En aquest cas, convé una resposta del transductor màximament plana en totes les direccions, sense haver d'assegurar que la direcció axial sigui la de major rendiment acústic.

Els micròfons de camp lliure i de camp difús porten incorporada la correcció de l'efecte de mesura, que és aquell efecte que provoquen les reflexions i difraccions en situar un micròfon en un camp acústic. La correcció es realitza, bàsicament, ajustant les propietats del diafragma. Aquests tipus de micròfons s'utilitzen en la majoria d'aplicacions de mesuraments acústics i en la totalitat de les aplicacions d'enginyeria d'àudio.

Hi ha un cas, però, en què aquesta correcció no és necessària: el **camp de pressió** (*pressure field*). Aquest camp es dona en cavitats petites, com ara acobladors o sistemes de control dels audiòfons. En aquest cas, convé convertir el senyal acústic, tenint en compte l'efecte de situar un micròfon en el camp acústic, a un senyal elèctric.

1.2.2. Micròfons en funció de la transducció acústica-mecànica (TAM)

Amb relació a la TAM, podem trobar tres tipus de micròfon: els **micròfons de pressió**, els **micròfons de gradient de pressió** i els **micròfons combinats**. Aquests tipus de micròfon mantenen relació amb els diagrames de radiació o de directivitat: l'ona acústica incideix sobre el diafragma en funció de l'estructura del micròfon.

1) Micròfons de pressió

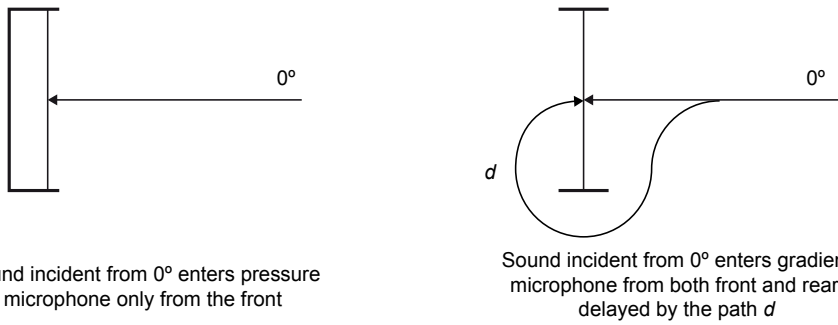
En els micròfons de pressió, el diafragma flexible s'emplaça enfront d'una cavitat tancada, de manera que l'ona acústica únicament incideix sobre una de les seves cares, tot oferint una **resposta independent de l'angle d'incidència**. Així, els micròfons de pressió **responen a la variació de la pressió sonora**. A més, tenen un orifici per garantir-hi una pressió atmosfèrica mitjana estable al seu interior.

La resposta d'un micròfon de pressió no dependrà de l'angle d'incidència, sempre i quan les seves dimensions siguin menors que les longituds d'ona. Per a altes freqüències es produeixen fenòmens d'interferència i reflexions a la membrana que en modifiquen la característica d'omnidireccionalitat.

2) Micròfons de gradient de pressió

En els micròfons de gradient de pressió, el diafragma no s'emplaça enfront d'una cavitat tancada i les ones de pressió poden incidir-hi en les dues cares. En aquest tipus de micròfon, la membrana està sotmesa a l'ona incident i a l'ona rebuda per la cara posterior amb un retard temporal determinat, tal i com es mostra a la figura 3.

Figura 3. Ones incidents en un diafragma d'un micròfon de pressió (esquerra) i d'un micròfon de gradient de pressió (dreta)



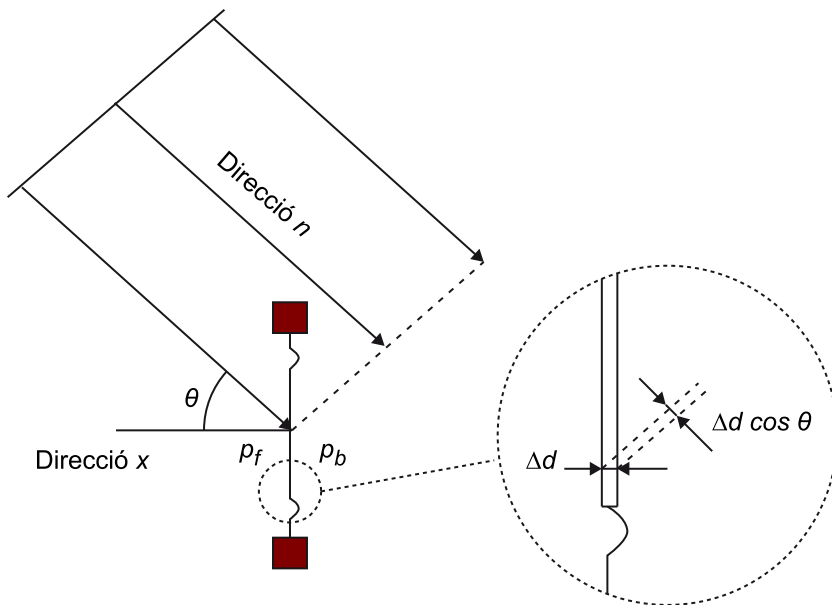
Font: Eargle (2012).

La força neta sobre la membrana és el resultat de la diferència de pressions (Δp), que es pot expressar de la següent manera:

$$\Delta p \cong \frac{\partial p}{\partial x} \Delta d = \frac{\partial p}{\partial n} \Delta d \cos \theta \quad (4)$$

essent Δd la distància entre les dues cares del diafragma, x la direcció normal, i θ l'angle entre les direccions x i n , tal i com es mostra a la figura 4:

Figura 4. Ones incidents en un micròfon de gradient de pressió



En el cas que l'ona incident sigui plana, l'ona incident serà del tipus $p = p_0 e^{-jkn}$, resultant-ne la següent diferència de pressions:

$$\Delta p = - jkp \Delta d \cos \theta \quad (5)$$

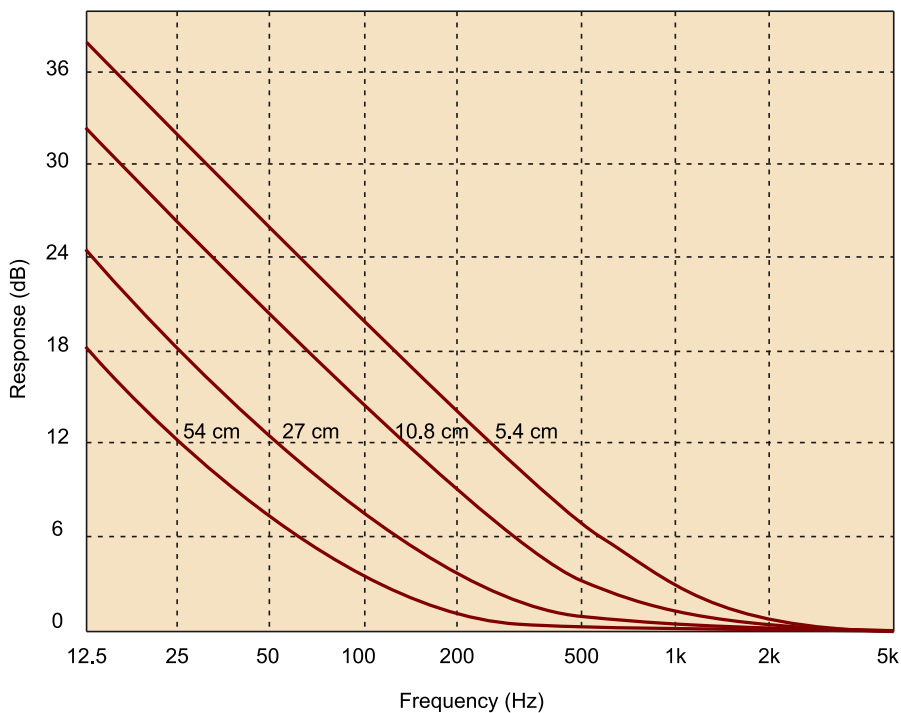
Mentre que, per a ones esfèriques, l'ona incident és de la forma $p = \frac{jw\rho_0 U}{4\pi r} e^{-jkr}$ i la diferència de pressions resultant és:

$$\Delta p = -\left(\frac{1}{jkr} + 1\right)jkp \cdot d\cos\theta \quad (6)$$

De l'expressió (5) es dedueix que el micròfon no respon a direccions perpendiculars a la membrana, mentre que presenta màxims a les direccions axials. Per tant, els micròfons de gradient presenten un **diagrama de radiació bidireccional tipus cosinus o en forma de 8**. D'altra banda, l'expressió (6) indica que, per a ones esfèriques (és a dir, quan el micròfon és utilitzat per un orador), la resposta del micròfon depèn fortament del factor $\left(\frac{1}{jkr} + 1\right)$:

- A altes freqüències, tenim que $kr \gg 1$, de manera que el factor no afecta i la resposta és igual que per a ones planes.
- Contràriament, a baixes freqüències, tenim que $kr \ll 1$, i la pressió augmenta en disminuir la distància al micròfon, tal com il·lustra la figura 5. Aquest comportament es coneix com **efecte de proximitat** i sovint s'utilitza per amplificar les baixes freqüències.

Figura 5. Efecte de proximitat en un micròfon de gradient de pressió, en funció de la distància a què es parli del micròfon



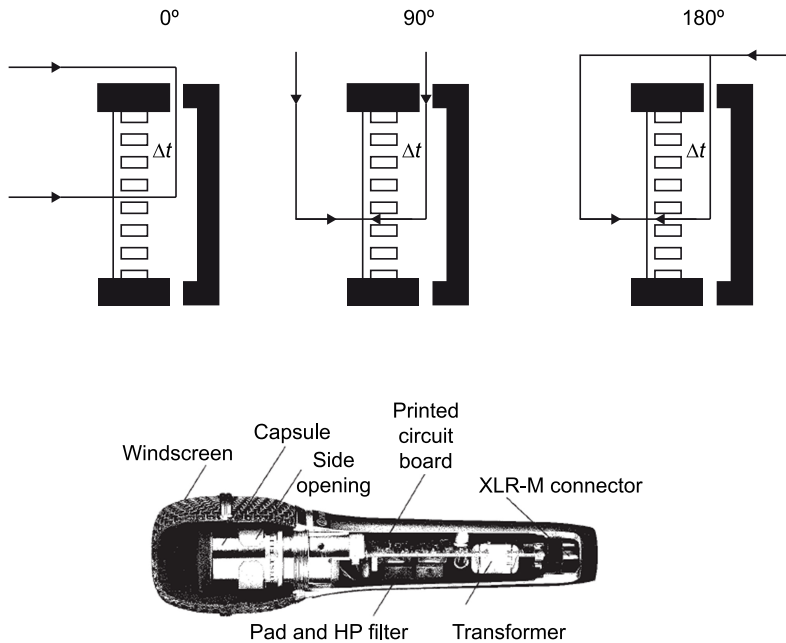
Font: Eargle (2012).

3) Micròfons combinats de pressió i gradient

Per aconseguir diagrames de radiació determinats, es combinen les dues tipologies anteriors, tot donant lloc als micròfons combinats de pressió i gradient. A partir d'un sistema resistiu a la part posterior de la cavitat d'un micròfon de pressió, s'aconsegueix especificar el desfasament i controlar el

diagrama de directivitat. Per a un micròfon tipus cardioide amb una única membrana capacitiva com el de la figura 6, es pot comprovar el comportament del dispositiu davant tres direccions de les ones incidents.

Figura 6. Esquema d'un micròfon combinat de pressió i gradient amb una única membrana



Font: Eargle (2012).

Cal fer notar que hi ha una obertura lateral que permet un camí pel qual l'ona acústica podrà entrar i incidir a la part posterior del diafragma. D'aquesta manera:







- El gradient de pressió net a la membrana serà la combinació del retard extern (aquell produït per l'angle d'incidència) i del retard intern del micròfon. Aquest darrer retard s'ajusta per aconseguir màxim gradient en la direcció axial (0°).
- Per a la direcció perpendicular de 90°, el retard extern és 0 i els dos senyals arriben en fase a la membrana, de tal forma que únicament aplica el retard intern del micròfon, oferint una resposta considerablement menor que en la direcció axial.
- Per la seva part, l'ona incident a 180° pateix el retard extern i intern, igual en magnitud però contrari en signe, resultant-ne un gradient net nul.

En micròfons d'aquest tipus, l'expressió de l'equació polar es pot expressar en funció de les variables A i B :

$$R(\theta) = A + B\cos\theta \quad (7)$$

a on A depèn del retard temporal de l'ona posterior i B és determinada pel volum de la cavitat, la resistència acústica i la distància entre el diafragma i l'orifici posterior. Es compleix que $A + B = 1$ i la relació entre A i B per als diferents tipus de micròfons es mostra a la taula 2 (veure fila «Polar Equation»).

Taula 2. Característiques dels micròfons cardioïdes

Characteristic	Pressure component	Gradient component	Subcardioid	Cardioid	Supercardioid	Hypercardioid
Polar response pattern						
Polar equation	1	$\cos \theta$	$0.7 + 0.3 \cos \theta$	$0.5 + 0.5 \cos \theta$	$0.37 + 0.63 \cos \theta$	$0.25 + 0.75 \cos \theta$
Pickup arc 3 dB down	360°	90°	180°	131°	115°	105°
Pickup arc 6 dB down	360°	120°	264°	180°	156°	141°
Relative output at 90° (dB)	0	$-\infty$	-3	-6	-8.6	-12
Relative output at 180° (dB)	0	0	-8	$-\infty$	-11.7	-6
Angle at which output = zero	-	90°	-	180°	126°	110°
Directivity index (DI)	0 dB	4.8 dB	2.5 dB	4.8 dB	5.7 dB	6 dB

Font: John Eargle (2012).

Els diagrames de radiació també es poden proporcionar en gràfiques 3D, tal i com es mostra a la figura 7.

Figura 7. Diagrames de radiació en 3D de micròfons combinats de pressió i gradient: patró cardioïde (esquerra) i patró supercardioïde (dreta)



Font: <http://blog.shure.com/helical-and-145-other-audio-terms-you-may-need-to-know/>.

Hi ha micròfons en que, fent ús de diferents tecnologies, és possible escollir el diagrama de radiació, ja sigui a partir de més d'una membrana i una sèrie de commutadors per seleccionar el patró de directivitat, o en base a encapsulats complexos. El micròfon AKG C414 de la figura 8, àmpliament utilitzat en

enginyeria d'àudio, presenta quatre diagrames de radiació que es poden seleccionar a partir d'un commutador. En funció de les necessitats i d'allò que es desitgi enregistrar o reproduir, s'escull un o altre diagrama de directivitat.

Figura 8. Micròfon amb diagrama de radiació variable



Font: <http://www.ake.com/pro/p/c414xls>.

1.2.3. Micròfons en funció de la transducció mecànica-elèctrica (TME)

Si bé la directivitat del micròfon ve donada pel tipus de TAM, la resta de propietats les determina la TME. Hi ha diferents estratègies a l'hora de transformar l'energia mecànica en energia elèctrica.

Els **micròfons de carbó** van experimentar un important desenvolupament a mitjans del segle XX per cobrir les necessitats de telefonia, a saber: ample de banda limitat (entre 100 Hz i 4,5 kHz) i una alta sensibilitat (-40 dB referits a V/ μ bar). Aquests micròfons, però, presenten una pobra fidelitat i un elevat soroll de fons.

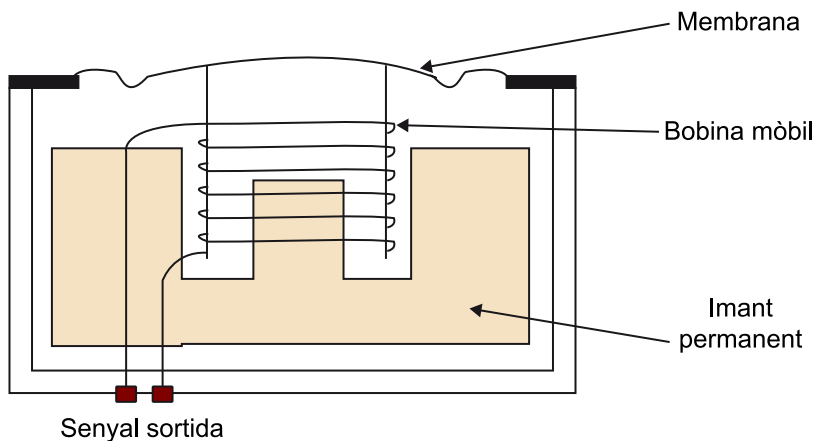
A dia d'avui, els micròfons més utilitzats són els **micròfons dinàmics** i els **micròfons electrostàtics**. Els primers basen el seu funcionament en un transductor dinàmic que genera un camp magnètic proporcional al camp acústic, mentre que els segons (anomenats també **micròfons de condensador**) tenen

un condensador pla amb una placa fixa i l'altra mòbil, presentant una capacitat inversament proporcional al desplaçament de la membrana. A continuació, es descriuen els micròfons més utilitzats avui en dia, amb relació a la TME.

1) Micròfons dinàmics

De **micròfons dinàmics**, que també es poden denominar **micròfons electrodinàmics**, se'n poden trobar **de bobina mòbil** o **de cinta**. El seu funcionament es basa en els principis de l'electromagnetisme.

Figura 9. Esquema d'un micròfon dinàmic de bobina mòbil



Tal i com mostra la figura 9, el transductor dinàmic, consistent en un conductor elèctric bobinat unit a una membrana o a una cinta plana, experimenta un desplaçament causat per les ones acústiques. Aquest desplaçament del conductor elèctric, en presència d'una estructura imantada, genera una diferència de potencial proporcional al desplaçament de la membrana. Aquest voltatge resultant és proporcional a la intensitat del camp magnètic, la velocitat de moviment i la longitud del conductor elèctric:

$$e(t) = B \cdot l \cdot u(t) \quad (8)$$

essent $e(t)$ el voltatge instantani, expressat en V; B la densitat de flux magnètic, expressada en tesles (T); l la longitud del conductor, expressada en metres (m); i $u(t)$ la velocitat instantània del conductor, expressada en metres per segon (m/s), que, atès que el conductor està unit al diafragma, coincideix amb la d'aquest.

Atès que el flux del camp magnètic i la longitud del cablejat de les espines són constants, el voltatge de sortida és directament proporcional a la velocitat instantània del conductor. La unió entre el diafragma i la bobina és un sistema mecànic, de tal forma que apareix una freqüència de ressonància que cal corregir a partir de diferents estratègies que queden fora de l'abast dels continguts d'aquest mòdul.

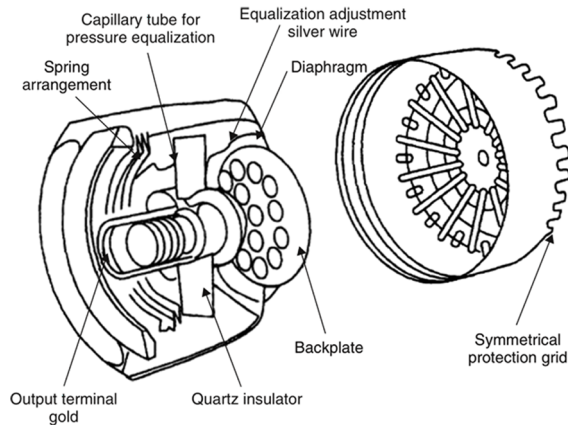
D'una banda, per a **micròfons dinàmics de bobina mòbil**, trobem valors típics de longitud del cable al voltant de 10 m, radis de la bobina mòbil de 15 mm i radis del diafragma de 8 a 15 mm. Els micròfons de bobina mòbil acostumen a ser cilíndrics amb el diafragma situat a la vora de la reixa de protecció i disposen d'un material en base a escumes per compensar la freqüència de ressonància del sistema mecànic (200-500 Hz). La seva sensibilitat ve limitada generalment per la superfície del diafragma i el flux magnètic de l'imant, i es troba entre 1,5 i 2,5 mV/Pa. Tenen una **resposta freqüencial ampla**, de 50 Hz a 15 kHz, una **sensibilitat correcta** i un **soroll de fons baix**. Són micròfons àmpliament utilitzats als àmbits de radiodifusió i estudis de gravació, i **no requereixen d'alimentació externa**.

D'altra banda, el **micròfon dinàmic de cinta** consisteix en un conductor pla suspès en un camp magnètic transversal, en el qual, a diferència del micròfon de bobina mòbil, l'element conductor i el diafragma són un únic element: la cinta. Atès que la massa que configura el transductor acústic-mecànic és molt baixa, **la qualitat d'aquest transductor és comparable a la d'un micròfon electrostàtic**. Tot i així, presenta elevades exigències en el seu disseny. És un tipus de micròfon que s'utilitza en gravacions vocals, pianos i altres instruments musicals, o reproduccions tonals molt complexes.

2) Micròfons electrostàtics

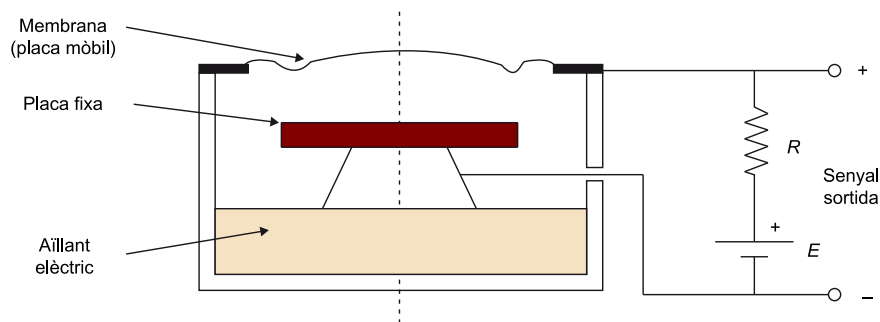
En els **micròfons electrostàtics**, o **micròfons de condensador**, la transducció es realitza a partir de la variació de la capacitat d'un condensador. El condensador està format per una membrana mòbil molt fina, o diafragma, que està en contacte amb l'aire i sobre la qual incideixen les ones acústiques, i per una placa fixa situada paral·lelament al diafragma. Ambdues plaques delimiten l'espai que conté el dielèctric. Les dues plaques del condensador són d'acer inoxidable i el diafragma mòbil està degudament unit al cos cilíndric del micròfon i la placa fixa sobre un aïllant elèctric, tal i com s'il·lustra a la figura 10. Per tal de protegir el diafragma de possibles cops i de la brossa, els micròfons de condensador solen portar una membrana protectora que s'enrosca al cos del micròfon.

Figura 10. Secció d'un micròfon electrostàtic (o de condensador)



Font: Crocker (2007).

Figura 11. Esquema d'un micròfon electrostàtic (o de condensador)



En incidir ones acústiques sobre el diafragma, aquest es mou i varia la capacitat del condensador, que modifica la capacitat d'equilibri que li aporta la tensió de polarització. Als terminals del micròfon apareixen diferències de tensió que formen el senyal elèctric. Per tal que el condensador pugui respondre a les variacions de pressió sobre el diafragma, cal aplicar una tensió de polarització que en general és de 150 a 200 V.

Bàsicament, la resposta freqüencial del micròfon està limitada a altes freqüències per la ressonància mecànica que formen el diafragma i el dielèctric, mentre que a baixes freqüències ho està per la perforació de *venting* necessària per equilibrar les pressions interiors i exteriors a la càpsula del micròfon. La ressonància a alta freqüència es tracta amb forats practicats a la placa fixa del condensador, mentre que les limitacions a baixa freqüència es tracten amb diferents estratègies de *venting*.

D'una banda, els **avantatges principals** dels micròfons de condensador són els següents:

- Sensibilitat elevada (de 25 a 50 mV/Pa).
- Comportament adequat en condicions ambientals adverses.
- Resposta en freqüència plana en un rang freqüencial de 20 Hz a 20 kHz.
- Rang lineal amb toleràncies baixes.
- La sensibilitat es modifica a partir de la tensió de polarització.

Mentre que, d'altra banda, els **inconvenients principals** d'aquest tipus de micròfon es llisten a continuació:

- Necessitat de polarització.
- Complexitat dels circuits associats.
- Molt sensible a canvis de temperatura, sobretot per temperatures i humitats properes al punt de rosada.

Es pot comprovar que la sensibilitat (S) d'aquest tipus de micròfons és directament proporcional a la tensió de polarització (E_0) i al radi del diafragma (r), i inversament proporcional a la distància entre les dues plaques del condensador (d) i a la tensió mecànica del diafragma (T):

$$S = \frac{E_0 r^2}{8Td} \quad (9)$$

Per a aquest tipus de micròfons, la freqüència màxima (f_H) ve donada per l'expressió següent:

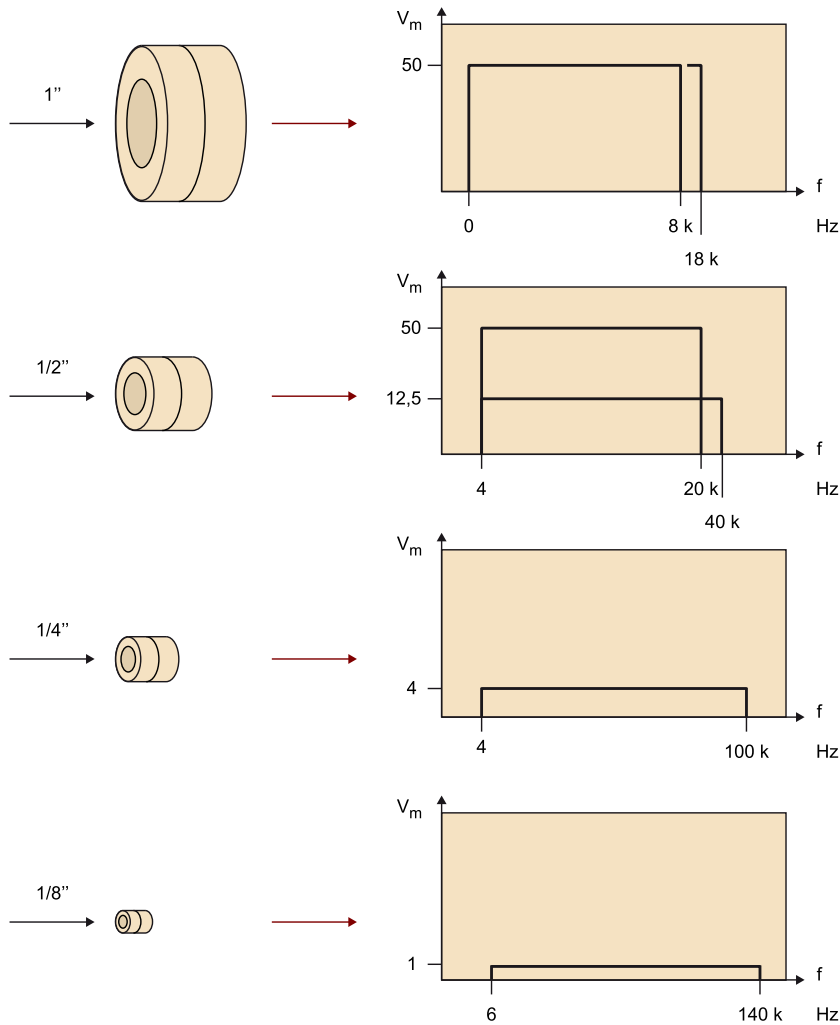
$$f_H = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \quad (10)$$

essent σ la densitat superficial del diafragma, mentre que la freqüència mínima ve determinada pel preamplificador del micròfon.

Així doncs, en funció del diàmetre del micròfon s'obtenen diferents sensibilitats i respostes en freqüència. D'acord amb l'expressió (10), per dissenyar un **micròfon electrostàtic amb un alt rang freqüencial**, cal una **membrana poc densa** i un **radi petit**. Tot i així, segons l'expressió (9), per disposar d'un **micròfon electrostàtic sensible**, convé **incrementar el radi del diafragma**.

A la figura 12 es mostra la resposta freqüencial de quatre famílies diferents de micròfons de mesura d'una casa comercial. S'observa que, a major dimensió del diafragma, major sensibilitat, però alhora menor rang freqüencial.

Figura 12. Resposta freqüencial en funció de la dimensió del diafragma



A la pràctica i en general, **micròfons electrostàtics de 13 mm de diàmetre (o de 1/2")**, ofereixen un **bon compromís entre sensibilitat i resposta en freqüència** i són àmpliament usats en equips sonomètrics. De fet, el micròfon de condensador és el micròfon d'excel·lència per a instrumentació i processos de calibratge, i és àmpliament utilitzat en mesures acústiques, normatives, estàndards i legislacions.

3) Micròfons electret

Si bé els micròfons de condensador requereixen d'una polarització externa, els micròfons electret, que també són electrostàtics, ja tenen una de les dues cares del condensador prepolaritzades, de tal forma que no necessiten d'una font de tensió externa.

Els micròfons d'aquesta mena s'implementen, bàsicament, a partir de dues estratègies que donen a lloc a dos tipus de micròfons: **micròfons de condensador prepolaritzats electret** i **micròfons electret**. En el primer tipus de micròfon, es deposita una capa fina de material electret sobre la placa fixa del condensador i la resta del procés de construcció és com el típic dels micròfons

de condensador. En el segon tipus de disseny, l'electret es presenta en forma d'un film que conté un polímer que s'estira sobre un material aïllant enfront de la placa fixa. En general, **els micròfons electret són més senzills que els micròfons de condensador prepolaritzats electret.**

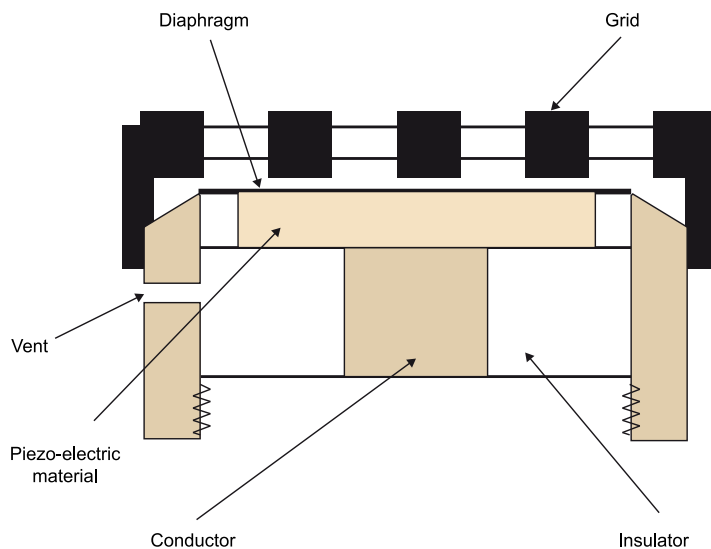
La tensió del diafragma dels micròfons electret no és la mateixa que en els micròfons de condensador, de tal forma que **la seva resposta en freqüència no serà tan plana en alta freqüència.** A més a més, la menor estabilitat d'aquesta tensió implica que, per exposicions a altes temperatures o períodes llargs a la intempèrie, es modifiqui notablement la seva resposta. Els micròfons electret s'utilitzen habitualment en aplicacions multimèdia o per fer micròfons de so-lapa.

Respecte els micròfons de condensador que sí requereixen polarització, cal destacar **l'avantatge de no haver de polaritzar-lo i l'estalvi que això suposa en electrònica,** així com **la major robustesa davant canvis d'humitat.** Contràriament, però, presenten una **menor estabilitat al llarg del temps.**

4) Micròfons piezoelèctrics

Els **micròfons piezoelèctrics, o micròfons ceràmics,** tenen el diafragma unit mecànicament a un material ceràmic amb propietats piezoelèctriques. Tal i com s'il·lustra a la figura 13, en moure's el diafragma del micròfon, l'element ceràmic es deforma i apareix una diferència de potencial als bornes del micròfon. L'efecte és reversible i els elements també poden ser emprats com a alta-veus d'alta freqüència.

Figura 13. Esquema d'un micròfon piezoelèctric



Font: Bies i Hansen (2009).

Normalment, per als micròfons piezoelèctrics es necessiten diafragmes més gruixuts que els emprats en micròfons de condensador i, per tant, **el rang freqüencial on la resposta freqüencial és plana es redueix.** D'altra banda,

aquests micròfons presenten un **menor soroll de fons, baix cost i elevada robustesa**, tot i que poden presentar **resposta a vibracions** amb més facilitat que els seus competidors.

5) Micròfon MEMS

Els **micròfons MEMS** (*micro electrical mechanical system*) són micròfons molt fins, de l'ordre d'unitats de mil·límetre, amb el diafragma acabat amb una simple peça de silicó que permet la confecció de sensors molt petits i una **producció en massa a baix cost**.

1.3. Micròfons de mesura

Un **micròfon de mesura** és aquell que compleix les següents propietats:

- El **senyal elèctric és exacte al senyal de pressió** a la membrana del micròfon.
- Presenta una **resposta freqüencial màximament plana en un ampli rang freqüencial**.
- La presència del micròfon al camp **no modifica en cap cas la magnitud a mesurar** (l'efecte de la difracció i de les reflexions ha de ser menyspreable o capaç de ser mesurat per poder ser equalitzat).
- La **relació entre la pressió sonora al micròfon i el nivell de sortida del micròfon és lineal** tant en el rang freqüencial de treball com en el marge dinàmic del micròfon.
- La seva **sensibilitat no pot variar amb les condicions ambientals**: temperatura, humitat, pressió estàtica i velocitat del vent.
- Ha de ser **robust a les interferències electromagnètiques**.
- Presenta un **diagrama de directivitat màximament omnidireccional**, de tal forma que no predomina una direcció de mesura clarament identificable (cal no confondre aquesta propietat amb el fet que hi ha micròfons especialment dissenyats per treballar en camp lliure o en camp difús).

Els micròfons de mesura són àmpliament utilitzats per a mesuraments acústics, ja sigui en sonòmetres o altres analitzadors multicanal de propòsit diferent. En general, **els micròfons de mesura acostumen a ser micròfons de condensador que van units a un preamplificador**. El preamplificador con-

verteix l'alta impedància de sortida del transductor a una baixa impedància. La figura 14 mostra un micròfon de condensador d'una marca comercial, el corresponent preamplificador i el conjunt assembletat.

Figura 14. a) Micròfon de mesura, b) preamplificador i c) conjunt assembletat



Font: a) <http://www.gras.dk/products/measurement-microphone-cartridge.html>; b) <http://www.gras.dk/products/preamplifiers-for-microphone-cartridge.html>; c) <http://www.gras.dk/products/measurement-microphone-sets.html>.

Els micròfons de mesura es poden classificar en funció del mecanisme que utilitzen per traduir les variacions de les ones de pressió acústica a senyal elèctric. La classificació més habitual distingeix entre:

- Micròfons de condensador.
- Micròfons prepolaritzats.
- Micròfons ceràmics o piezoelèctrics.

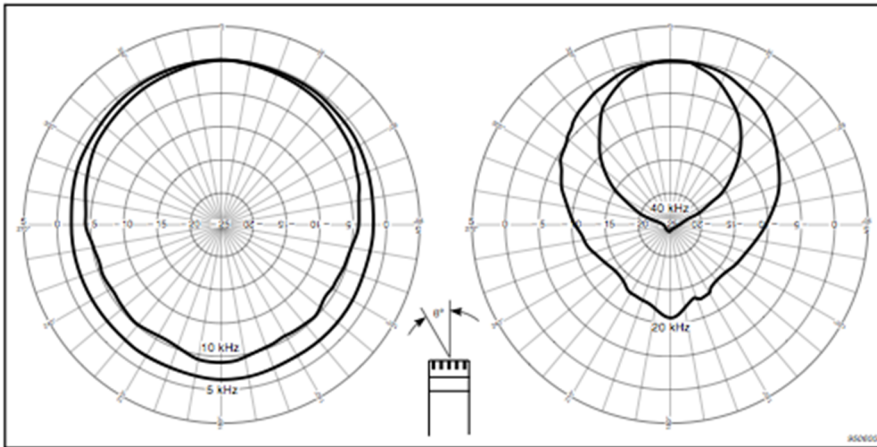
Cal tenir en compte que el fet de col·locar un micròfon a un camp afecta notòriament el camp a mesurar i, com més gran sigui el transductor, major serà l'afectació.

A continuació, es dona compte de les característiques fonamentals i els elements típics propis dels micròfons de mesura.

1.3.1. Directivitat dels micròfons de mesura

Els micròfons cilíndrics com els de la figura 14 tenen un patró de directivitat simètric respecte a l'eix del cilindre i que varia amb l'angle d'incidència. La figura 15 mostra el diagrama polar per a diferents rangs freqüencials d'un micròfon de mesura. S'observa com, a mesura que la freqüència augmenta, l'omnidireccionalitat del micròfon va disminuint.

Figura 15. Diagrames polars d'un micròfon de mesura



1.3.2. Micròfons de camp lliure i micròfons de camp difús

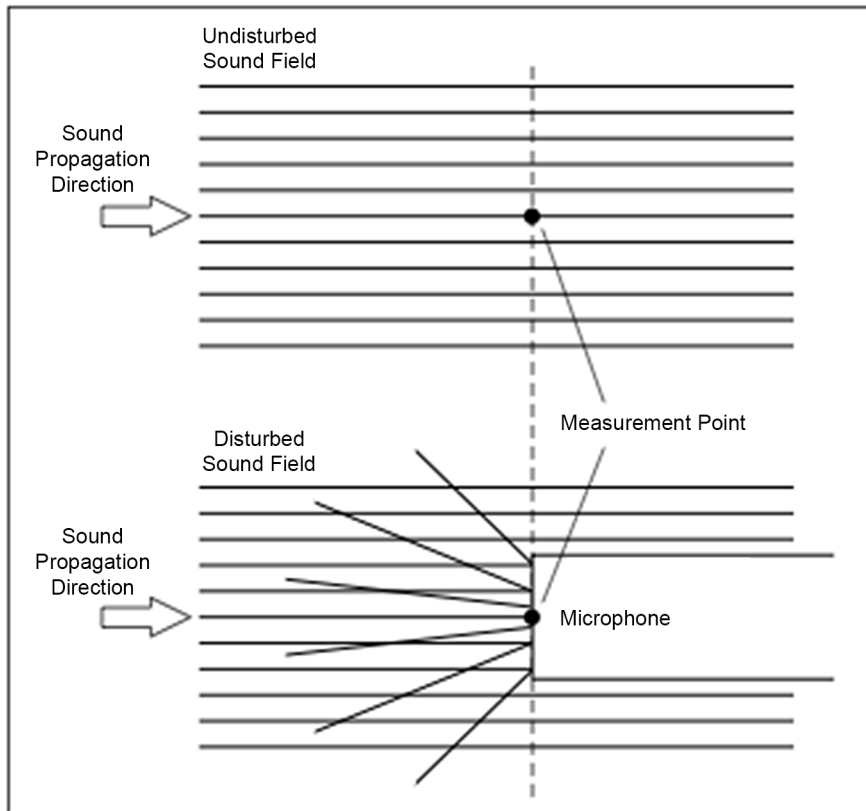
Independentment del diagrama de directivitat del micròfon, els micròfons de mesura es poden dissenyar per realitzar mesures en tres tipus de camps: camp lliure, camp difús i camp de pressió.

En un **camp lliure**, l'ona arriba al micròfon primordialment en una direcció, sense haver-hi reflexions amb altres superfícies ni interferències. Aquest tipus de camp es dona idealment en entorns anecoics i és força predominant en mesures ambientals a l'exterior. Un **micròfon de camp lliure** és aquell que **presenta una resposta màximament plana per a les ones sonores que li arriben en la direcció de màxima sensibilitat (0°), o direcció axial.**

D'altra banda, en un **camp difús**, les ones acústiques de diferents direccions arriben a un punt amb la mateixa probabilitat. Les sales reverberants alberguen un camp difús ideal. Un camp difús real s'acostuma a donar en naus industrials que alberguen certa maquinària, en catedrals, etc. Un **micròfon de camp difús té una resposta freqüencial màximament plana per a ones sonores que arriben aleatòriament de totes les direccions.**

En col·locar un micròfon en un camp acústic, les ones acústiques de freqüència baixa i longitud d'ona molt majors que les dimensions del micròfon es difracten, i a tall qualitatiu no es veuen afectades per la presència de l'obstacle. Les ones acústiques de longitud d'ona menor (freqüència més elevada) i comparable a les dimensions del micròfon sí que mostren afectació per la presència de l'obstacle, donant lloc a reflexions sobre la membrana (veure el dibuix inferior de la figura 16). Aquestes reflexions suposen un augment de la **pressió** a la part frontal del micròfon que, aparentment, augmentaria la sensibilitat del transductor en el rang freqüencial corresponent.

Figura 16. Influència del micròfon en un camp lliure



La presència d'un micròfon a un camp acústic en modifica la seva naturalesa, per tant, el mateix micròfon haurà de corregir aquest efecte no desitjat de tal forma que la resposta a la sortida del micròfon respongués linealment a les ones acústiques que hi ha sense la seva presència. A continuació, es descriuen els diferents tipus de correccions.

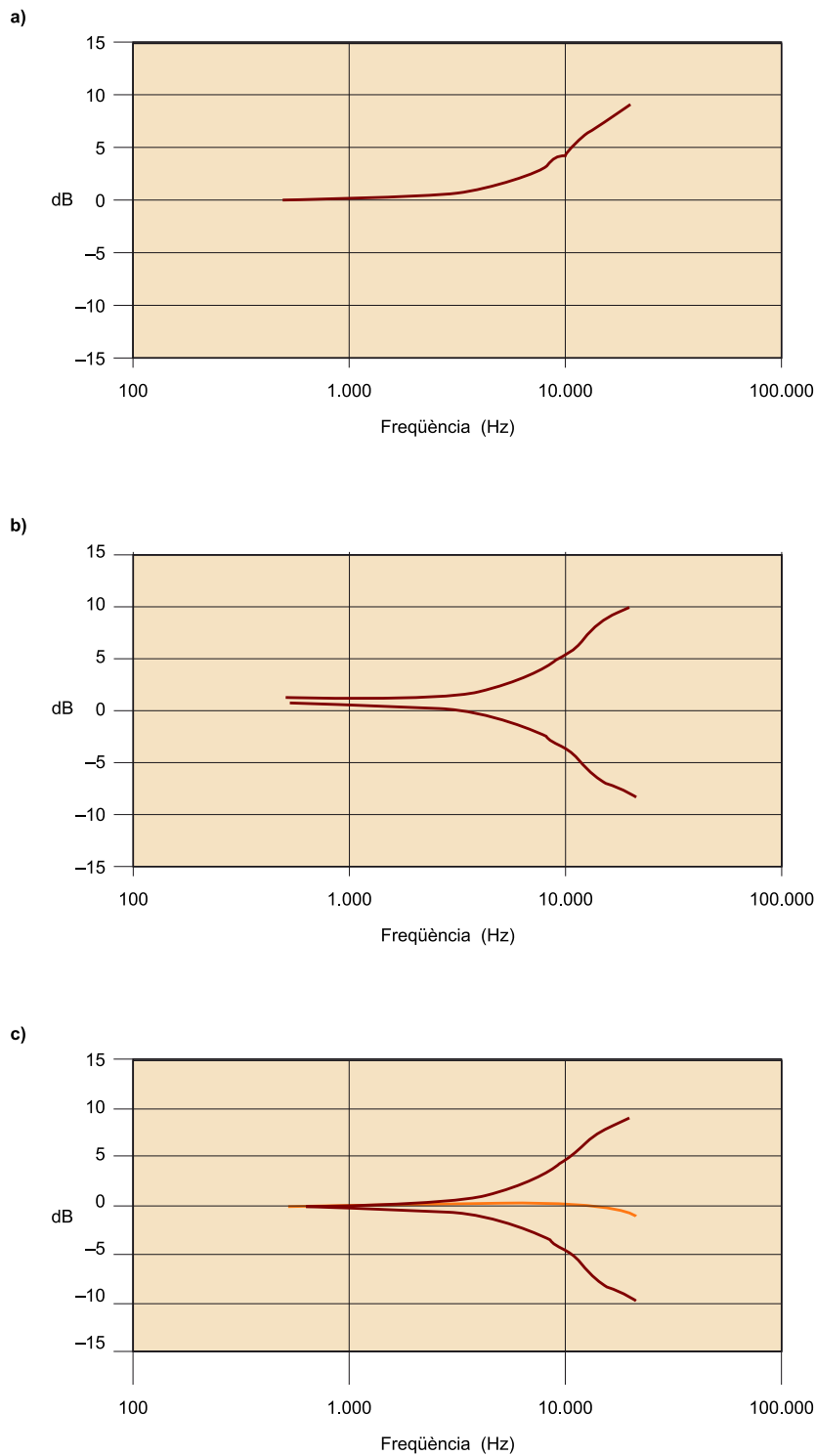
1) Correccions per a micròfons de camp lliure

En el cas d'un micròfon de camp lliure de $\frac{1}{2}$ " (dimensió usada majoritàriament en els micròfons dels sonòmetres), el màxim increment de pressió sonora a 0° es dona, aproximadament, a 26,9 kHz, freqüència en què la longitud d'ona coincideix amb el diàmetre del diafragma, tal i com es mostra a la lletra *a* de la figura 17.

Per tal de corregir aquest aparent increment de sensibilitat, cal dissenyar la càpsula del micròfon de tal forma que l'esmoreïment s'incrementi amb la freqüència per obtenir una resposta en freqüència que equalitzi l'efecte anterior, tal i com es mostra a la lletra *b* de la figura 17.

Com a resultat dels dos efectes, la resposta del micròfon és proporcional al camp acústic que hi havia en l'emplaçament abans de col·locar-hi el micròfon, tal i com es mostra a la lletra *c* de la figura 17.

Figura 17. Resposta en freqüència d'un micròfon de camp lliure: a) increment de pressió a la membrana del micròfon, b) resposta de pressió i c) resposta del micròfon de camp lliure

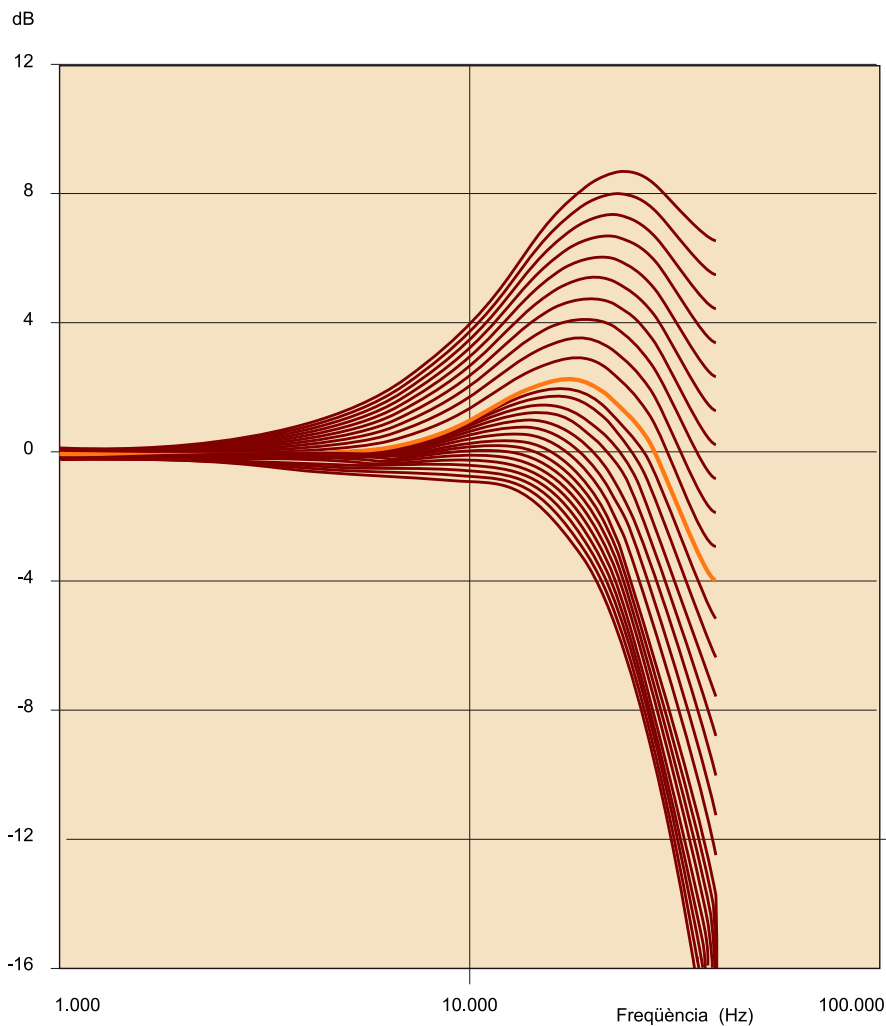


Font: Crocker (2007).

2) Correccions per a micròfons de camp difús

Per a micròfons de camp difús, les correccions hauran de ser diferents, ja que, en aquest tipus de camp, la probabilitat de rebre ones acústiques en qualsevol angle d'incidència és la mateixa. Com ja s'ha descrit, la resposta en freqüència és diferent per a cada angle d'incidència o direcció, per tant, caldrà definir una correcció mitjana que ponderi sobre totes les direccions.

Figura 18. Modificació de la pressió en col·locar un micròfon a un camp lliure en angles d'incidència de 0° a 180° en salts de 5°. La línia contínua és la correcció mitjana



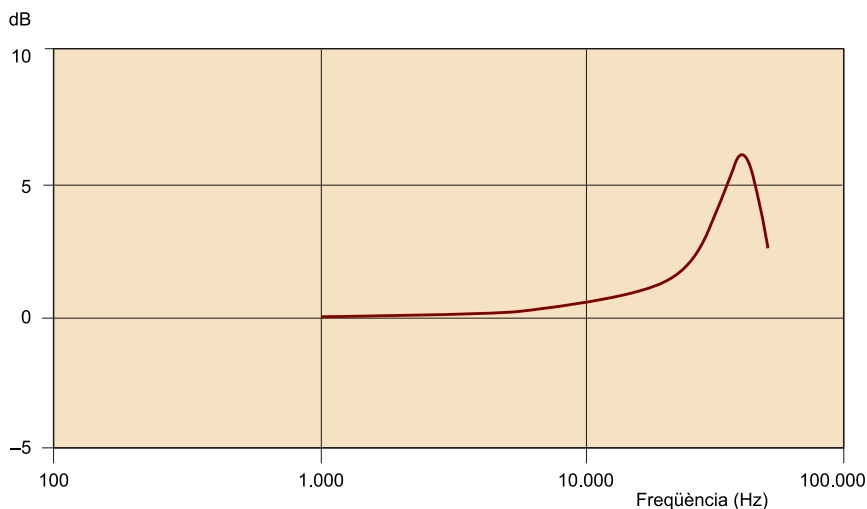
Es procedeix mesurant l'increment o decrement de pressió en situar el micròfon a un camp lliure en diferents angles d'incidència de 0° a 180° en salts de 5°, respecte del camp que hi havia originalment (corbes discontinuades de la figura 18). La norma IEC 1183 defineix el càlcul per obtenir la corba de correcció mitjana a partir de les anteriors (corba contínua de la figura 18).

A l'hora de realitzar una mesura, cal escollir el tipus de micròfon en funció del camp acústic a avaluar, però, si únicament es disposa d'un tipus de micròfon, caldrà aplicar a l'amplificador la corresponent correcció per tenir en compte els efectes descrits anteriorment.

3) Efectes del protector de membrana

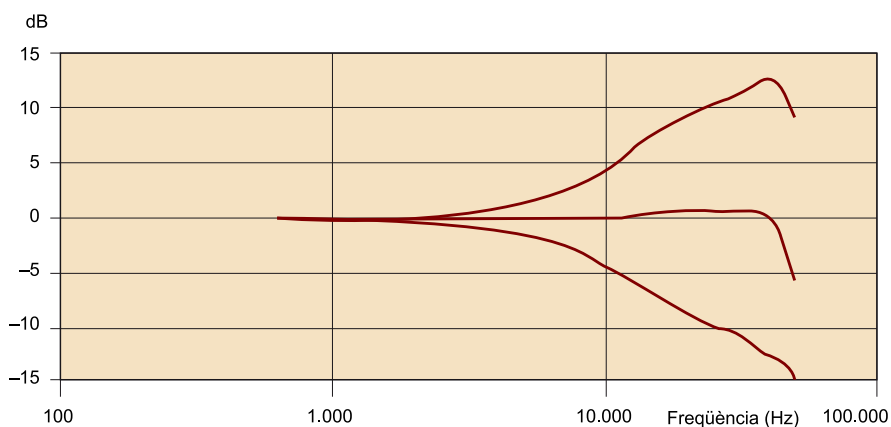
El **protector de membrana** s'utilitza per protegir la membrana del micròfon i també afecta a la resposta en freqüència del micròfon. En comportar-se com un ressonador selectiu, la seva influència a freqüències inferiors a 1 kHz és menyspreable, tal i com mostra la figura 19.

Figura 19. Efecte del protector de membrana



Atès que la immensa majoria de micròfons de mesura incorporen aquest tipus de protector, convé tenir-lo en compte a l'hora de dissenyar la resposta de pressió del micròfon. La versió dels gràfics de la figura 17 amb el protector de membrana es mostra a la figura 20.

Figura 20. Resposta en freqüència d'un micròfon de camp lliure amb protector de membrana: increment de pressió a la membrana del micròfon (corba superior), resposta de pressió (corba inferior) i resposta del micròfon de camp lliure (corba del mig)



1.3.3. Efectes ambientals i estabilitat

Les **variables ambientals** que poden afectar considerablement a la **sensibilitat** del micròfon són la **temperatura**, la **pressió estàtica** i la **humitat relativa**. En particular, elevades temperatures poden comportar modificacions importants en la sensibilitat. El coeficient de temperatura expressa les variacions de

la sensibilitat per cada °C que es modifica. Els canvis en la pressió atmosfèrica no acostumen a presentar problemes greus en les mesures acústiques, mentre que per a humitats baixes o mitjanes la influència en la sensibilitat és baixa.

Pel que fa a l'**estabilitat** dels micròfons, es tracta d'una propietat que diferencia els micròfons de mesura de la resta de micròfons. Els micròfons varien la sensibilitat al llarg dels anys, essent aquesta variació força suau en micròfons de mesura i més elevada per a altres tipus de micròfons. Pel que fa als canvis irreparables o irreversibles, la tensió del diafragma del micròfon es rebaixa al llarg del temps i en funció de la temperatura, essent de l'ordre d'1 dB per cada 1000 anys per a micròfons d'interiors, i podent prendre molta importància per a temperatures elevades. La cura que es tingui del transductor també determinarà la seva durabilitat: evitar cops, no tocar el diafragma en treure el protector de membrana, etc. Per a períodes relativament curts, el micròfon no variarà significativament la seva sensibilitat si es troba en interiors, podent presentar variacions de l'ordre de 10^{-2} dB.

1.3.4. Pantalla protectora antivent

En mesures exteriors, si hi ha presència de vent, cal protegir el micròfon amb un element dedicat. El flux d'aire en passar a través del protector de membrana provoca soroll a baixa freqüència. S'acostuma a utilitzar una **pantalla antivent**, o *windscreen*, com la mostrada a la figura 21. Les pantalles antivent acostumen a tenir forma esfèrica i són de materials porosos, i també protegeixen el micròfon de la brossa i de danys mecànics (per exemple, cops). La influència sobre la resposta en freqüència i els patrons de directivitat del micròfon ha de ser especificada pel fabricant.

Figura 22. Sonòmetre amb pantalla antivent

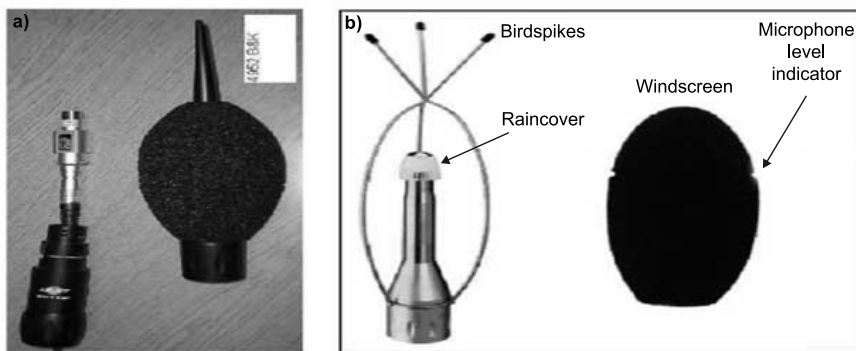


La reducció del soroll induït al micròfon és de l'ordre d'un factor 20 per a vents fluixos de 20 a 40 km/h (l'escenari més habitual en mesures ambientals), mentre que per a velocitats del vent elevades, aquesta reducció ja és molt difícil d'aconseguir.

1.3.5. Accessoris per a equips exteriors

Els micròfons que han d'estar permanentment instal·lats en exteriors necessiten protectors especials de pluja i de protecció pels ocells. A la figura 22 es mostren els accessoris necessaris per a un micròfon de mesura de la casa Brüel & Kjær.

Figura 22. Accessoris per micròfon d'exteriors: a) micròfon d'exteriors i b) accessoris .



Font: <https://www.bksv.com/media/doc/bp1696.pdf>.

1.3.6. Preamplificador

Els micròfons de mesura van units a un **preamplificador** que converteix l'alta impedància de sortida del transductor en una baixa impedància, necessària per poder transmetre el senyal fins a l'analitzador a través del cablejat corresponent.

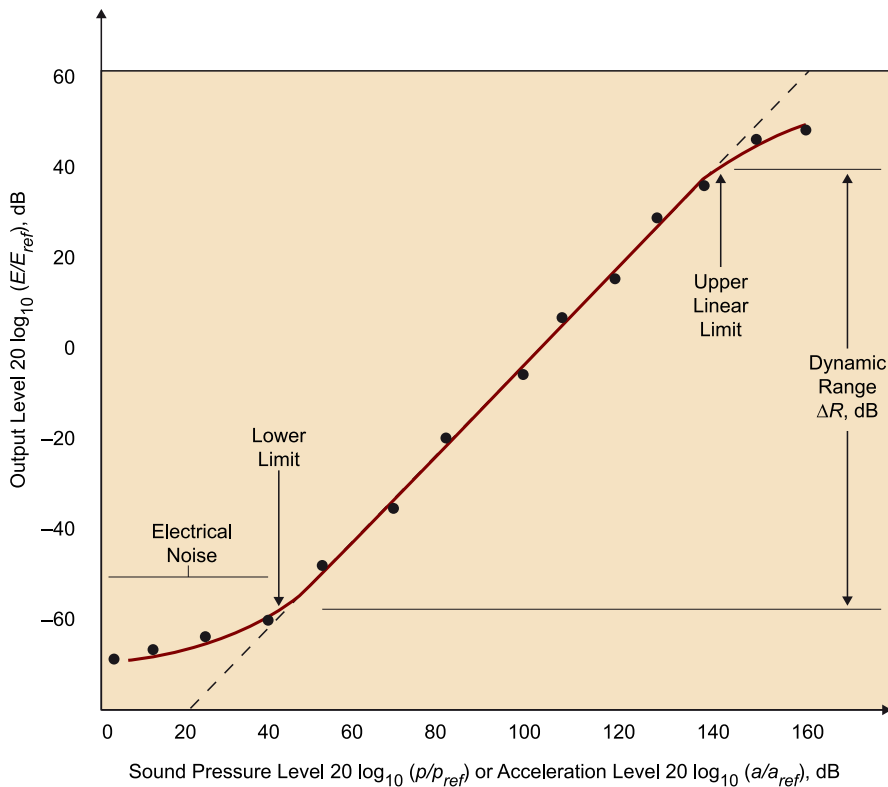
Els preamplificadors presenten tot un conjunt de propietats: resposta en freqüència, rang dinàmic, resposta de la fase, efectes de la temperatura i camps magnètics i immunitat electromagnètica. Els preamplificadors s'han d'alimentar amb una tensió que varia en funció dels models i acostuma a ser de l'orde de desenes de volts. Els connectors més habituals dels preamplificadors són BNC o Lemo.

Hi ha micròfons que incorporen la tecnologia ICP[®] i la gran majoria de micròfons de mesura van equipats amb la tecnologia TEDS (*capable of digital memory and communication*) segons la norma IEEE 1451.4, que permet que l'analitzador detecti automàticament el model i les propietats del micròfon.

1.3.7. Marge dinàmic

El **marge dinàmic** d'un micròfon ve donat pel soroll inherent al micròfon i el valor màxim al que pot respondre el micròfon, que depèn del desplaçament del diafragma i que s'acostuma a donar com el valor on la distorsió harmònica supera el 3%. La majoria de micròfons tenen un marge dinàmic de 100 a 120 dB, tal i com il·lustra l'exemple mostrat a la figura 23.

Figura 23. Marge dinàmic d'un micròfon



Font: Crocker (2007).

El soroll inherent al micròfon ve donat pel moviment del diafragma i, en anar sempre combinat un micròfon amb el corresponent preamplificador, es considera aquest paràmetre també conjuntament. És funció del diàmetre del diafragma, essent major per a micròfons petits i menor per a micròfons grans. Valors típics de soroll inherent es troben entre 10 i 40 dB per a micròfons de 1" i de 1/8", respectivament. És al senyal d'entrada que se li sumen aquests valors, podent arribar a ser un paràmetre crític per a mesures de molt baix nivell.

2. Altaveus

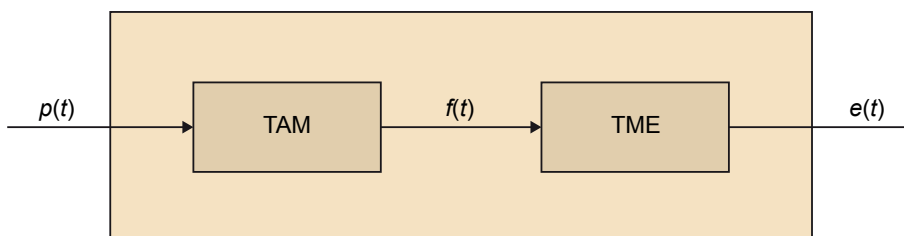
Un altaveu és un transductor electroacústic que tradueix senyals elèctriques en acústiques per ser audibles en l'aire.

La majoria d'altaveus són electrodinàmics de bobina mòbil, amb el mateix principi de funcionament que els micròfons electrodinàmics, però a la inversa.

Per a freqüències baixes, es diu que els altaveus són de radiació directa, és a dir, que radien directament a l'aire; mentre que, per a freqüències mitges i altes, s'acostumen a utilitzar sistemes amb adaptacions d'impedància per millorar-ne l'eficiència. En efecte, els rendiments dels sistemes directes són baixos, entre 1% i 3%, ja que el desacoblament de les impedàncies entre l'altaveu i el medi és elevat. Tot i així, a baixes freqüències s'aconsegueixen diagrames de radiació omnidireccionals, fet que pot ser interessant per a aplicacions domèstiques. D'altra banda, per a sonoritzacions professionals, pot ser més convenient utilitzar altaveus més directius i alhora més eficients. Les botzines acústiques precisament permeten aquesta funcionalitat, presentant unes eficiències d'entre el 5% i el 50%.

Anàlogament a un micròfon, un altaveu està format per dos transductors (figura 24): el transductor electromecànic (TEM), que converteix les variacions de la intensitat elèctrica ($e(t)$) en moviment d'un element ($f(t)$), i el transductor mecànic-acústic (TMA), format per un diafragma unit a l'element mòbil del transductor electromecànic que produeix variacions de pressió sonora a l'aire ($p(t)$).

Figura 24. L'altaveu com a transductor: transducció elèctrica-mecànica (TEM) i transducció mecànica-acústica (TMA)



Al subapartat següent es proporciona una breu descripció de les propietats generals dels altaveus. I, una vegada introduïdes aquestes principals propietats, en els subapartats posteriors s'expliquen les diferents tipologies d'altaveus: els **altaveus dinàmics** i els **altaveus plans**. Cal tenir present que, a part d'aquestes dues tecnologies, hi ha altres tipus d'altaveus, com ara els **altaveus piezoelèctrics** o els **altaveus d'efecte corona**, que estan àmpliament descrits a les

referències bibliogràfiques proporcionades al final del mòdul. Finalment, als últims subapartats de la secció també s'estudien les botzines i les caixes acústiques.

2.1. Propietats generals dels altaveus

En aquest subapartat es planteja una classificació general dels diferents tipus d'altaveus segons la banda de freqüències en la qual treballin i es proporciona una breu descripció de les principals propietats que caracteritzen el comportament dels altaveus, a saber: la impedància elèctrica, el rendiment, la sensibilitat i la potència elèctrica.

2.1.1. Classificació dels altaveus

En funció de la banda freqüencial de treball de l'altaveu, hi ha tres tipus d'altaveus: *woofer*, *midrange* i *tweeter*.

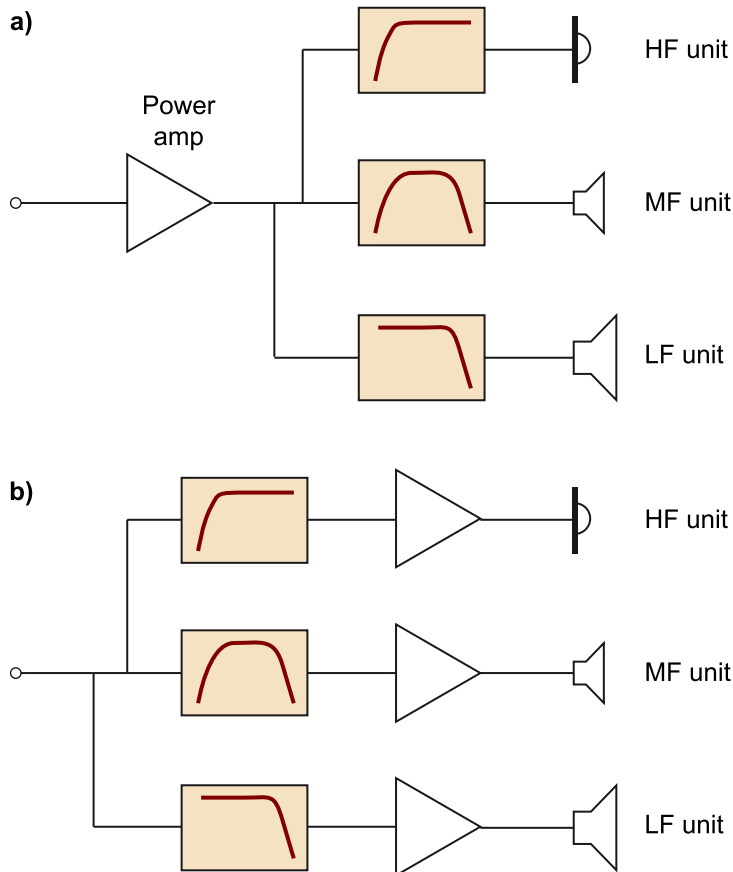
Els **woofers** són els altaveus de majors dimensions, ja que reproduïxen el rang freqüencial inferior (20-500 Hz). De diafragmes entre 6" i 18", sovint es presenten en forma de **subwoofer** (20-100 Hz) i *woofer* (100-500 Hz).

Els **midrange** tenen un diafragma inferior, d'entre 4" i 6", i reproduïxen la banda de 500 Hz a 3 kHz. Han de tenir una resposta temporal excel·lent, ja que aquesta banda freqüencial alberga la informació de la majoria de missatges. Acostumen a anar muntats en un caixa acústica, de tal forma que no s'hi produeixen els fenòmens d'interferència amb la radiació posterior dels *woofers*.

Finalment, els **tweeters** són els altaveus d'alta freqüència, que arriben fins als 20 kHz, amb diafragmes d'entre 1" i 5", i muntats en caixa tancada.

Per a caixes acústiques amb més d'un altaveu convé disposar de **filtres crossover** que dirigeixin el senyal adequadament per a cada altaveu. Tal i com s'il·lustra a la figura 25, hi ha xarxes de *crossover* passives i actives.

Figura 25. a) Crossover passiu i b) crossover actiu



2.1.2. Impedància elèctrica

La impedància elèctrica dels altaveus és un paràmetre que depèn fortament de la freqüència i es defineix com la impedància als bornes de l'altaveu enfront un senyal sinusoidal. Indica el grau d'acoblament entre altaveu i amplificador i presenta un màxim a la freqüència de ressonància mecànica de l'altaveu.

2.1.3. Rendiment

El rendiment de l'altaveu és la relació entre la potència acústica radiada i la potència elèctrica a la qual s'alimenta. Com ja se n'ha fet esment, el rendiment dels altaveus dinàmics és molt menor al de les botzines. Si el rendiment d'un altaveu és de l'1%, significa que, quan se li entreguen 50 W elèctrics, únicament proporciona 0,5 W acústics. Tot i aquests pobres rendiments, cal tenir en compte que, per aconseguir un nivell de 95 dB en un punt d'escolta determinat, faria falta una potència acústica únicament de 0,15 W. Per a un altaveu amb un rendiment de l'1%, es necessitarien 15 W elèctrics, valors prou raonables.

2.1.4. Sensibilitat

La sensibilitat de l'altaveu es defineix com el nivell de pressió sonora a 1 m de distància, en sala anecoica, que genera un altaveu en la direcció axial quan se li entrega 1 W elèctric. La sensibilitat és un paràmetre complementari a l'hora de valorar el rendiment d'un altaveu.

2.1.5. Potència elèctrica

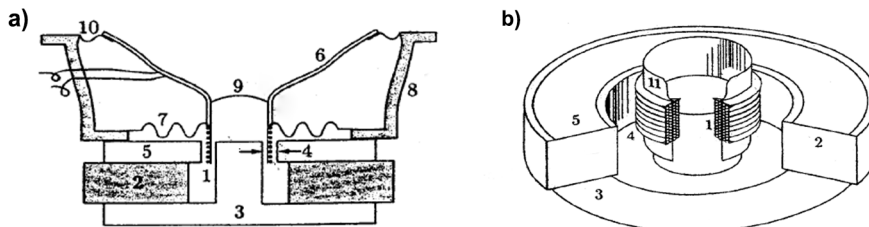
La potència elèctrica d'un altaveu indica el valor màxim amb què es pot alimentar l'altaveu sense que es faci malbé. S'acostuma a donar en termes de potència nominal o RMS. Sovint els fabricants també proporcionen el *peak music power output* (PMPO), referit a valors instantanis màxims de potència.

La relació entre la potència entregada a un altaveu i la seva sensibilitat, o rendiment, dona una idea del valor de pressió sonora que hi pot haver en un punt d'escolta i resulta d'ajut per al disseny dels espais electroacústics.

2.2. Altaveu dinàmic de bobina mòbil

L'altaveu dinàmic de bobina mòbil és el transductor electroacústic més fet servir i més estès en multitud d'aplicacions, podent-se'n trobar per a la majoria de rangs freqüencials i marges dinàmics adaptats a les diferents aplicacions.

Figura 26. Seccions d'un altaveu dinàmic de bobina mòbil . 1: bobina mòbil, 2: imant, 3: culata, 4: entreferro, 5: peça polar, 6: diafragma, 7: aranya, 8: carcassa, 9: tapa de protecció, 10: anell elàstic, 11: cilindre



Font: Pueo Ortega i Romá Romero (2003).

Aquest tipus d'altaveu està format per un diafragma que radia soroll cap a l'aire, la part central del qual té una tapa de protecció per evitar que l'entreferro s'embruti. El diafragma està sostingut per un anell elàstic perimetral que l'uneix a la carcassa i una aranya que el subjecta a la part central, tal i com es pot observar a la figura 26. Aquests elements tenen la funció de preservar al diafragma de les ondulacions que no li siguin perpendiculars. La bobina mòbil està formada per un conjunt d'espines enroscades sobre un cilindre rígid unit i solidari al diafragma. Sobre la bobina s'aplica la tensió elèctrica, que, a causa del camp magnètic generat per l'imant, produeix el moviment del cilindre en l'espai denominat entreferro, i aquest al diafragma. L'imant és permanent i construït amb una estructura anular, i la peça polar té la funció de dirigir el camp magnètic a través de l'entreferro.

Els diafragmes acostumen tenir forma cònica, ja que presenten una major rigidesa que els diafragmes plans. Tot i així, les propietats geomètriques del con tenen l'inconvenient de generar direccions de radiació diferents a les definides per una font puntual omnidireccional.

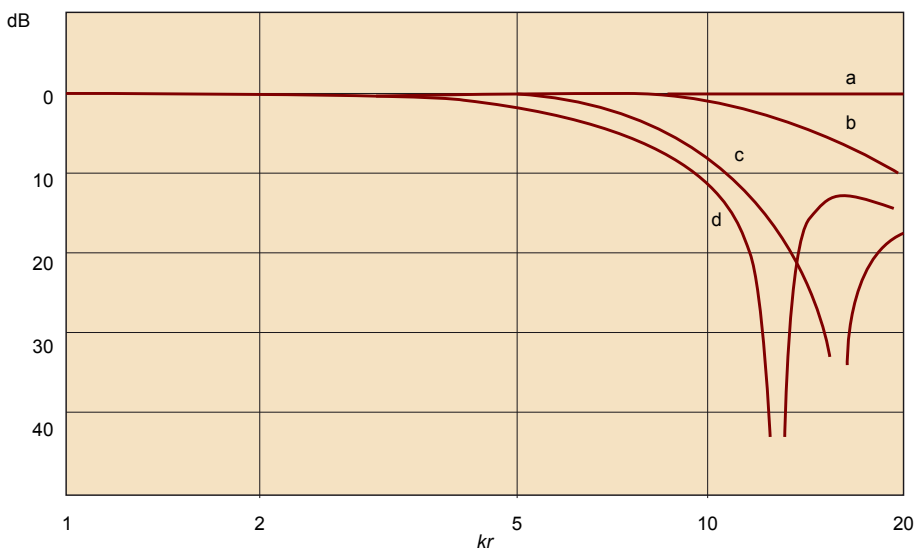
Els diafragmes en forma de cúpula, força habituals en *tweeters* per reduir les propietats directives de l'alta freqüència, presenten **modes de ruptura**, o pèrdues de fase, a les freqüències que compleixen l'expressió:

$$f = (2n - 1) \frac{c}{2h} \quad (11)$$

essent h l'alçada de la cúpula, i c la velocitat del so en l'aire.

La figura 27 mostra la resposta en freqüència d'un diafragma de cúpula, o dome, de radi r de diferents alçades.

Figura 27. Resposta axial d'una cúpula rígida de radi r : **a)** $h = 0$ (diafragma pla), **b)** $h = r/4$, **c)** $h = r/2$ i **d)** $h = r$ (semiesfera)



Font: Borwick (2012).

Es pot observar que, a mesura que el diafragma es va corbant, i d'acord amb l'expressió (11), apareixen més pèrdues o modes de ruptura. Tot i així, aquests modes no acostumen a afectar, ja que els diafragmes són petits ($r = 10$ mm) i no s'acostuma a arribar a valors superiors a $kr = 5$.

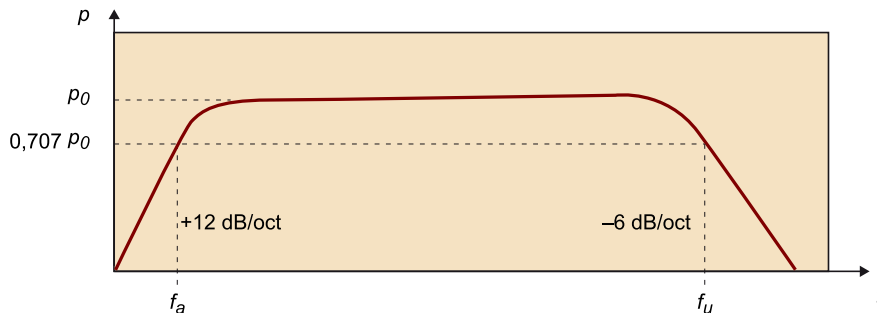
En l'obtenció de la resposta freqüencial d'un altaveu electrodinàmic, així com en tot el seu estudi en profunditat, cal aplicar les analogies electroacústiques i considerar el seu circuit equivalent. Aquest estudi queda fora de l'abast dels continguts d'aquest mòdul, però està estudiat amb profunditat a les referències bibliogràfiques proporcionades al final del mòdul.

Una conclusió important de l'estudi a partir del circuit equivalent és que **la resposta de l'altaveu està limitada a un cert rang freqüencial:**

- Per a baixes freqüències, la rigidesa de la suspensió limita el desplaçament del diafragma i, conseqüentment, la potència acústica radiada.
- Pel que fa les altes freqüències, la massa de l'element mòbil impedeix que es mogui amb certes acceleracions i també en limita la radiació sonora.

En aquest sentit, es poden definir dues freqüències de tall (f_s i f_u), en funció dels elements que configuren l'altaveu electrodinàmic:

Figura 28. Resposta freqüencial d'un altaveu electrodinàmic de bobina mòbil



2.3. Altaveus plans

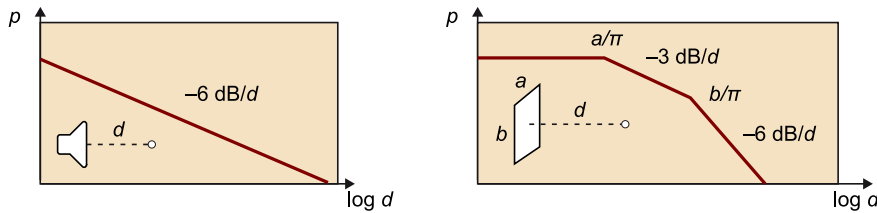
Els altaveus electrodinàmics presenten problemes de distorsió, a causa de la seva estructura mecànica complexa. Alhora, aquest tipus d'altaveus, com més endavant es veurà, poden anar ensamblats en caixes acústiques, les quals generen una sèrie de coloracions determinades.

Per tal d'evitar aquests inconvenients, hi ha un seguit de tecnologies que utilitzen altaveus que radien directament a l'aire, lliurement, constituint els anomenats **altaveus plans**. Es tracta d'altaveus on els transductors ocupen una superfície important, amb poca massa i un moviment uniforme al llarg de tota la massa en ser excitats.

A l'hora d'estudiar la divergència geomètrica (en camp lliure) dels altaveus plans, cal recordar que un front d'ona pla està caracteritzat per una divergència geomètrica nul·la en un rang proper a la font de soroll, passant a decaure 3 dB en doblar la distància quan ens situem a una certa distància de la seva dimensió menor (propagació cilíndrica) i 6 dB estant ja prou allunyats també de la dimensió major (propagació esfèrica).

La figura 29 il·lustra la diferència entre les divergències d'un altaveu pla i d'un altaveu puntual, tot mostrant la idoneïtat d'utilitzar els altaveus plans per aconseguir uniformitats del camp acústic per a distàncies importants o per millorar la intel·ligibilitat de la paraula. Cal tenir present, però, que aquest tipus d'altaveus presenten problemes de directivitat, amb uns angles de feix massa estrets per a altes freqüències.

Figura 29. Divergència geomètrica d'un altaveu puntual (esquerra) i d'un altaveu pla (dreta)



Hi ha varies tecnologies a l'hora de dissenyar altaveus plans:

- Funcionament a base d'un condensador (altaveus electrostàtics).
- Funcionament a base de modes propis d'una placa (altaveus DML).
- Fent servir una cinta corrugada mòbil (altaveus de cinta).

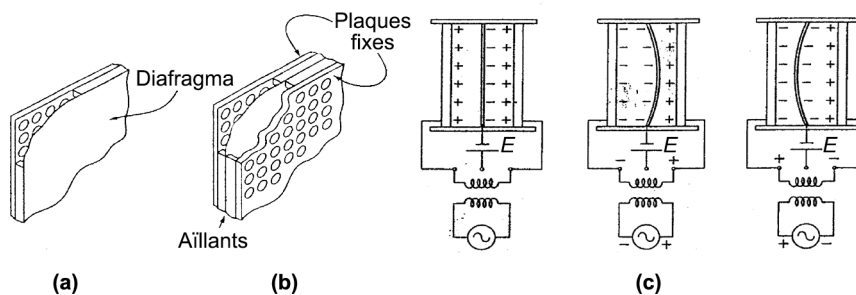
A continuació, passarem a estudiar els altaveus electrostàtics (subapartat 2.3.1) i els altaveus DML (subapartat 2.3.2).

2.3.1. Altaveus electrostàtics

Els **altaveus electrostàtics** (ESL; *electrostatic loudspeakers*) es basen en la vibració d'una placa conductora en presència d'un camp elèctric. Es tracta d'un condensador pla de grans dimensions amb una armadura on s'hi aplica una diferència de potencial proporcional al senyal reproduït.

De forma genèrica es podria dir que hi ha dos tipus d'ESL: els que tenen una **única placa** i els que tenen **dues plaques** (*push and pull*), més habituals. En aquest últim cas, les dues plaques fixes, **elèctrodes**, se situen equidistants del diafragma, on hi realitzen forces d'amplitud igual però amb signe diferent.

Figura 30. a) ESL de placa única, b) ESL de dues plaques i c) funcionament d'un altaveu electrostàtic



A la figura 30 es poden observar aquests dos tipus d'ESL, així com una il·lustració del moviment de la membrana a l'hora d'excitar els elèctrodes amb diferent polaritat. Els elèctrodes són metàl·lics i estan perforats per tal d'evitar les ressonàncies, minimitzar les reflexions i procurar que l'ona es pugui propagar.

A causa dels problemes amb la directivitat, els ESL s'acostumen a dissenyar amb dues o tres vies. Aquest tipus d'altaveus **radien poca energia a baixes freqüències** i tenen l'inconvenient que **necessiten amplificadors capacitius**. Tot i les limitacions anteriors, els ESL **no presenten coloracions ni cancel·lacions a la membrana**, la qual **vibra en fase**, presenta una **correcta resposta a transitoris** i una **resposta freqüencial molt plana**.

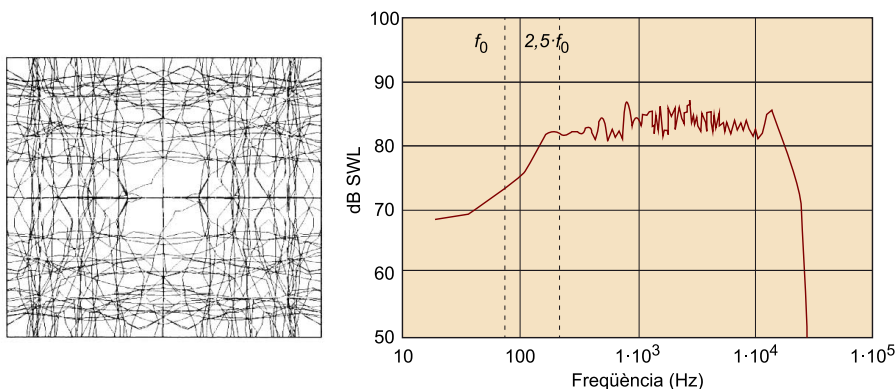
2.3.2. Altaveus DML

Els **altaveus DML** (*distributed mode loudspeaker*), o **altaveus de modes distribuïts**, són un altre tipus d'altaveu pla. El seu funcionament es basa, contràriament als altaveus electrostàtics, en buscar els modes de vibració d'una placa prima sotmesa a una vibració fent ús de transductors dinàmics acoblats a la membrana, a qui li comuniquen la vibració.

La clau és la generació de modes propis espaiats uniformement en freqüència per tal de reproduir un espectre el més continu possible. Per aconseguir una densitat modal adequada (paràmetre anàleg a l'estudiat en acústica de recintes), convé exercir amb les dimensions de la membrana i el material utilitzat.

La ubicació de l'excitador haurà de ser tal que exciti tots els modes de vibració. A la figura 31 es poden observar les línies modals corresponents als primers 30 modes de la membrana, aquelles on es dona un desplaçament mínim i on no convé acoblar l'excitador. La mateixa figura mostra la resposta en freqüència, on f_0 indica el primer mode de vibració, essent $2,5 f_0$ la freqüència mínima a considerar pel que fa la radiació útil.

Figura 31. Mapa modal dels primers 30 modes d'un altaveu DML (superior) i resposta en freqüència d'un altaveu DML (inferior)

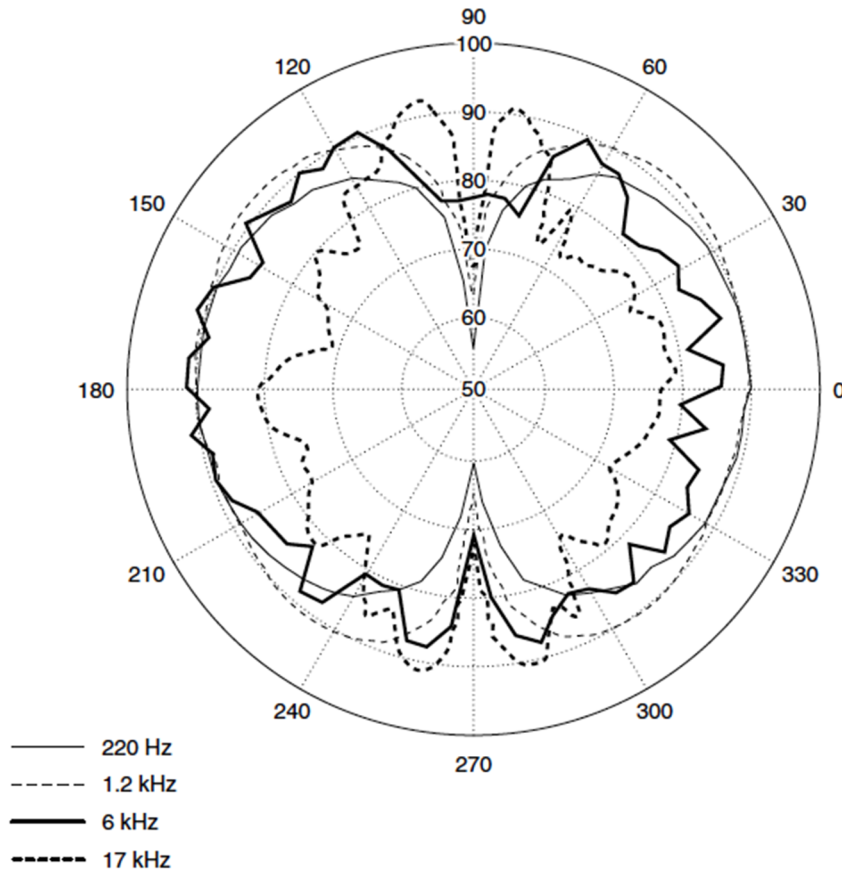


Font: Borwick (2012).

La radiació dels altaveus DML es produeix a causa d'una vibració aleatòria sobre tota la membrana, de tal forma que la velocitat del diafragma es distribueix també aleatòriament amb relació a la fase i l'amplitud. Aquesta disparitat de camins entre les diferents parts del diafragma i el punt d'escolta es manté i, d'aquesta manera, s'evita la creació de lòbuls secundaris, tan característica d'un diagrama tipus pistó. Així doncs, un dels avantatges d'aquest tipus d'altaveu,

és que **presenta una directivitat d'una font puntual omnidireccional, no únicament a baixes freqüències**, sinó també a mitges-altes freqüències, tal i com es mostra a la figura 32.

Figura 32. Diagrames de directivitat d'un altaveu DML



Font: Borwick (2012).

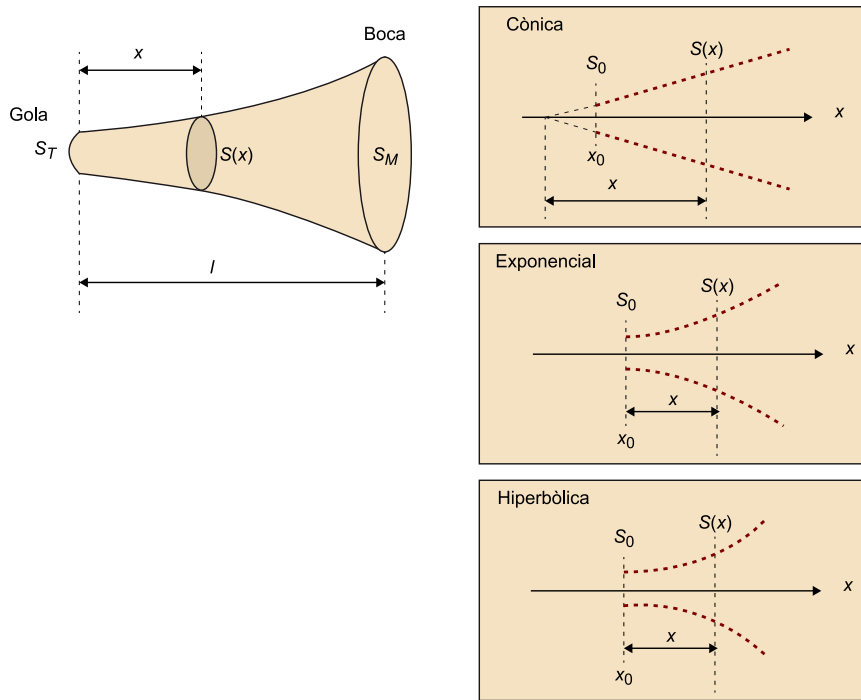
2.4. Botzines

Una **botzina** és un dispositiu electroacústic amb forma de tub, la secció del qual va augmentant des de la gola fins a la part exterior frontal de la botzina, anomenada boca. Les botzines són alimentades per la gola, a la qual s'hi acobla el nucli de compressió, format pel motor de compressió i la càmera de compressió. Històricament, les botzines van ser un dels primers mètodes electroacústics.

En comparació amb l'eficiència dels altaveus, molt baixa, al voltant d'entre un 1% i un 5%, les botzines presenten una eficiència de radiació marcadament superior, entre el 10% i el 50%. Aquesta elevada eficiència s'aconsegueix acoblant un diafragma petit (gola) a una superfície gran de radiació (boca) a través d'un tub de secció creixent. Per aquest motiu, les botzines es consideren altaveus de radiació indirecta.

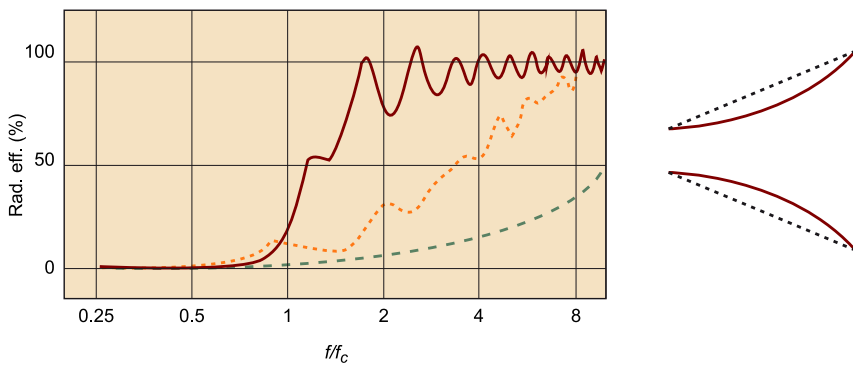
Hi ha diferents formants de botzina, tal i com es pot apreciar a la figura 33, essent la botzina exponencial la que presenta un millor compromís entre distorsió i radiació a baixes freqüències.

Figura 33. Secció d'una botzina, amb la gola i la boca (esquerra), i modelització dels diferents tipus de botzines (dreta). $S(x)$: àrea de l'obertura del tub en funció de la distància a la gola de la botzina



D'acord amb la figura 34, s'observa que l'eficiència de radiació d'una botzina exponencial és superior a la proporcionada per una botzina cònica de les mateixes dimensions, sobretot a baixes freqüències. Alhora, queda palesa la millora d'aquestes botzines respecte un pistó sobre pantalla infinita.

Figura 34. Esquerra, eficiència de radiació d'una botzina exponencial (corba contínua superior), una botzina cònica (corba discontinua intermitja) i un pistó amb baffle infinit de mides iguals a la gola de les botzines (corba discontinua inferior). Dreta, diferència entre les geometries d'una botzina exponencial (línia contínua) i la d'una botzina cònica (línia discontinua) de les mateixes dimensions



Font: Borwick (2012).

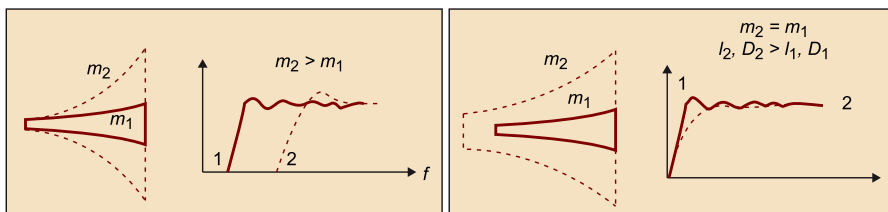
La figura 34 també il·lustra que es pot definir la freqüència de tall a partir de la qual la propagació és de tipus esfèric amb radi elevat. **Aquesta freqüència de tall determina el marge freqüencial de la botzina.** La freqüència de tall de les botzines exponencials respon a la equació següent:

$$f_c = \frac{mC}{4\pi} \quad (12)$$

essent m el ritme d'eixamplament en funció de la distància a la gola, i c la velocitat del so en l'aire.

A l'hora de dissenyar una botzina, les seves dimensions físiques determinaran l'**ample de banda de radiació**. Per una part, d'acord amb la dependència de proporcionalitat directa de la freqüència de tall amb el ritme d'eixamplament, **a major valor de m , menor ample de banda**. Es pot demostrar que, per a **majors diàmetres (D) i longituds de botzina (l), menor arrissat de la resposta en freqüència en la banda de pas**. Ambdós fenòmens són il·lustrats a la figura 35.

Figura 35. Relació entre l'eixamplament i la freqüència de tall (esquerra) i relació entre les dimensions de la botzina i l'arrissat de la banda de pas (dreta)



Font: Eargle (2012).

Pel que fa la **directivitat de la botzina**, es pot dividir en tres zones marcades per la boca, les parets i la gola:

- Per a freqüències baixes, la botzina es comporta com un pistó de mida igual a la boca.
- Per a freqüències mitges, l'ample de feix serà igual a l'obertura angular de la botzina.
- Per a altes freqüències, serà equivalent a un pistó de la mida de la gola de la botzina.

2.5. Caixes acústiques

Els altaveus de radiació directa, sense pantalla, presenten una resposta molt pobre a freqüències greus. Per a baixes freqüències, la longitud d'ona és major que el diàmetre de la membrana, de tal forma que la pressió frontal es comunica amb la radiació posterior en sentit contrari, i es produeix el **curtcircuit acústic**.

En efecte, l'ona acústica radiada per la part posterior de l'altaveu arriba a la part frontal en contrafase, de tal forma que s'anul·len mútuament. Aquest valor es dona quan:

$$T = \frac{2D}{c} \quad (13)$$

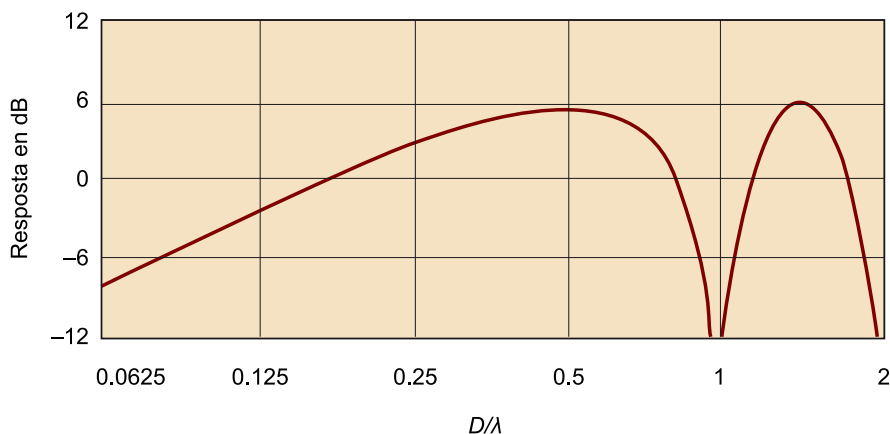
essent T el període de l'ona acústica, i D el diàmetre de l'altaveu.

L'expressió (13) es pot escriure en termes freqüencials, resultant-ne:

$$f_c = \frac{c}{2D} \quad (14)$$

Per a freqüències inferiors a f_c es dona el curtcircuit acústic, que es tradueix en una caiguda de 6 dB/octava a baixes freqüències respecte una pantalla infinita, tal i com il·lustra la figura 36, on l'efecte d'interferències destructives no es dona.

Figura 36. Resposta freqüencial d'un dipol



Font: Borwick (2012).

Una solució a aquest deteriorament de la resposta de l'altaveu seria instal·lar-hi una **pantalla finita** o una **caixa oberta**, de tal forma que la freqüència de curtcircuit pugui disminuir, ja que la distància que ha de recórrer l'ona posterior seria major (figura 37). En ambdós casos es pot demostrar fàcilment que també caldria utilitzar grans pantalles o caixes per aconseguir rangs freqüencials acceptables (figura 38).

Figura 37. a) Curtcircuit en un altaveu sense pantalla i b) amb una pantalla finita

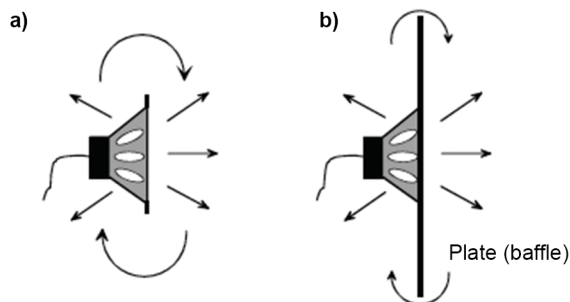
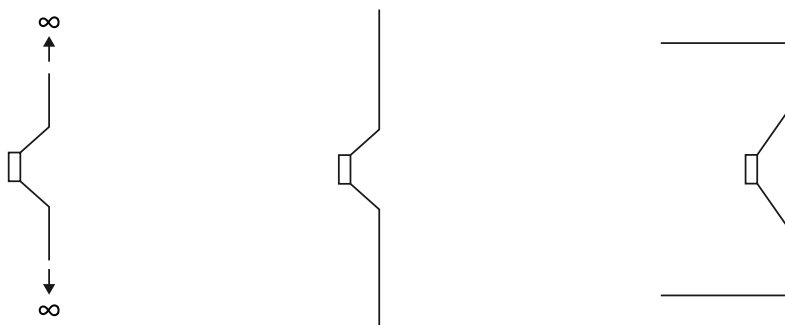


Figura 38. Pantalla infinita (esquerra), pantalla finita (centre) i caixa oberta (dreta)



La solució més senzilla és utilitzar una **caixa tancada** hermèticament, de tal forma que la radiació frontal es tradueix en pressió i la radiació posterior es dissipa a l'interior de la caixa, anul·lant, per tant, l'efecte de curtcircuit. En aquest cas, apareixen els modes propis de la caixa, que produiran un cert efecte de colorament no desitjat. La solució més senzilla és la utilització de caixes que responguin a la regla d'or, per obtenir una densitat modal suficientment distribuïda al llarg de l'espectre. Omplir la caixa amb material absorbent ajudarà a reduir l'amplitud dels modes propis.

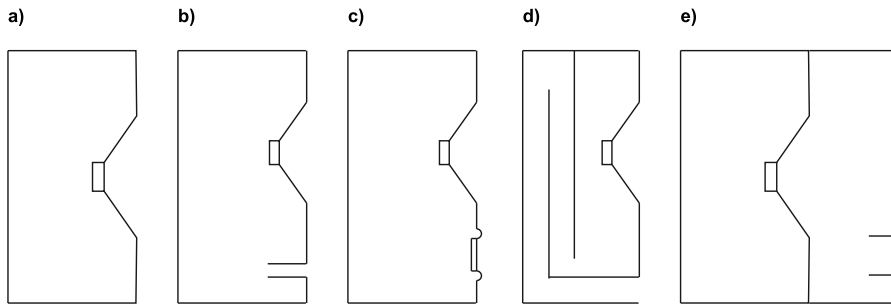
El fet d'inserir material absorbent també ajuda a mantenir les propietats dels suspensors elàstics dels altaveus. La massa de l'aire que està confinada dins la caixa, actua com un element de rigidesa que, actuant en paral·lel a la rigidesa del diafragma, pot fer incrementar la freqüència de ressonància del sistema, fet que en cap cas no interessa. Per tal de conservar una freqüència de ressonància prou baixa, caldria reduir la rigidesa de l'aire, és a dir, augmentar el volum de la caixa.

Tal i com s'il·lustra a la figura 39, hi ha força estratègies per aconseguir incrementar la resposta a baixes freqüències:

- Les **caixes obertes** (*vented-box*), presenten una obertura que ressona a freqüències inferiors a la freqüència de ressonància de l'altaveu.
- Aquesta cavitat de la *vented-box* la pot ocupar un altaveu sense bobina mòbil, configurant la denominada **caixa de radiador passiu**.

- Una altra alternativa és la **línia de transmissió**, on la part posterior de l'altaveu comunica amb un laberint que desemboca a una obertura.
- També podem trobar els **sistemes passa-banda**, en els quals hi ha dues cambres i un altaveu situat entre elles.

Figura 39. a) Altaveu en caixa tancada, b) caixa oberta, o vented-box, c) caixa de radiador passiu, d) línia de transmissió i e) sistema passa-banda



3. Acceleròmetres

Un acceleròmetre és un transductor mecànic-elèctric que produeix en les seves terminals de sortida un voltatge proporcional a l'acceleració a la qual està subjecte.

L'acceleròmetre piezoelèctric és considerat el millor transductor per realitzar mesures de vibracions. El seu elevat rang freqüencial i comportament lineal en amplis rangs dinàmics, així com la seva elevada sensibilitat, ho doten d'altres prestacions.

En aquesta secció s'estudien els diferents aspectes rellevants que permeten caracteritzar adequadament l'acceleròmetre piezoelèctric: l'efecte piezoelèctric, la seva estructura, els seus paràmetres fonamentals i el seu sistema de muntatge.

3.1. L'efecte piezoelèctric

L'efecte piezoelèctric és un fenomen característic de certs cristalls, que consisteix en l'aparició de càrregues elèctriques o d'una diferència de potencial entre les seves cares oposades per efecte d'una deformació deguda a l'aplicació d'una força mecànica o d'una vibració. **La relació entre la força aplicada i la càrrega acumulada és altament lineal en un ampli rang dinàmic i freqüencial.**

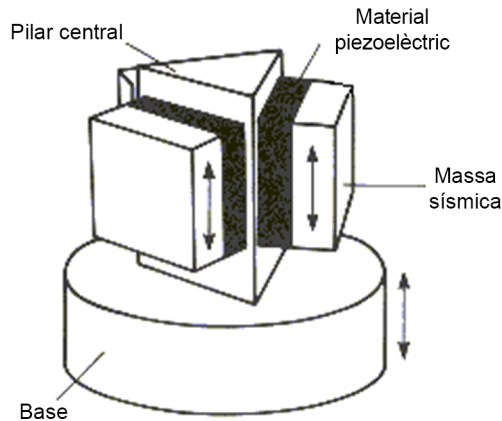
En la naturalesa, existeixen materials que presenten aquesta propietat sense necessitat de polarització externa; es denominen **materials piezoelèctrics intrínsecs** i són el **quars** i la **sal de Rochel**, entre d'altres. Així mateix, existeixen materials piezoelèctrics que han estat desenvolupats artificialment, com són els policristal·lins i els piezoceràmics. Aquests materials precisen d'una polarització externa per presentar l'efecte piezoelèctric. El procés de polarització dels materials **policristal·lins** i els **piezoceràmics** és anàleg a la imantació: mitjançant l'aplicació d'una diferència de tensió en els extrems del material, s'aconsegueix que els dipols elèctrics s'alineïn de tal manera que el material ofereixi l'efecte piezoelèctric.

L'aplicació d'una força externa implica una desviació en l'alineació dels dipols elèctrics i la consegüent acumulació de càrrega en les superfícies del piezoelèctric.

3.2. Estructura de l'acceleròmetre piezoelèctric

La figura 40 mostra una estructura típica de l'acceleròmetre piezoelèctric.

Figura 40. Estructura d'un acceleròmetre piezoelèctric



L'element actiu és el material piezoelèctric que actua com un moll entre la base de l'acceleròmetre i les masses sísmiques a través del pilar central. Les masses sísmiques són les que exerceixen la força sobre el material piezoelèctric, vibrant igual que la base de l'acceleròmetre en un rang freqüencial determinat. En vibrar l'acceleròmetre, en cada piezoelèctric actua la força següent:

$$F = m_s a_s \quad (15)$$

essent m_s la massa sísmica, i a_s l'acceleració de la massa sísmica.

L'element piezoelèctric produeix una càrrega proporcional per força aplicada. La massa sísmica és constant i, conseqüentment, els piezoelèctrics produeixen una càrrega proporcional a l'acceleració de les masses sísmiques. Com les masses sísmiques vibren amb magnitud i fase idèntiques a la base de l'acceleròmetre en un rang freqüencial elevat, la sortida de l'acceleròmetre és proporcional a l'acceleració de la base i, per tant, a l'acceleració de la superfície on l'acceleròmetre està adherit.

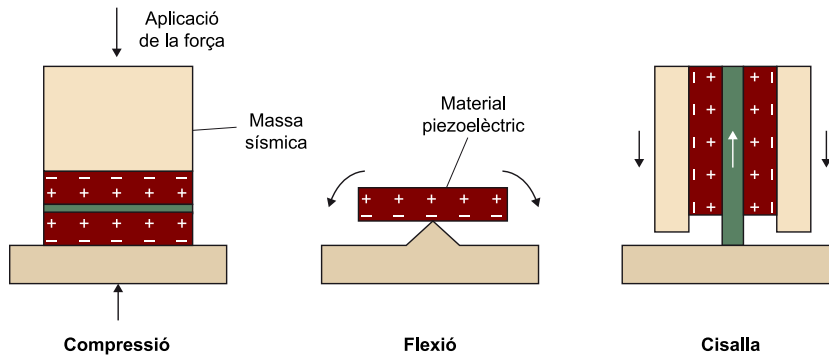
Les càrregues acumulades en els extrems de l'element actiu són recollides per uns elèctrodes. Abans de poder processar el senyal, és necessari condicionar-lo, ja sigui en el sí del acceleròmetre o en un dispositiu extern.

Al mercat, existeixen diverses configuracions d'acceleròmetres piezoelèctrics que vénen definides per la manera amb que la força inercial actua sobre el material piezoelèctric. Bàsicament, es poden classificar en tres tipus de configuracions diferents (figura 41):

- Els **acceleròmetres de compressió**, en els que la massa sísmica actua de forma normal sobre el material piezoelèctric, que es deforma comprimit-se.
- Els **acceleròmetres de flexió**, que presenten una barra piezoelèctrica que es deforma, flexionant-se, quan vibra el pedestal en què es recolza.

- Els acceleròmetres de cisalla, que s'estudien a continuació amb més detall, al subapartat 3.2.1.

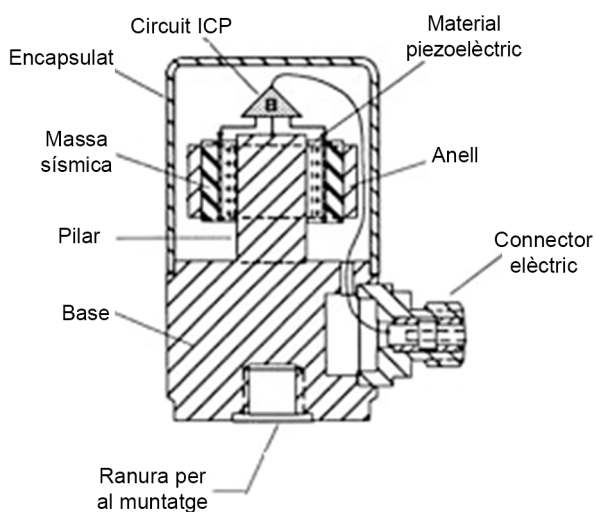
Figura 41. Configuracions estructurals d'un acceleròmetre piezoelèctric



3.2.1. Acceleròmetres piezoelèctrics de cisalla

Els acceleròmetres de cisalla presenten l'estructura que es mostra a la figura 42.

Figura 42. Esquema de l'acceleròmetre piezoelèctric de cisalla

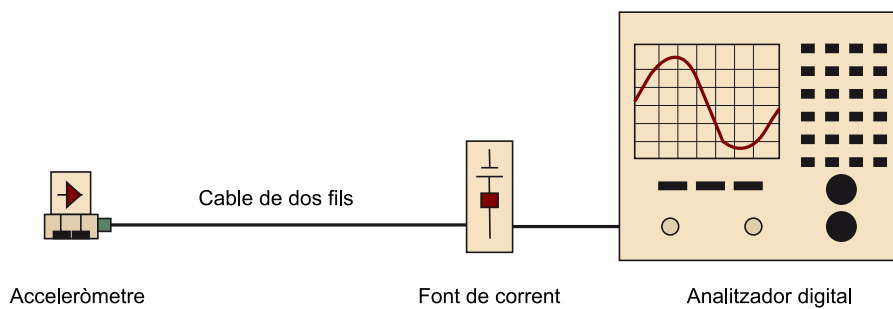


El material piezoelèctric se situa entre les masses sísmiques i un pilar central que comunica amb la base de l'acceleròmetre. L'anell extern que cobreix les masses sísmiques, així com el corresponent encapsulat, proporcionen la rigidesa necessària a l'estructura. La geometria dels acceleròmetres piezoelèctrics de cisalla ofereix una grandària i un pes mínims, amb el que la superfície de test no veurà modificada excessivament la seva massa. La combinació d'aquestes característiques fa que l'estructura de cisalla ofereixi unes prestacions i un funcionament òptims per a gran part de mesures de vibració en general.

Com s'ha esmentat amb anterioritat, és necessari un condicionament del senyal perquè aquest pugui ser enviat a instruments de processament externs. En els acceleròmetres en què aquest condicionament es realitza en el propi acceleròmetre, es denominen ICP (*integrated circuit piezoelectric*).

L'ICP adapta l'alta impedància del senyal generat pel piezoelèctric a una baixa impedància. El senyal de sortida de l'ICP ja es pot transmetre a l'exterior mitjançant un cable de dos fils o un coaxial, connectats al connector elèctric. L'electrònica integrada ICP necessita una font de corrent per al seu funcionament, de tal forma que, si l'analitzador digital no té aquesta font, es necessitarà d'una font externa (figura 43).

Figura 43. Disposició de l'acceleròmetre, la font de corrent i l'analitzador digital



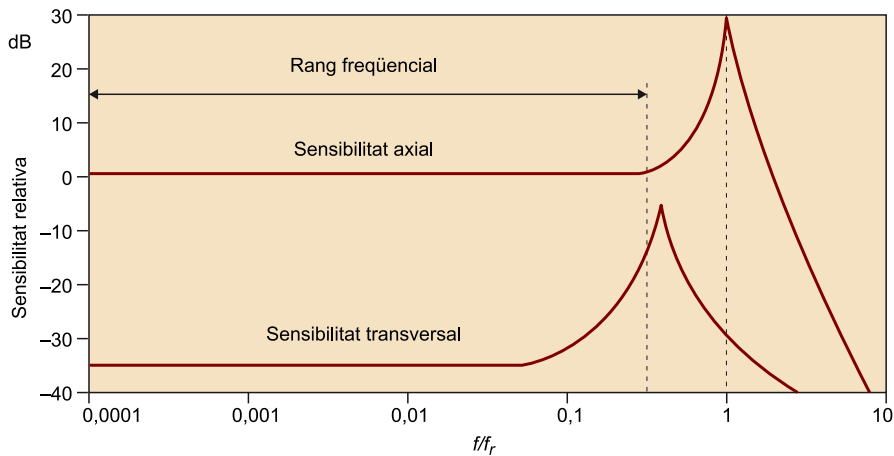
3.3. Paràmetres dels acceleròmetres

Els tres paràmetres fonamentals que caracteritzen el comportament d'un acceleròmetre són el rang freqüencial, la sensibilitat transversal, i la linealitat i el rang dinàmic.

3.3.1. Rang freqüencial

La **resposta freqüencial** típica d'un acceleròmetre piezoelèctric apareix representada a la figura 44. Està referenciada a la sensibilitat que presenta el sensor a 100 Hz, que es considerada la sensibilitat de referència.

Figura 44. Sensibilitat relativa axial i transversal (f_r és la freqüència de ressonància de l'acceleròmetre)



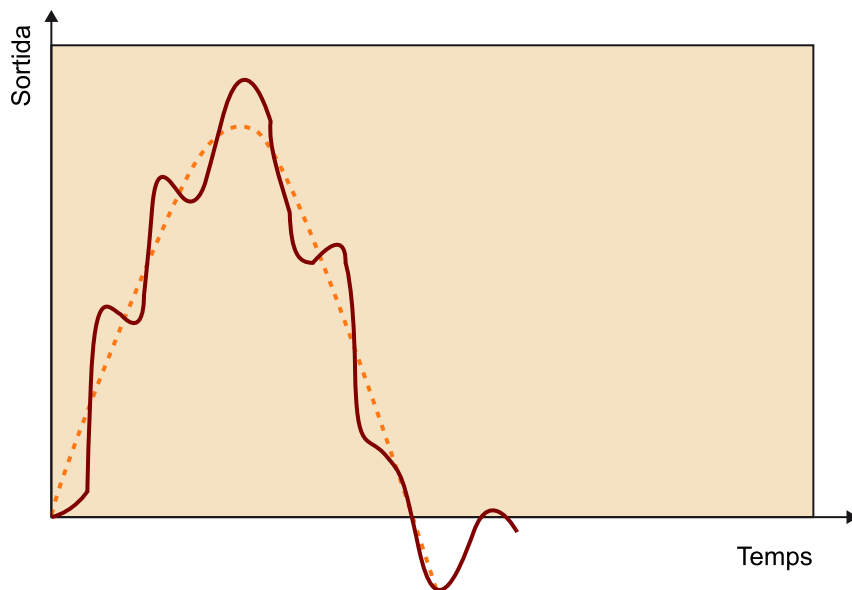
En la figura 44 apareixen representades la **sensibilitat relativa axial**, que és la sensibilitat que presenta l'acceleròmetre en el seu eix, i la **sensibilitat relativa transversal**, que és analitzada seguidament, en el subapartat 3.3.2.

1) Límit superior

La freqüència màxima d'operació es pot definir a $0,33 f_r$. A aquesta freqüència, la sensibilitat es desvia un 10% de la de referència, ja que l'acceleròmetre comença a vibrar amb l'acceleració de l'excitació i entra en ressonància.

El senyal temporal té el següent aspecte, caracteritzat pel *ringing*:

Figura 45. *Ringing*



Desenvolupant la segona equació de Newton aplicada al sistema massa sísmica-molla (m_s i k , respectivament), s'arriba a la següent expressió per a la freqüència de ressonància:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_s}} \quad (16)$$

De l'expressió (16), i tenint en compte que la rigidesa dels piezoelèctrics acostuma a ser constant, es dedueix que, **per aconseguir rangs freqüencials elevats, és necessària una massa sísmica petita. I, si es disminueix la massa sísmica, disminueix alhora la sensibilitat de l'acceleròmetre.** Per tant, existeix **un compromís entre la sensibilitat (relacionada amb el pes) i el rang freqüencial.**

Els acceleròmetres petits presenten freqüències de ressonància típiques de 180 kHz, i els més grans al voltant de 30 kHz, proporcionant un rang freqüencial de 10 kHz.

La massa dels acceleròmetres pren importància quan s'avaluen mostres lleugeres. Una massa suficientment gran pot fer variar el nivell i la freqüència de les acceleracions i, consegüentment, ocasionar mesures incorrectes. En general, si l'acceleròmetre pesa menys que la desena part del pes de la mostra a la qual està adherit, no serà necessària cap correcció de les mesures obtingudes.

2) Límit inferior

La **freqüència mínima d'operació** ve donada, bàsicament, per la constant temporal de descàrrega del transductor. El piezoelèctric no és un element perfectament elàstic, amb el que, en disminuir sobtadament la força aplicada, els dipòls elèctrics no poden tornar al seu estat d'equilibri instantàniament. Quan la força no actua, el piezoelèctric encara produeix acumulació de càrregues i la seva sortida no és nul·la.

3.3.2. Sensibilitat transversal

Quan un acceleròmetre està subjecte a acceleracions aplicades a un eix diferent al principal, també presenta una tensió en la seva sortida. **La sensibilitat transversal és aquella que es presenta en el plànol perpendicular a l'eix axial de l'acceleròmetre.** S'expressa com a percentatge de la sensibilitat axial i ha de ser molt menor que aquesta, per assegurar que l'acceleròmetre solament respongui a acceleracions paral·leles a el seu eix.

Idealment, la sensibilitat transversal és nul·la, però les irregularitats en el material piezoelèctric i en els elèctrodes ho impedeixen.

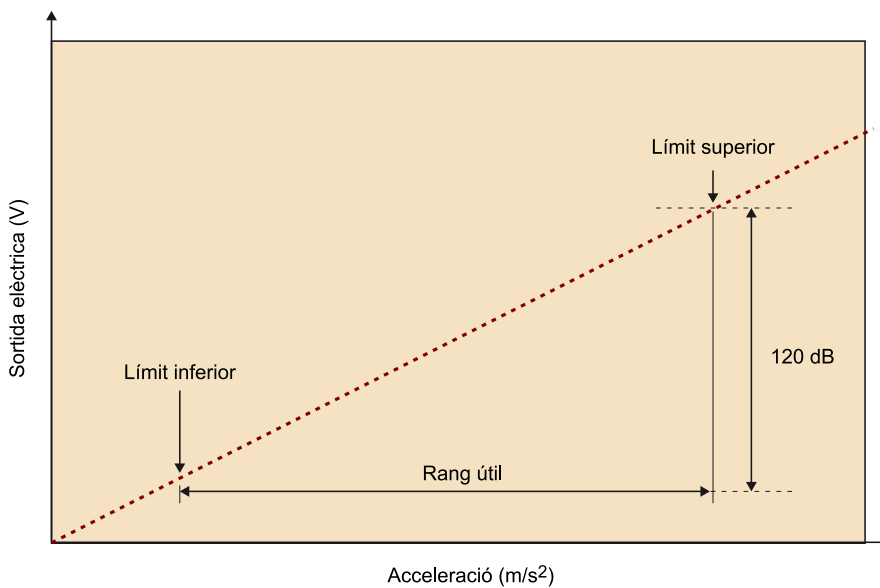
En la figura 44, s'observa com la sensibilitat transversal és molt menor que l'axial. Cal destacar que la sensibilitat transversal es desvia del valor de referència per a freqüències menors a $0,33 f_r$, arribant a valors propers als de la

sensibilitat axial. Aquest efecte no suposa problemes en les mesures efectuades, ja que el rang freqüencial dels acceleròmetres utilitzats és alt i l'interès de l'estudi resideix en freqüències molt menors que f_r .

3.3.3. Linealitat i rang dinàmic

La **linealitat** és un requisit fonamental dels sistemes de mesura. La sortida del sistema acceleròmetre-ICP-font de corrent és lineal en el **rang dinàmic** especificat pel fabricant.

Figura 46. Relació entre l'acceleració i la sortida elèctrica en l'acceleròmetre piezoelèctric



Teòricament, el comportament de l'acceleròmetre és lineal a partir de 0 m/s^2 , però el límit pràctic ve donat pel soroll inherent al propi sistema, majoritàriament introduït pels cables i els circuits. El límit superior depèn de la fermesa estructural del transductor i, en excedir aquest límit, el comportament deixa de ser lineal.

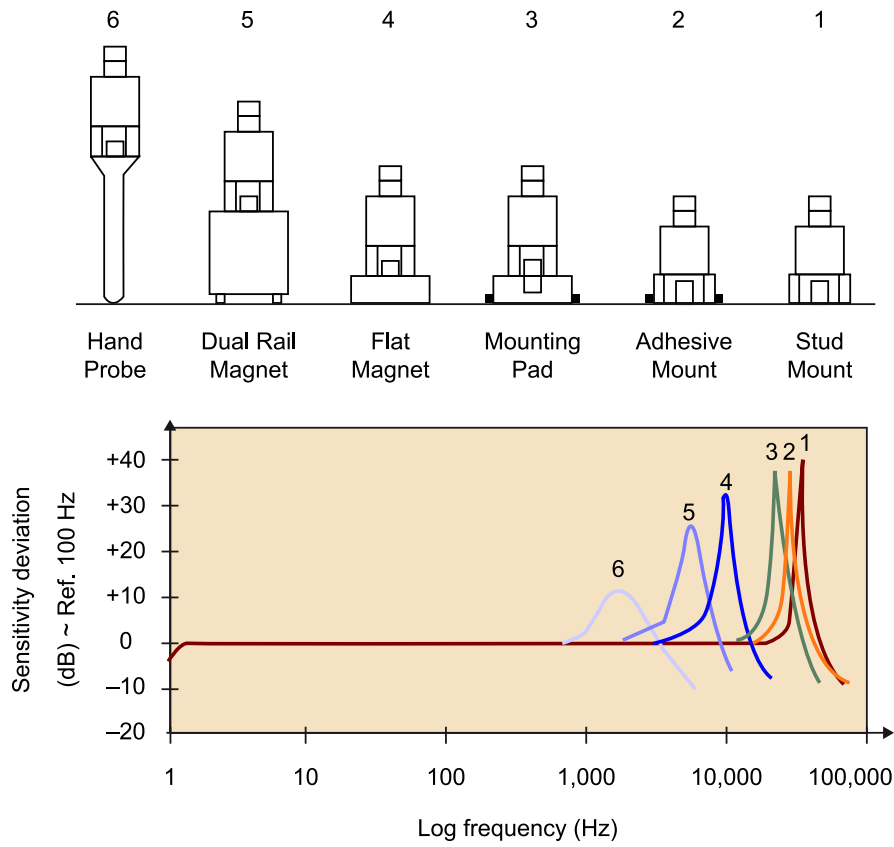
Un valor típic de rang dinàmic és 120 dB, que proporciona mesures fiables de $0,001 \text{ m/s}^2$ a 1000 m/s^2 .

3.4. Sistema de muntatge

L'acceleròmetre es pot adherir a la mostra de test de diferents maneres, i sempre amb l'objectiu que vibri solidàriament a la mostra. El fet d'afegir un element d'unió modifica la rigidesa total del sistema, i es modifica la freqüència de ressonància de l'acceleròmetre.

La figura 47 mostra l'afectació sobre el marge freqüencial en utilitzar els mètodes d'unió més habituals.

Figura 47. Afectació del muntatge sobre el rang freqüencial



Font: <http://www.modalshop.cn/calibration.asp?id=688>.

Resum

L'electroacústica defineix les analogies acústiques i mecàniques necessàries per estudiar els transductors acústics. En aquest mòdul s'han estudiat les propietats de micròfons, altaveus i acceleròmetres, així com les seves tipologies més importants, tot destacant-ne els avantatges i inconvenients de cadascuna de les estratègies.

Els micròfons tradueixen les variacions de pressió a nivells elèctrics a partir de diferents tecnologies, essent les més utilitzades les basades en micròfons dinàmics i micròfons electrostàtics. Darrerament, els micròfons miniaturitzats MEMS s'utilitzen àmpliament en els dispositius electrònics (mòbils, tabletas, etc.), així com els més antics electrets.

Mentre que els micròfons s'encarreguen de traduir l'energia acústica en energia elèctrica, els altaveus realitzen el pas contrari: de senyal elèctric a senyal acústic. Els altaveus presenten una eficiència força baixa, a causa del desacoblament d'impedàncies dels dos medis. Altaveus com ara els dinàmics (el més utilitzat arreu) o l'electrostàtic presenten aquest baix rendiment, mentre que les solucions basades en botzines solucionen força bé aquest inconvenient. Així mateix, per tal d'anul·lar l'efecte del curtcircuit acústic, els altaveus es poden presentar en caixes acústiques, a partir de diferents configuracions de cavitats i filtres acústics.

Finalment, el mòdul finalitza amb una descripció dels acceleròmetres, els transductors receptors de vibracions per antonomàsia en el món de la vibroacústica.

Exercicis d'autoavaluació

1. Amb relació als micròfons, quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) L'equació polar representa la gràfica polar d'un micròfon, i per a micròfons cardioïdes sol indicar una figura de 8, presentant una radiació semblant el micròfon bidireccional.
- b) Els micròfons de camp lliure estan pensats, bàsicament, per tenir una resposta plana en la direcció axial, essent pràcticament nul·la la resposta en les altres direccions.
- c) L'orifici que es pot trobar en un micròfon sol ser per igualar les pressions estàtiques de l'interior de la capsula i de l'exterior, i influeix clarament en la resposta freqüencial.
- d) Als micròfons de gradient es pot exercir amb els retards per aconseguir diferents diagrames de radiació.

2. Amb relació als micròfons electrostàtics, quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) Es pot aconseguir incrementar la sensibilitat del micròfon disminuint la tensió mecànica del diafragma.
- b) A major diafragma, major sensibilitat.
- c) A menor diafragma, major resposta en freqüència.
- d) Totes les respostes anteriors són certes i, a més, són els micròfons utilitzats en els equips de mesures ambientals.

3. Amb relació als micròfons de mesura, quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) Les correccions de camp són necessàries per tenir en compte l'efecte de situar el micròfon en un camp acústic, tot i que només afecten bàsicament a alta freqüència en la majoria de micròfons.
- b) El protector de membrana té la funció de protegir el micròfon de les condicions ambientals adverses.
- c) El protector de membrana es podria farcir de material absorbent per reduir la freqüència del ressonador que forma amb la placa mòbil del micròfon.
- d) En micròfons amb un diafragma major, la influència del micròfon és més important a altes freqüències.

4. Amb relació als altaveus, quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) Són transductors electroacústics que tradueixen senyals elèctriques a senyals acústiques, a semblança dels micròfons.
- b) Acostumen a presentar una eficiència força pobre, deguda al desacoblament entre l'aire i l'element emissor, que es pot solucionar utilitzant altaveus en caixa tancada.
- c) Ben sovint es poden trobar altaveus de varies vies, equipats amb crossovers que distribueixen el senyal en funció de la seva freqüència.
- d) Els altaveus solen tenir una resposta omnidireccional, sobretot a freqüències mitges.

5. Pel que fa als diferents tipus d'altaveus, quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) Els altaveus dinàmics funcionen anàlogament als micròfons electret.
- b) Els altaveus DML tenen l'avantatge de presentar fortes zones de cobertura, precisament perquè aprofiten la condició de generar ones esfèriques.
- c) En situar un altaveu en una caixa tancada, no s'aconsegueix reduir el curtcircuit acústic.
- d) La situació de l'excitador en un altaveu DML pot ser determinant a l'hora d'aconseguir una radiació plana en freqüència.

6. Amb relació als acceleròmetres, quina de les següents afirmacions és correcta?

- a) L'efecte piezoelèctric determina la càrrega que apareix als extrems del connector de l'acceleròmetre en ser comprimit.
- b) A major massa, major sensibilitat, i també major rang freqüencial de treball.
- c) Es podria donar el cas que un acceleròmetre afectés a la mesura en el sentit que modifiqués els modes propis de l'estructura, o la resposta que presenta. En aquest sentit, sempre cal assegurar que el seu pes no superi el 50% del pes de la mostra sota test.
- d) Els acceleròmetres triaxials poden mesurar en les tres direccions axials de forma seqüencial, però mai simultània.

Solucionari

Exercicis d'autoavaluació

1. d

2. d

3. a

4. c

5. d

6. a

Bibliografia

Bies, D. A. i Hansen, C. H. (2009). *Engineering Noise Control: Theory and Practice* (4a. ed.). CRC Press.

Borwick, J. (2012). *Loudspeaker and Headphone Handbook*. CRC Press.

Crocker, M. J. (2007). *Handbook of Noise and Vibration Control*. John Wiley & Sons.

Eargle, J. (2012). *The Microphone Book: From Mono to Stereo to Surround - A Guide to Microphone Design and Application* (3a. ed.). Taylor & Francis.

Pueo Ortega, B. i Romá Romero, M. (2003). *Electroacústica: altavoces y micrófonos*. Pearson Educación.

Serridge, M. i Licht, T. R. (1987). *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers: Theory and Application Handbook*. Brüel & Kjær.

