
Sistemes de sonorització i reforç de so

Reforç sonor, interconnexió d'equips i potencia requerida

PID_00249629

Carles Vila Deutschbein

Temps mínim de dedicació recomanat: 4 hores



**Carles Vila Deutschbein**

Enginyer superior en electrònica per Enginyeria La Salle (URL). Durant els seus estudis es va especialitzar en la branca de so, aprofundint en les àrees d'àudio digital, tecnologies de transducció i tècniques de producció audiovisual. En l'àmbit del Departament d'Acústica d'Enginyeria i Arquitectura La Salle, ha combinat la docència amb la recerca i ha dirigit a partir del 2006 el Màster Producció Sonora i Àudio Digital.

A partir del 2005 és director tècnic a l'empresa Media Arts Studio, a Barcelona, on és responsable de la gestió tècnica dels estudis de doblatge i del laboratori audiovisual. És expert en sistemes i tècniques de postproducció de so i imatge per cinema, televisió i VOD.

Primera edició: febrer 2019
© Carles Vila Deutschbein
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. Sistemes de reforç sonor en exteriors	7
1.1. L'entorn en un sistema de reforç sonor	7
1.2. Guany acústic potencial (PAG)	10
1.3. Influència de la directivitat	12
1.4. Guany acústic necessari (NAG)	15
2. Reforç sonor en espais tancats	19
2.1. Consideracions sobre acústica de recintes	19
2.2. Directivitat dels transductors	20
2.3. PAG en espais tancats	22
2.3.1. Escenari 1: sala petita	24
2.3.2. Escenari 2: sala mitjana-gran	27
2.4. NAG en espais tancats	30
3. Sistemes d'altaveus per a reforç sonor	32
3.1. El clúster central	32
3.2. Variacions del clúster central	33
3.2.1. El clúster partit	34
3.2.2. El clúster LCR	35
4. Reforç sonor en espais tancats amb fonts distribuïdes	36
4.1. Altaveus de sostre	37
4.2. PAG en sistemes distribuïts	38
4.2.1. Modificadors de la distància crítica	39
4.3. Distribució geomètrica dels altaveus	42
4.3.1. Distribució quadrada	42
4.3.2. Distribució hexagonal	43
4.3.3. Estimació del nombre d'altaveus necessaris	43
4.4. Potència elèctrica requerida (EPR)	46
Resum	48
Exercicis d'autoavaluació	49
Solucionari	51
Bibliografia	52

Introducció

En aquest mòdul s'estudia la utilització pràctica d'altaveus en grans espais, tenint en compte la problemàtica relacionada amb la seva distribució, la cobertura aconseguida, la potència necessària, la realimentació acústica i la intel·ligibilitat de la paraula.

Per començar, cal fer una clara distinció entre un sistema de sonorització i un sistema de reforç sonor. Quan parlem de **sonorització**, ens referim a la difusió d'un so en un espai diferent a aquell en el qual s'ha generat. És el cas, per exemple, en el que un locutor parla per un micròfon en una cabina de control i aquest senyal es difon en un altre lloc. També es dona aquest cas quan es reproduïx pel sistema de megafonia un senyal pregravat, com, per exemple, en un supermercat, una discoteca o una estació de metro.

En canvi, en un sistema de **reforç sonor**, tant el so original com el so amplificat coexisteixen al mateix espai, ja sigui obert o tancat. En aquest cas, el gran problema és el denominat «efecte Larsen», que estudiarem a continuació.

Un sistema de reforç sonor es compon d'un conjunt de micròfons, altaveus i equips electrònics associats que permet amplificar el senyal dels micròfons (veu, música, etc.) de manera que el públic situat a certa distància pugui percebre'ls de manera adequada, ja que sense el sistema de reforç el nivell sonor seria insuficient. Les situacions en les quals es requereix un reforç sonor són molt variades: des d'un míting polític, una missa o una classe, fins a un concert multitudinari a l'aire lliure o en un recinte.

Objectius

Els principals objectius d'aquest mòdul són els següents:

- 1.** Conèixer els components que componen un sistema de reforç sonor i les diferències que hi ha amb una sonorització.
- 2.** Entendre per què es produeix la realimentació electroacústica i els problemes que ocasiona.
- 3.** Comprendre el concepte de guany acústic potencial (PAG).
- 4.** Saber com afecten les distàncies entre locutor, micròfon, altaveu i oient en el càlcul de el PAG.
- 5.** Saber avaluar si el PAG obtinguda és suficient per a determinades circumstàncies de l'entorn.
- 6.** Saber avaluar el PAG en espais tancats, calculant les distàncies crítiques que hi intervenen.
- 7.** Conèixer els diferents tipus de clústers que s'usen habitualment, amb els seus avantatges i inconvenients.
- 8.** Saber dimensionar correctament un reforç sonor amb altaveus distribuïts.
- 9.** Saber calcular la potència elèctrica requerida per obtenir un determinat nivell de pressió sonora.

1. Sistemes de reforç sonor en exteriors

En aquesta primera secció, es presenten els sistemes de reforç sonor i s'estudien els conceptes de guany acústic potencial (PAG) i guany acústic necessari (NAG), així com la influència de la directivitat de micròfons i altaveus en el càlcul de el PAG.

1.1. L'entorn en un sistema de reforç sonor

El nostre estudi dels sistemes de reforç sonor comença amb l'anàlisi d'un sistema senzill per a exteriors. L'espai obert està relativament exempt de reflexions i, per això, anem a considerar, per simplicitat, que estem en **condicions de camp lliure**.

Considerarem, també, per començar, que fem un sol altaveu, o un grup d'altaveus (clúster) concentrats en un sol punt. En aquest cas, en tractar-se de **fonts puntuals**, s'aplica la **lei quadràtica inversa**, segons la qual **la intensitat acústica sobre una mateixa línia radial és inversament proporcional al quadrat de la distància**.

Així, per exemple, per a dos punts situats a les distàncies r_1 i r_2 d'un altaveu i en la mateixa direcció radial (figura 1), els respectius valors d'intensitat sonora en tots dos punts (I_1 i I_2) respondran a les següents relacions de proporcionalitat:

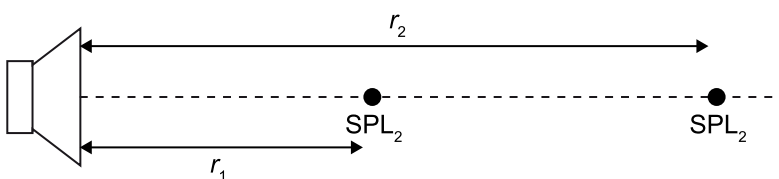
$$I_1 \propto \frac{1}{r_1^2} ; I_2 \propto \frac{1}{r_2^2} \quad (1)$$

Per tant, la diferència de **nivells de pressió sonora (SPL)** en tots dos punts serà la següent:

$$SPL_1 - SPL_2 = 20 \log r_2 - 20 \log r_1 \quad (2)$$

a on els SPL es mesuren en dB.

Figura 1. Els nivells SPL en camp lliure es calculen mitjançant la llei quadràtica inversa

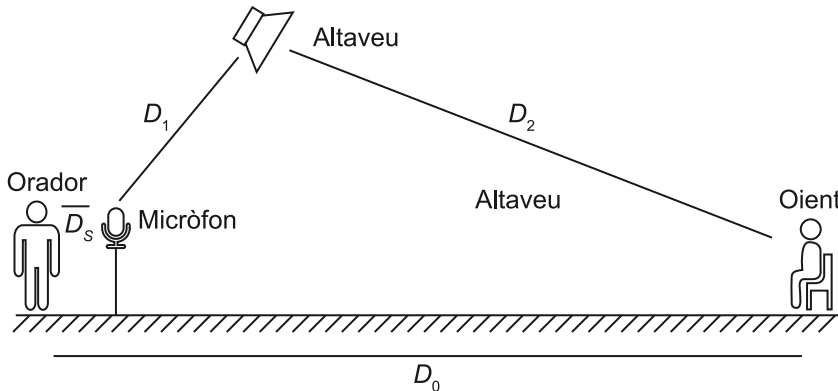


D'aquesta manera, si el SPL a la distància r_1 de l'altaveu és coneguda i es desitja calcular el SPL a la distància r_2 , n'hi ha prou amb fer el següent:

$$SPL_2 = SPL_1 + 20 \log r_1 - 20 \log r_2 \quad (3)$$

A continuació, la figura 2 mostra l'esquema general d'un sistema de reforç sonor bàsic en exteriors. Els elements acústics i electroacústics implicats són el locutor, el micròfon, l'altaveu i l'oient.

Figura 2. Esquema d'un sistema de reforç sonor bàsic en exteriors

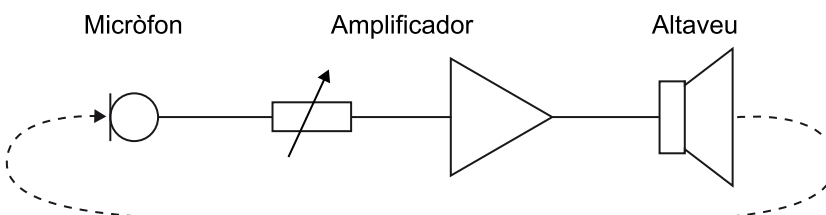


Les diferents distàncies definides en aquest sistema de reforç són les següents:

- D_0 : distància **orador-oient** (o **locutor-oient**).
- D_1 : distància **altaveu-micròfon**.
- D_2 : distància **altaveu-oient**.
- D_s : Distància **orador-micròfon** (o **locutor-micròfon**).

El diagrama elèctric equivalent a aquest sistema es mostra en la figura 3. La línia puntejada indica el circuit de realimentació acústica que pot existir entorn al sistema complet.

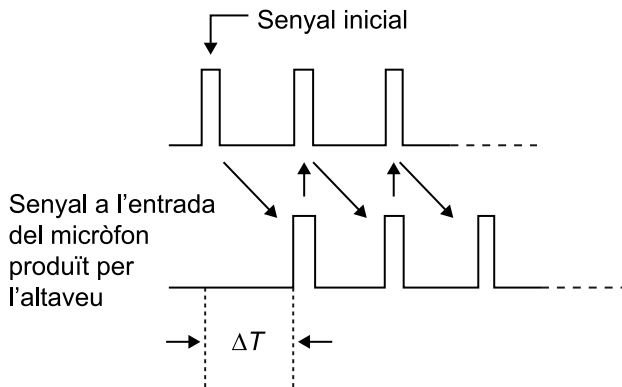
Figura 3. Bucle de realimentació que provoca el denominat «efecte Larsen», si es força un guany acústic massa elevat



Quan s'engega el sistema, el guany de l'amplificador pot incrementar-se fins a un cert punt en el qual el sistema «ressona», **es realimenta**. De sobte, s'escolta un desagradable «udol» que ens obliga a baixar el guany si no volem quedar-nos sords o fer malbé els altaveus. **Just en el llindar de la realimentació, el guany global electroacústic és unitari, amb desfasament zero.** Com veurem, aquest guany global electroacústic és fruit dels guanys elèctrics dels dispositius de la cadena d'àudio, les sensibilitats dels transductors i les distàncies relatives entre tots els elements.

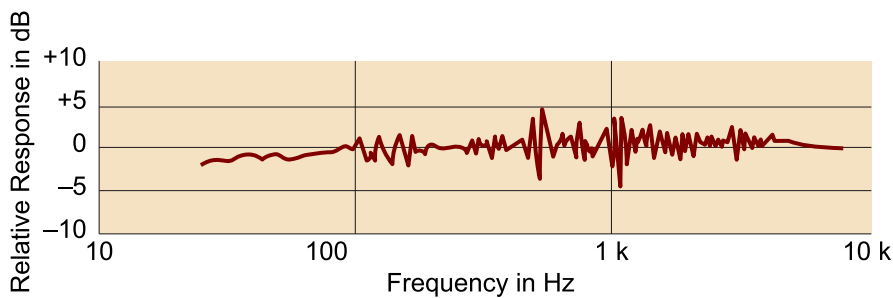
La condició que es dona just en el llindar de realimentació es mostra en la figura 4, on un primer estímul impulsional a l'entrada del micròfon dona lloc a un tren de polsos que retorna al micròfon realimentat per l'altaveu i, que al seu torn, dona lloc a una oscil·lació sostinguda a una determinada freqüència relacionada amb el retard de realimentació (ΔT).

Figura 4. Un impuls inicial en el micròfon s'amplifica i s'emet per l'altaveu. El so amplificat es propaga per l'aire i al cap d'un retard ΔT arriba al micròfon i torna a ser amplificat



Fins i tot a nivells una mica inferiors al llindar de realimentació, la resposta del sistema serà irregular, ja que el sistema «intenta» entrar en realimentació, però el guany del bucle no és suficient per sostenir-la. Aquest efecte és il·lustrat en la figura 5.

Figura 5. Irregularitat de la resposta en freqüència en un sistema de reforç sonor quan es treballa a prop del guany acústic màxim abans de realimentar positivament. Les abruptes resonàncies creen un so desagradable



Com a norma general, un sistema de reforç sonor haurà de tenir un marge de seguretat de 6 a 10 dB abans de realimentar, a fi que el so sigui natural per a qualsevol tipus de senyal reproduït.

1.2. Guany acústic potencial (PAG)

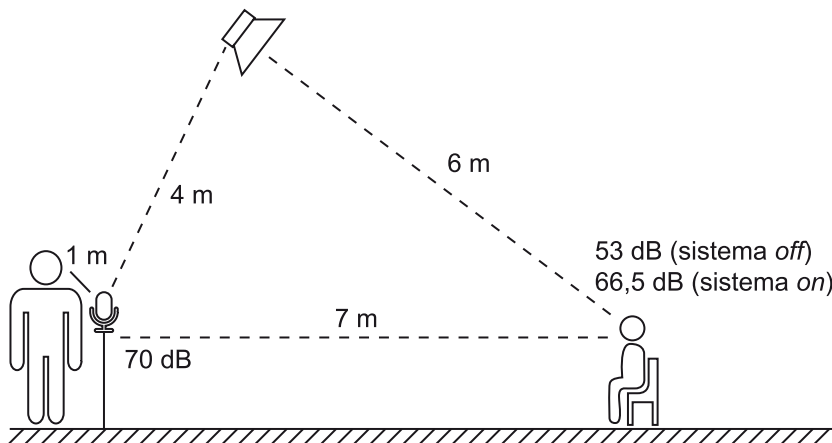
En 1969, Charles P. Boner i Richard E. Boner (pare i fill) van quantificar el concepte de guany acústic potencial (PAG, *potential acoustic gain*). En aquest apartat, anem a estudiar la seva simple i elegant conclusió, així com les conseqüències que d'ella se'n deriven.

El PAG es defineix com l'increment de SPL que percep un oient amb el sistema de reforç encès respecte al que percep directament del locutor quan el sistema està apagat.

Un PAG alta (de 6 a 24 dB, o més) indica que el sistema de reforç és efectiu i que l'oient percep una clara millora en el nivell sonor percebut gràcies al reforç. En canvi, un PAG baixa (de 0 a 6 dB) indica que, tal com està configurat el sistema, la millora per a l'oient és baixa o fins i tot nul·la.

Seguint l'esquema general definit a la figura 2, a continuació es representa un exemple de sistema de reforç sonor en exteriors simplificat a la mínima expressió en la figura 6. A partir d'aquest cas bàsic inicial, anirem afegint-li complexitat al llarg del mòdul, però convé afermar primer els conceptes mitjançant aquesta situació simplificada.

Figura 6. Exemple de reforç sonor en exteriors. Els transductors se suposen omnidireccionals. Prenent les distàncies definides en la Figura 2, s'observa que $D_0 = 7$ m, $D_s = 1$ m; $D_1 = 4$ m i $D_2 = 6$ m



Suposem, doncs, en primer lloc, que **tant el micròfon com l'altaveu són omnidireccionals**, de manera que el seu factor de directivitat és $Q = 1$ i, per tant, el seu índex de directivitat és $DI = 0$ dB (aquests paràmetres de caracterització de la directivitat dels transductors es defineixen a l'apartat 2.2 d'aquest mateix mòdul).

Per distingir els diferents nivells implicats, usarem la següent nomenclatura:

- L_{OD} : nivell que rep l'oient amb la megafonia **desconnectada**.

- L_{OC} : nivell que rep l'oient amb la megafonia **connectada**.
- L_{ML} : nivell que rep el **micròfon** provinent únicament del **locutor** (orador).
- L_{MA} : nivell que rep el **micròfon** provinent únicament de l'**altaveu**.

D'entrada, començarem l'anàlisi considerant el sistema de reforç apagat (és a dir, amb el micròfon, l'amplificador i l'altaveu apagats). Suposem que el locutor provoca $70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ a 1 metre de distància (valor arbitrari raonable). És a dir, $L_{ML} = 70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$. Aleshores, aplicant la llei quadràtica inversa de la manera definida a l'equació (3), el nivell que arriba a l'oient serà:

$$L_{OD} = L_{ML} + 20 \log D_s - 20 \log D_0 = 70 + 20 \log 1 - 20 \log 7 \cong 53 \text{ dB}_{\text{SPL}} \quad (4)$$

Connectem ara el sistema de reforç sonor (és a dir, el micròfon, l'amplificador i l'altaveu) i augmentem lentament el guany del sistema (és a dir, el de l'amplificador) just fins que apareix la realimentació. **La realimentació apareixerà quan l'altaveu provoqui en la membrana del micròfon un nivell igual al que provoca el locutor: $70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$.** Per tant, el **llindar de realimentació** es defineix com aquell valor de L_{MA} tal que:

$$L_{MA} = L_{ML} \quad (5)$$

En assolir el llindar de realimentació, l'altaveu provocarà, al seu torn, el següent nivell en la posició de l'oient, que serà el màxim:

$$L_{OCmax} = L_{MA} + 20 \log D_1 - 20 \log D_2 = 70 + 20 \log 4 - 20 \log 6 \cong 66,5 \text{ dB}_{\text{SPL}} \quad (6)$$

Si no apliquem cap marge de seguretat, el guany acústic màxim (G_{max}) que el sistema pot produir és el següent:

$$G_{max} = L_{OCmax} - L_{OD} \cong 66,5 - 53 = 13,5 \text{ dB} \quad (7)$$

Expandint aquesta equació (7) amb les expressions intermèdies obtingudes en (4) i (6), s'obté la següent expressió per a G_{max} :

$$G_{max} = \frac{(L_{MA} + 20 \log D_1 - 20 \log D_2)}{L_{OCmax}} - \frac{(L_{ML} + 20 \log D_s - 20 \log D_0)}{L_{OD}}$$

$$G_{max} = 20 \log D_0 - 20 \log D_s + 20 \log D_1 - 20 \log D_2 \quad (8)$$

Com veiem, el nivell de $70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ que provoca el locutor és irrellevant (ni L_{ML} ni L_{MA} apareixen a l'expressió final simplificada de G_{max}). En efecte, la pràctica ens demostra que **no és necessari que hi hagi un senyal explícit perquè existeixi realimentació**. El propi soroll ambient serveix d'estímul per engegar el bucle.

Mai és recomanable treballar just en el llindar de la realimentació. Sempre és necessari tenir un **marge de seguretat d'almenys 6 dB abans de la realimentació**, perquè el so no quedi excessivament acolorit per les ressonàncies de la realimentació. La qual cosa es tradueix, simplement, en restar 6 dB a l'expressió final de l'equació (8). D'aquesta manera, s'obté l'**expressió clàssica del PAG**:

$$PAG = 20 \log D_0 - 20 \log D_s + 20 \log D_1 - 20 \log D_2 - 6 \text{ dB} \quad (9)$$

En aquesta forma, l'expressió de el PAG ens aporta diverses conclusions, algunes d'elles intuïtivament òbvies:

- El PAG és independent del nivell del locutor.
- Apropar el locutor al micròfon augmenta el PAG ($D_s \downarrow \rightarrow PAG \uparrow$).
- Allunyar l'altaveu del micròfon augmenta el PAG ($D_1 \uparrow \rightarrow PAG \uparrow$).
- En un espai obert, el PAG depèn únicament de la distribució espacial dels elements.

Si substituïm a l'equació (9) els valors numèrics del nostre exemple, il·lustrat en la figura 6, s'obté el següent resultat:

$$PAG = 20 \log 7 - 20 \log 1 + 20 \log 4 - 20 \log 6 - 6 \cong 7,38 \text{ dB} \quad (10)$$

Aquest resultat indica que, **amb un reforç sonor configurat amb aquestes distàncies relatives entre locutor, micròfon, altaveu i oient, es pot aconseguir per a l'oient una millora de nivell SPL de fins a 7,38 dB.** És un valor suficientment elevat que justificaria l'efectivitat del reforç.

En el cas de tenir **més d'un micròfon connectat al sistema de megafonia**, com per exemple en una taula rodona amb diversos conferenciants, **el PAG empitjora**, ja que el nivell a l'entrada de l'amplificador (encara que sigui soroll) augmenta. Es pot reescriure l'**expressió de el PAG en funció del nombre de micròfons oberts** (NOM, *number of open microphones*):

$$PAG = 20 \log D_0 - 20 \log D_s + 20 \log D_1 - 20 \log D_2 - 6 \text{ dB} - 10 \log NOM \quad (11)$$

1.3. Influència de la directivitat

Si és el cas que l'altaveu i/o el micròfon tenen una certa directivitat (és a dir, si no són omnidireccionals), això ha de ser tingut en compte per al càlcul de el PAG. Normalment, **la directivitat afavoreix al sistema si s'utilitza l'orientació dels transductors de manera adequada, podent-se aconseguir un nivell d'amplificació major.** Concretament, caldrà tenir en compte els següents índexs de directivitat (DI):

- DI_{OA} : índex de directivitat de l'altaveu en la direcció de l'oient considerat.
- $DI_{\theta A}$: índex de directivitat de l'altaveu en la direcció del micròfon.
- DI_{LM} : índex de directivitat del micròfon en la direcció del locutor.
- $DI_{\theta M}$: índex de directivitat del micròfon en la direcció de l'altaveu.

Seguim amb el mateix exemple de l'apartat anterior, però ara considerant les directivitats del micròfon i l'altaveu (figura 7). En aquest cas, anem a emprar un altaveu directiu, el patró polar del qual a freqüències mitjanes es mostra a la figura 8a. Veiem que el so que arriba al micròfon al llarg de la direcció D_1 es veurà atenuat 6 dB respecte a un altaveu omnidireccional ($DI_{\theta A} = 6$ dB). Aquesta directivitat exerceix al nostre favor i podem sumar directament aquests 6 dB a l'expressió de el PAG. El mateix raonament és vàlid per a micròfons directius, tal i com es mostra a la figura 8b.

Figura 7. Angles implicats en el càlcul de el PAG tenint en compte la directivitat dels transductors. La variació de sensibilitat al llarg dels angles marcats en vermell perjudica a (disminueix) el PAG, mentre que el PAG millora (augmenta) al llarg dels angles marcats en verd.

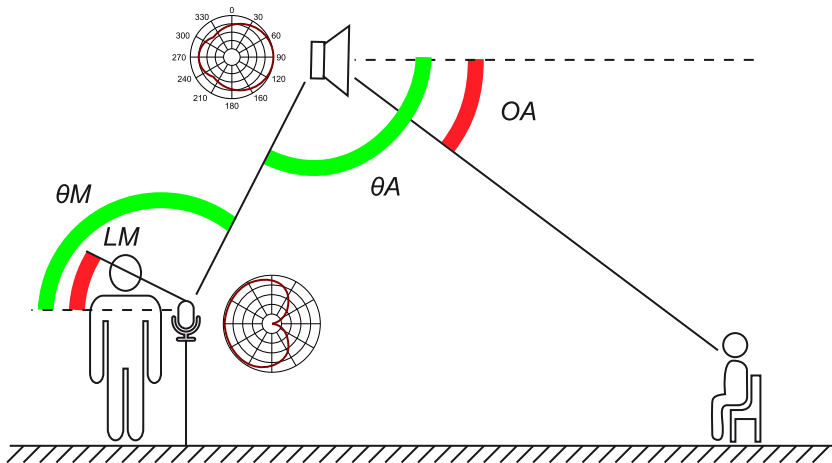
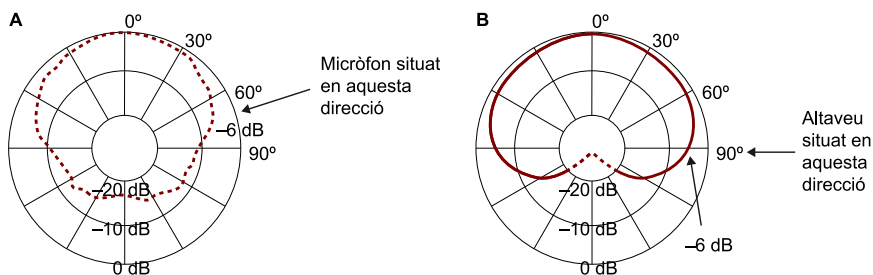
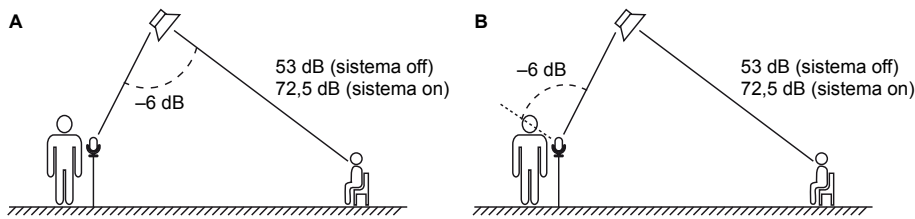


Figura 8. a) Diagrama polar d'un altaveu en el pla vertical. b) Diagrama polar d'un micròfon cardioide



A la figura 9b es mostra un sistema que utilitza un altaveu omnidireccional i un micròfon cardioide l'eix del qual a -6 dB (90°) està orientat a l'altaveu ($DI_{\theta M} = -6$ dB). Pel que fa a el PAG, aquest sistema és equivalent al de la figura 9a, en el qual l'element directiu és l'altaveu (amb $DI_{\theta A} = 6$ dB) i el micròfon és omnidireccional. Tots dos presenten un increment de el PAG de 6 dB respecte al cas en el qual tots dos transductors eren omnidireccionals.

Figura 9. Millora de el PAG a causa de la directivitat de l'altaveu a) i del micròfon b)



Per descomptat, podem combinar micròfons i altaveus directius per augmentar el PAG el màxim possible. Simplement, es calcula el PAG com si els transductors fossin omnidireccionals i es suma al resultat l'avantatge en dB que aporta la directivitat del micròfon i de l'altaveu als respectius angles.

Però també cal considerar els casos en què les directivitats ens perjudiquen. En primer lloc, si el locutor no parla al micròfon en el seu eix principal de màxima sensibilitat, perdem PAG. Així mateix, si l'altaveu no està orientat a l'oient, estarem en una situació perjudicial, tal com ho indiquen els angles vermells (*OA* i *LM*) de la figura 7.

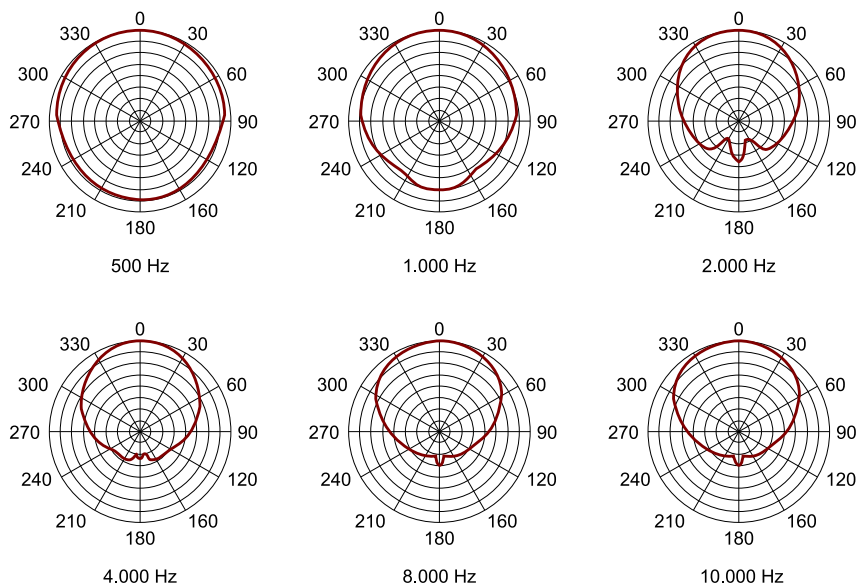
Així les coses, podem resumir la influència de la directivitat en l'equació (12). Es tracta, simplement, de sumar o restar els índexs de directivitat segons afavoreixin o perjudiquin, respectivament, a el PAG.

$$PAG_D = PAG + DI_{OA} - DI_{\theta A} + DI_{LM} - DI_{\theta M} \quad (12)$$

Per a angles diferents al principal, el valor del *DI* pot trobar-se restant-li els dB llegits en el diagrama polar al *DI* màxim en l'eix principal (veure apartat 2.2 per a més detalls).

En teoria, sumant els avantatges del micròfon i de l'altaveu directius de l'exemple de la figura 7, l'augment de el PAG és de $6 + 6 = 12$ dB. No obstant això, per augmentar el PAG significativament, en la pràctica no és aconsellable dependre de micròfons i d'altaveus directius, ja que, especialment els micròfons, poden moure's i podrien donar lloc a una brusca realimentació simplement en ser girats. De totes maneres, en la majoria de casos podem donar-nos per satisfets si aconseguim incrementar el PAG a causa de la directivitat dels transductors en 4-6 dB. La raó d'aquest fet és que el patró directiu no és el mateix per a totes les freqüències, tal com s'il·lustra en la figura 10. A baixes freqüències, tots els transductors tendeixen a semblar omnidireccionals, la qual cosa provoca que els avantatges abans esmentats s'esvaeixin.

Figura 10. Variació de la directivitat en un altaveu en funció de la freqüència. A baixes freqüències, l'altaveu és pràcticament omnidireccional. A mesura que augmenta la freqüència, l'altaveu és cada vegada més directiu



En general, si volem **incrementar el PAG**, les opcions més directes són **reduir D_s** o **incrementar D_1** .

1.4. Guany acústic necessari (NAG)

A l'equació (10), hem vist que, per a una certa disposició dels elements (veure figura 6), s'obté un PAG de uns 7,38 dB. Calculat això, ara ens interessa saber si aquest valor de PAG és excessiu o si, per contra, és insuficient per a una aplicació en concret.

El **guany acústic necessari (NAG, *necessary acoustic gain*)** és el paràmetre que **permet definir si un cert valor de PAG és excessiu, insuficient o adequat**:

- Si el PAG fos excessiva ($PAG > NAG$), l'oient escoltaria al locutor a través de l'altaveu a un nivell massa elevat i bastaria amb reduir el guany de l'amplificador fins que el so fos confortable.
- En canvi, si el PAG fos insuficient ($PAG < NAG$), seria necessari replantejar la situació i buscar solucions.

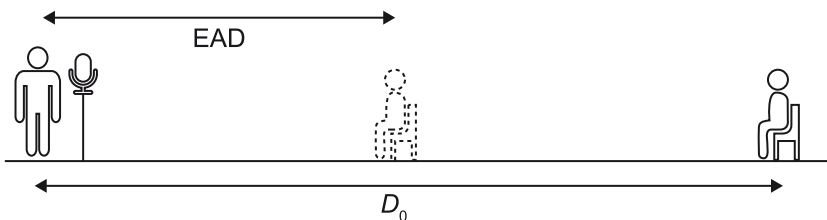
Sigui quin sigui el cas, es requereix d'un criteri per poder dimensionar correctament el sistema de reforç d'antuvi. Aquest criteri es basa en primera instància en la relació senyal-soroll (SNR) que rep l'oient. **Perquè l'audició sigui con-**

fortable, cal assegurar una SNR en l'oient d'almenys 25 dB, en particular a l'octava de 2 kHz, que és la més decisiva per a la intel·ligibilitat de la paraula.

D'aquesta SNR mínima, es deriva la **distància acústica equivalent (EAD, equivalent acoustic distance)**, que no és altra cosa que la «**distància virtual**» a la qual l'oient percep al locutor per efecte del reforç sonor.

És a dir, connectar la megafonia fa que l'oient percebi al locutor com si estigués a una distància menor (EAD) que a la qual realment està (D_0), tal com s'il·lustra a la figura 11.

Figura 11. Distància acústica equivalent (EAD)



A la taula 1 es mostren les EAD recomanables per a diferents entorns acústics. Si es compleix aquesta EAD, s'assegura una SNR prou elevada.

Taula 1. EAD recomanable per a diferents entorns acústics

Entorn acústic	EAD recomanable
Teatre silenciós	6 a 7 m
Interiors poc sorollosos	2 a 3 m
Exteriors	1 a 1,5 m
Naus industrials molt sorolloses	Fins 0,3 m

Una vegada coneguda l'EAD desitjable, s'ha de dissenyar el sistema de reforç sonor de tal manera que sempre es compleixi que $PAG \geq NAG$.

La NAG per aconseguir una determinada EAD pot calcular-se comparant l'EAD requerida amb la distància entre el locutor i l'oient:

$$NAG = 20 \log D_0 - 20 \log EAD \quad (13)$$

Així, suposant que l'escenari de l'exemple de la figura 6 és un entorn en el qual l'EAD requerida és de 3 m (per exemple, una aula), la NAG resultant és la següent:

$$NAG = 20 \log 7 - 20 \log 3 \cong 7,36 \text{ dB} \quad (14)$$

Per tant, el PAG i la NAG coincideixen, així que el sistema serà viable (en el límit).

Si, per contra, especifiquem un sistema per a un ambient més sorollós que requereixi una EAD més reduïda, llavors el PAG ja no seria suficient. Per exemple, si la nova EAD fos d'1,5 m (la meitat que l'anterior), necessitaríem 6 dB de guany acústic addicional. Tal i com hem estudiat, l'ús d'altaveus i micròfons directius podria oferir-nos aquest guany afegit. No obstant això, una solució molt més pràctica i efectiva consistiria a reduir D_s a 0,5 m (és a dir, també a la meitat), afegint així els 6 dB que necessitaríem.

En general, **en un sistema a l'aire lliure s'aconsegueix una bona intel·ligibilitat quan els pics del senyal vocal estan 25 dB per sobre del soroll ambient mesurat amb ponderació A.** Una conversa típica produeix uns 60-65 dB de nivell de senyal vocal (L_{sv}) a 1 metre de distància (r). Per tant, a un ambient en el qual el soroll de fons sigui de 50 dB SPL, necessitaríem amplificar el senyal fins a 75-80 dB per garantir una escolta confortable. En conseqüència, ens caldria una EAD d'uns 25 cm, deduïda de forma ràpida i aproximada atenent a la llei quadràtica inversa:

- Cada vegada que es dobla la distància, perdem 6 dB de nivell de senyal.
- Cada vegada que la distància es redueix a la meitat, guanyem 6 dB de nivell de senyal.

$$\begin{aligned} r = 1 \text{ m} &\rightarrow L_{sv} = 65 \text{ dB} \\ r = 0,5 \text{ m} &\rightarrow L_{sv} = 71 \text{ dB (+6 dB)} \\ r = 0,25 \text{ m} &\rightarrow L_{sv} = 77 \text{ dB (+6 dB)} \end{aligned} \quad (15)$$

Vegem ara el que hem de fer perquè el sistema funcioni sota unes condicions tan adverses. En primer lloc, calculem la NAG:

$$NAG = 20 \log D_0 - 20 \log EAD = 20 \log 7 - 20 \log 0,25 \cong 29 \text{ dB} \quad (16)$$

Recordem que el nostre sistema té solament un PAG d'uns 7,38 dB. Com ja hem vist a l'apartat 1.3, en la pràctica podem augmentar el PAG un màxim de 6 dB usant transductors directius, és a dir, fins a uns 13,38 dB. Encara ens faltaran uns 16 dB fins a arribar a la NAG.

De nou, **la solució més pràctica consisteix a reduir D_s , és a dir, a apropar el micròfon al locutor.** Això es pot aconseguir, per exemple, mitjançant un micròfon de mà. Tornant a l'equació (9) i prenent el terme corresponent a

l'aportació de D_s en el càlcul de el PAG, podem calcular la nova distància D_s necessària per afegir 16 dB a el PAG (recordem que la D_s original definida en l'escenari de la figura 6 és d'1 m):

$$-20\log D_s = -20\log 1 + 16 \text{ dB} \rightarrow D_s = 10^{\left(\frac{-16}{-20}\right)} \cong 0,16 \text{ m} \quad (17)$$

És bastant complicat que el locutor mantingui un micròfon de mà a una distància constant de 16 cm de la seva boca. En conseqüència, amb la solució del micròfon de mà, el guany del sistema variarà considerablement en funció de petites variacions en la distància D_s . Així, en la pràctica sempre és millor utilitzar un tipus de micròfon personal que l'usuari pugui dur a sobre. En aquest cas, un **micròfon de diadema** seria ideal, ja que implica una distància D_s mínima. Aquest tipus de micròfon s'utilitza moltíssim en actuacions musicals en directe precisament per aquest motiu, encara que en altres aplicacions més formals és més discret un **micròfon de solapa**.

2. Reforç sonor en espais tancats

Aquesta secció està dedicada a l'estudi del comportament d'un reforç sonor en un **espai tancat**. Com sabem, en una sala es forma un camp reverberant, que és funció de la geometria de la sala, que interactuarà amb el camp directe generat per les fonts sonores. A continuació, a l'apartat 2.1, es repassen els paràmetres essencials de l'acústica de sales que ens serviran en els nostres càlculs, alguns d'ells ja estudiats en el mòdul de condicionament acústic (no obstant el qual, serà important tenir sempre presents els fonaments de la teoria d'acústica de recintes).

Després d'aquest repàs, la resta d'apartats de la secció estan dedicats a tornar sobre els conceptes presentats en la secció 1 (directivitat dels transductors, PAG i NAG), solament que ara des del context d'un espai tancat.

2.1. Consideracions sobre acústica de recintes

En plantejar l'estudi d'un reforç sonor en espais tancats, cal afegir la contribució del camp reverberant a la radiació directa que procedeix de les fonts. Les característiques acústiques d'un punt de la sala són completament diferents segons ens trobem en el domini del camp directe o del camp reverberant. Recordem que, precisament per separar tots dos casos, es defineix el concepte de **distància crítica (D_c) com la distància en la qual el nivell del camp directe generat per la font s'igualava amb el nivell del camp reverberant de la sala.**

Així, la contribució conjunta de tots dos nivells (directe i reverberant) ve donada per la següent expressió:

$$L_p(r) = 10 \log \left(\frac{W_s \rho c \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)}{(2 \cdot 10^{-5})^2} \right) \quad (18)$$

a on $L_p(r)$ és el nivell de pressió sonora (en dB, o dB_{SPL}) en funció de la distància a la font (r , expressada en m); W_s és la potència acústica de la font (en W); ρ és la densitat mitjana del medi ($\rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$); c és la velocitat del so ($c = 345 \text{ m/s}$); Q és el factor de directivitat de la font, o conjunt de fonts, en la direcció considerada (adimensional); i R és la constant de la sala (en m^2).

Recordem, també, que la **constant de la sala (R)** depèn de la superfície total (S_T , en m^2) i del coeficient d'absorció acústica mitjà de la sala ($\bar{\alpha}$, adimensional):

$$R = \frac{S_T \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (19)$$

Quan s'igualen els dos termes corresponents al camp directe ($\frac{Q}{4\pi r^2}$) i al camp reverberant ($4/R$), obtenim justament la **distància crítica**:

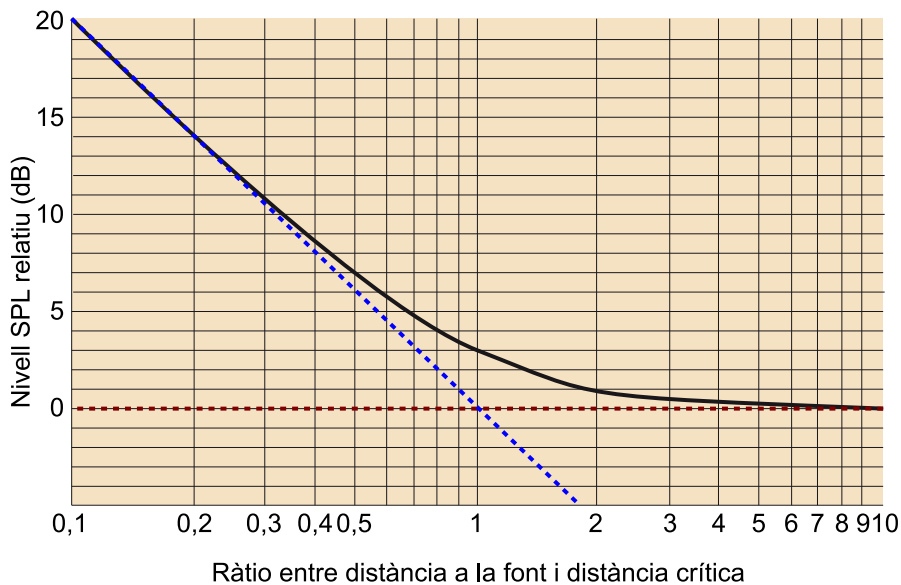
$$\frac{Q}{4\pi D_c^2} = \frac{4}{R} \rightarrow D_c = 0,14\sqrt{QR} \quad (20)$$

Finalment, si volem expressar la distància crítica en funció de l'índex de directivitat (DI) de la font, o conjunt de fonts, podem escriure (la relació entre Q i DI està definida a l'apartat 2.2):

$$D_c = 0,14\sqrt{R10\left(\frac{DI}{10}\right)} \quad (21)$$

A la figura 12, es mostra el diagrama d'atenuació del so en funció de la distància a la font en un entorn reverberant. **L'encreuament de les dues asímptotes és la distància crítica**, és a dir, allí on s'igualen l'atenuació per distància (línia blava) i el nivell del camp reverberant (línia vermella). La gràfica mostra també la suma d'ambdues contribucions (línia negra), la qual il·lustra que **el nivell a la distància crítica és 3 dB superior a les contribucions individuals**.

Figura 12. Atenuació de la pressió sonora en funció de la distància en entorn reverberant. En la distància crítica ($r/D_c = 1$), les contribucions del nivell directe (línia blava) i del nivell reverberant (línia vermella) són iguals i donen lloc a un augment de pressió de 3 dB (nivell directe + reverberant: línia negra)



2.2. Directivitat dels transductors

Com acabem de veure, per al càlcul de la distància crítica és imprescindible conèixer el factor de directivitat (Q , en el seu defecte, l'índex de directivitat) de la font en la direcció considerada. En primer lloc, interessa calcular el valor

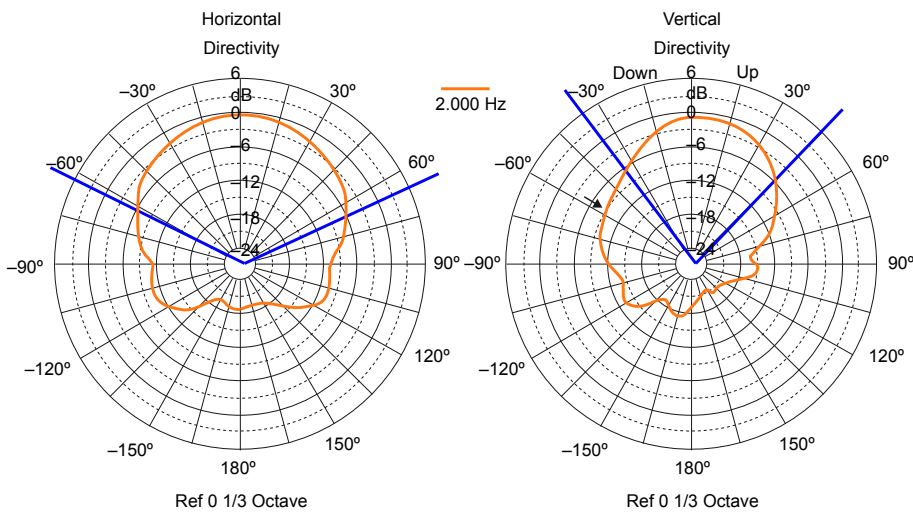
del factor de directivitat en la direcció axial, és a dir, en l'eix principal de la font. I succeeix que, en la pràctica, hi ha diferents mètodes per determinar aquest valor.

Un dels mètodes més útils és el basat en una **aproximació a partir dels angles de cobertura horitzontal i vertical a -6 dB**, angles que solen venir directament proporcionats pel fabricant o que es poden derivar a partir dels diagrames polars (veure figura 8). És important tenir en compte que aquesta aproximació suposa que tota l'energia acústica queda limitada a aquests angles de cobertura. Així doncs, segons aquesta aproximació, l'expressió que permet determinar el **factor de directivitat (Q)** d'un dispositiu en funció de la seva cobertura o dispersió és la següent:

$$Q = \frac{180^\circ}{\arcsin\left(\sin\frac{\theta_H}{2} \sin\frac{\theta_V}{2}\right)} \quad (22)$$

essent θ_H i θ_V els angles de cobertura horitzontal i vertical, respectivament, a -6 dB.

Figura 13. Diagrames polars de directivitat horitzontal i vertical a 2 kHz d'un model comercial d'altaveu per a reforç sonor



Font: <http://www.dasaudio.com/p/arco-4/>.

A la figura 13 es mostra un exemple real de diagrames polars de directivitat d'un model real d'altaveu per a reforç sonor. S'observa que l'angle de cobertura s'obté a on el diagrama polar creua la línia dels -6 dB. En aquest cas, els angles de cobertura horitzontal i vertical són, aproximadament, $\theta_H = 130^\circ$ i $\theta_V = 80^\circ$. Per tant, segons l'expressió (22), el factor de directivitat d'aquest altaveu és el següent:

$$Q = \frac{180^\circ}{\arcsin\left(\sin\frac{130^\circ}{2} \sin\frac{80^\circ}{2}\right)} \cong 5,1 \quad (23)$$

En la pràctica, també s'usa molt sovint el denominat **índex de directivitat** (DI), que no és sinó el **factor de directivitat expressat en unitats logarítmiques** (dB):

$$DI = 10 \log Q \quad (24)$$

Així, podem expressar fàcilment en dB la directivitat de l'altaveu de l'exemple de la figura 13:

$$DI = 10 \log 5,1 \cong 7,1 \text{ dB} \quad (25)$$

Recordem que aquest índex de directivitat que acabem d'obtenir aquí fa referència a l'eix principal de l'altaveu, però, en tot cas, podem obtenir el DI corresponent a qualsevol direcció simplement observant el diagrama polar i restant-li al DI en l'eix els dB que s'atenuen en la direcció contemplada. En l'exemple, si ens interessa conèixer el DI a, posem per cas, -60° en l'eix vertical (és a dir, a 60° en direcció cap avall), observem el diagrama polar vertical i llegim que a -60° l'atenuació és de 9 dB (veure fletxa en el diagrama). Així, l'índex de directivitat a -60° és:

$$DI_{-60} \cong 7,1 - 9 = -1,9 \text{ dB} \quad (26)$$

2.3. PAG en espais tancats

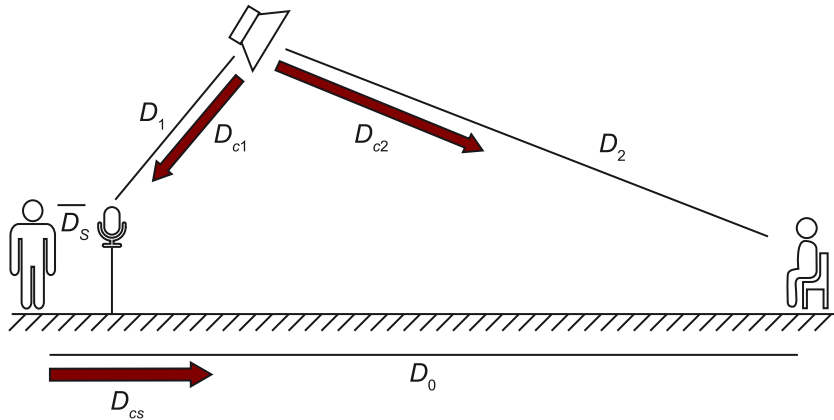
Ara ja estem en condicions de definir i calcular el PAG en el context d'un espai tancat. Per simplificar l'estudi i per acotar-ho als casos realitzables en la pràctica, farem les dues suposicions següents:

- Més enllà de tres vegades la distància crítica ($r > 3D_c$), la pressió sonora que produeix una font és constant i el seu valor és el del camp reverberant, que és uniforme en tota la sala.
- Per a distàncies inferiors a un terç de la distància crítica ($r < 3D_c$), es compleix la llei quadràtica inversa, tal com l'apliquem en l'estudi en espais oberts.

Per tant, l'estudi en espais tancats és molt diferent segons les distàncies de l'oient i del micròfon respecte a les fonts (locutor i altaveu). En primera instància, cal definir les distàncies crítiques de les fonts en cada direcció rellevant:

D_{cs} , D_{c1} i D_{c2} .

Figura 14. Distàncies crítiques implicades en el disseny d'un reforç sonor en interiors



- D_{cs} : distància crítica associada a la distància **locutor-oient** (D_0).
- D_{c1} : distància crítica associada a la distància **altaveu-micròfon** (D_1).
- D_{c2} : distància crítica associada a la distància **altaveu-oient** (D_2).

A continuació, es presenta el conjunt de les **condicions que determinen que el sistema de reforç sonor en un espai tancat és necessari**, o que almenys ho és d'entrada:

- Tant el micròfon com l'oient estan en el camp reverberant de l'altaveu.
- L'oient està també en el camp reverberant del locutor.
- El micròfon està molt prop del locutor, per tant, està en el seu camp directe.

Donades aquestes condicions, formalment podem afirmar que:

$$\begin{aligned} D_0 &> D_{cs} \\ D_s &< D_{cs} \\ D_1 &> D_{c1} \\ D_2 &> D_{c2} \end{aligned} \quad (27)$$

D'aquests fets es deriva que **els nivells en l'oient i en el micròfon amb la megafonia connectada coincideixen amb el nivell reverberant a la sala**.

El nivell màxim tolerat en el micròfon serà també el nivell màxim que pot arribar a l'oient (L_{OC}), el qual, a fi d'evitar la realimentació, serà 6 dB inferior al nivell que rep el micròfon provinent del locutor (L_{ML}):

$$L_{OC} = L_{ML} - 6 \text{ dB} \quad (28)$$

D'altra banda, el nivell que arriba a l'oient amb la megafonia desconnectada (L_{OD}) és el nivell reverberant a causa del locutor. Sabem que **el nivell en qualsevol lloc del camp reverberant és igual a la contribució del camp directe just a la distància crítica** (veure intersecció de les asíptotes de la figura 12). Així, mitjançant l'equació (3), podem calcular el nivell uniforme en tot el

camp reverberant a partir del nivell del camp directe a una distància coneguda (sabem que el locutor produeix un nivell L_{ML} a D_s , que és la distància a la qual es troba del micròfon) i de la distància crítica (D_{cs}):

$$L_{OD} = L_{ML} + 20 \log D_s - 20 \log D_{cs} \quad (29)$$

Recordem que el PAG es defineix justament com la diferència entre L_{OC} i L_{OD} (el marge de seguretat de 6 dB ja s'ha contemplat en el càlcul de L_{OC}). Per tant, l'expressió de el PAG en un espai tancat és la següent:

$$PAG = L_{OC} - L_{OD} = 20 \log D_{cs} - 20 \log D_s - 6 \text{ dB} \quad (30)$$

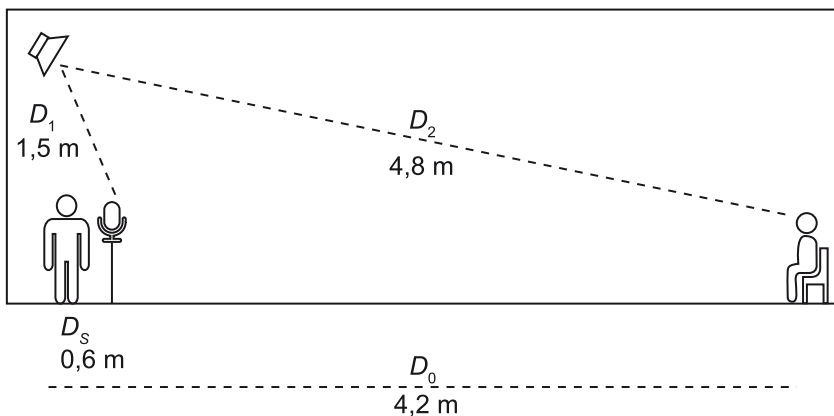
Convé notar que, en aquest cas, no cal tenir en compte la directivitat de l'altaveu, ja que tant l'oient com el micròfon estan en el camp reverberant de la sala. Sí es podria considerar el desavantatge que suposa que el locutor no parli en l'eix de major sensibilitat del micròfon si aquest fos directiu, tal com vam fer en l'equació (12) de l'apartat 1.3.

A continuació, en els dos subapartats següents, s'estudia la necessitat i l'efecte d'un sistema de reforç sonor en dos escenaris concrets: una sala petita (subapartat 2.3.1) i una sala mitjana-gran (subapartat 2.3.2).

2.3.1. Escenari 1: sala petita

Considerem una sala petita de dimensions 6 m x 4,5 m x 2,7 m (longitud x amplària x alçària), el coeficient d'absorció acústica mitjà de la qual és $\bar{\alpha} = 0,2$ i en la qual es presenta la distribució d'elements il·lustrada en la figura 15.

Figura 15. Diagrama de distàncies de l'escenari 1



En primer, lloc la superfície total de la sala és:

$$S_T = 2(6 \cdot 4,5) + 2(6 \cdot 2,7) + 2(4,5 \cdot 2,7) = 110,7 \text{ m}^2 \quad (31)$$

Així, mitjançant l'equació (19), podem calcular la constant de la sala:

$$R = \frac{110,7 \cdot 0,2}{1 - 0,2} \cong 27,68 \text{ m}^2 \quad (32)$$

A continuació, anem a calcular les distàncies crítiques implicades en aquest escenari.

L'índex de directivitat d'un locutor està estandarditzat en $DI = 3 \text{ dB}$. Per tant, mitjançant l'equació (21), veiem que la distància crítica que hi ha entre el locutor i l'oient (D_{cs}) és:

$$D_{cs} = 0,14 \sqrt{27,68 \cdot 10^{\left(\frac{3}{10}\right)}} \cong 1,04 \text{ m} \quad (33)$$

Per la seva banda, **en estar col·locat just a l'aresta de dues parets, l'altaveu, que és omnidireccional, té un $DI = 6 \text{ dB}$,** per tant, els valors de les distàncies crítiques altaveu-micròfon (D_{c1}) i altaveu-oient (D_{c2}) coincideixen:

$$D_{c1} = D_{c2} = 0,14 \sqrt{27,68 \cdot 10^{\left(\frac{6}{10}\right)}} \cong 1,47 \text{ m} \quad (34)$$

Ara ja estem en condicions d'estudiar la necessitat i l'efecte del reforç sonor en aquest escenari. A aquest efecte, el procés de raonament a realitzar consta de tres passos.

1) Pas 1

Comencem considerant el sistema desconnectat. Encara que el problema pot resoldre's usant únicament nivells relatius, anem a emprar valors típics de pressió sonora per fer que el desenvolupament sigui més intuïtiu. Començarem calculant el nivell que rep el micròfon produït pel locutor (L_{ML}), que serà el nivell total que rebí el micròfon, ja que el sistema està desconnectat.

El micròfon està situat a 60 cm del locutor (r). Pel mateix raonament que vam fer en l'equació (15), es considera que, a aquesta distància, el camp directe de la veu produeix un nivell estàndard d'uns $70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$. Atès que la distància crítica locutor-oient (D_{cs}) és d'uns 1,04 m, veiem que la ràtio d'ambdues distàncies és:

$$r/D_{cs} = 0,6/1,04 \cong 0,58 \quad (35)$$

Si ens fixem ara en la figura 12, veiem que aquesta ràtio pertany a la zona de transició entre les contribucions del nivell directe i el nivell reverberant; és a dir, que **el micròfon està situat a la zona de transició entre els camps directe i el reverberant del locutor**. Concretament, en la figura 12 s'observa que el nivell combinat directe + reverberant per a aquesta ràtio és aproximadament

1 dB superior a la contribució del camp directe. D'aquesta manera, després d'haver assumit un nivell de 70 dB_{SPL} en camp directe, podem afirmar que el nivell total en el micròfon serà:

$$L_{ML} = 70 \text{ dB}_{\text{SPL}} + 1 \text{ dB} = 71 \text{ dB}_{\text{SPL}} \quad (36)$$

Seguidament, i mitjançant un raonament anàleg a l'anterior, anem a calcular el nivell que rep l'oient produït pel locutor sense reforç sonor (L_{OD}).

L'oient està a 4,2 m del locutor (D_0), una distància més de 3 vegades superior a la distància crítica locutor-oient (D_{cs}). Per tant, i a diferència del micròfon, l'oient es troba plenament immers en el camp reverberant del locutor. Així, sabent que el locutor produeix 70 dB_{SPL} a 0,6 m i que $D_{cs} \cong 1,04 \text{ m}$, l'equació (29) ens permet calcular el nivell que arriba a l'oient:

$$L_{OD} = 70 \text{ dB}_{\text{SPL}} + 20 \log 0,6 - 20 \log 1,04 \cong 65,22 \text{ dB}_{\text{SPL}} \quad (37)$$

2) Pas 2

Ara considerem que el sistema de reforç està connectat. Per l'equació (5), sabem que en el llindar de realimentació el nivell sonor produït per l'altaveu en el micròfon (L_{MA}) serà de 71 dB_{SPL} ($L_{MA} = L_{ML}$). Sabem que la distància altaveu-micròfon és $D_1 = 1,5 \text{ m}$ i, a més, per l'equació (34), sabem també que $D_{c1} \cong 1,48 \text{ m}$, ja que $D_1 \cong D_{c1}$, en aquest cas tenim una ràtio $r/D_{cs} \cong 1$, de manera que, recorrent de nou a la figura 12, sabem que la contribució del camp directe de l'altaveu a aquesta distància serà uns 3 dB inferior als 71 dB_{SPL} abans esmentats, és a dir, serà d'uns 68 dB_{SPL}.

Per la seva banda, l'oient es troba plenament immers en el camp reverberant de l'altaveu: la distància altaveu-oient és $D_2 = 4,8 \text{ m}$ i, per l'equació (34), sabem que $D_{c2} \cong 1,47 \text{ m}$, de manera que es compleix que $D_2 > 3D_{c2}$. Sabem també, per tant, que el nivell que rep l'oient amb el sistema connectat (L_{OC}) és degut únicament al nivell reverberant, el qual, al seu torn, és igual a la contribució del camp directe de l'altaveu a la distància crítica. Per tant, el nivell que percep l'oient és precisament $L_{OC} = 68 \text{ dB}_{\text{SPL}}$.

3) Pas 3

Havent calculat ja L_{OC} i L_{OD} , podem calcular el PAG a partir de la seva mateixa definició:

$$PAG = L_{OC} - L_{OD} \cong 68 \text{ dB}_{\text{SPL}} - 65,22 \text{ dB}_{\text{SPL}} = 2,78 \text{ dB} \quad (38)$$

Òbviament, amb un PAG tan baixa no val la pena implementar un sistema de reforç.

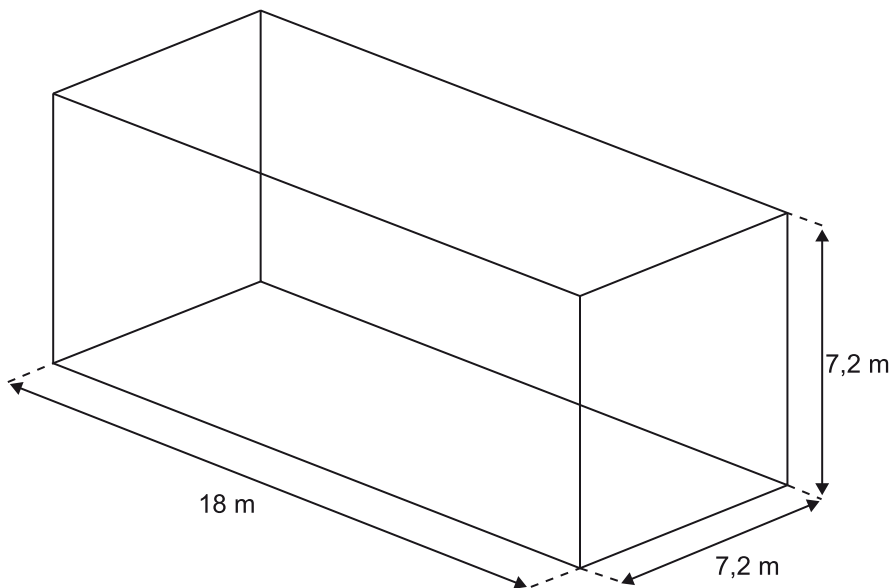
Per tractar d'augmentar el PAG, podríem apropar el micròfon al locutor i emprar transductors directius. Suposem que aconseguíssim augmentar el PAG fins a 9 dB. Tot i així, en la pràctica hem de respectar sempre el marge de seguretat abans de la realimentació de 6 dB, de manera que nostra PAG seguiria sent d'uns escassos 3 dB.

Els càlculs d'aquest primer exemple demostren el que ja podíem intuir des d'un principi: **en una sala tan petita, on una persona pot generar 65 dB_{SPL} en qualsevol punt de la mateixa, un sistema de reforç és innecessari**, ja que no aporta beneficis en la pràctica.

2.3.2. Escenari 2: sala mitjana-gran

Considerem un cas més típic, en el qual fem un reforç sonor en una sala més gran; concretament, a la sala descrita en la figura 16, que té una superfície total de 622,08 m² i un coeficient d'absorció acústica mitjà $\bar{\alpha} = 0,15$.

Figura 16. Recinte de grandària mitjana, amb sostre relativament alt



Considerarem una distribució d'elements similar a la plantejada en la figura 7, amb $D_0 = 12$ m, $D_1 = 5,4$ m, $D_2 = 13,2$ m, $D_s = 0,6$ m i $\theta_A = 60^\circ$. A més, el DI de l'altaveu és de 9 dB i el micròfon és omnidireccional.

En primer lloc, calculem la constant de la sala mitjançant l'equació (19):

$$R = \frac{622,08 \cdot 0,15}{1 - 0,15} \cong 109,78 \text{ m}^2 \quad (39)$$

Atès que l'altaveu és directiu, hem de calcular la seva distància crítica en les direccions concretes que ens interessin. En la direcció principal, que apunta a l'oient, l'altaveu té un DI de 9 dB. La distància crítica en aquesta direcció és la següent:

$$D_{c2} = 0,14 \sqrt{109,78 \cdot 10^{\left(\frac{9}{10}\right)}} \cong 4,13 \text{ m} \quad (40)$$

Suposem que el DI en la direcció D_1 és de -3 dB, en el qual cas obtenim:

$$D_{c1} = 0,14 \sqrt{109,78 \cdot 10^{\left(\frac{-3}{10}\right)}} \cong 1,04 \text{ m} \quad (41)$$

Així mateix, assumim que el locutor té un DI de 3 dB en direcció frontal, per tant:

$$D_{cs} = 0,14 \sqrt{109,78 \cdot 10^{\left(\frac{3}{10}\right)}} \cong 2,07 \text{ m} \quad (42)$$

A partir d'aquestes distàncies crítiques, observem que es compleixen les quatre condicions exposades en l'equació (27). Per tant, estem en un cas molt diferent al de l'escenari anterior (sala petita), la qual cosa al seu torn ens indica que, en un principi, el sistema de reforç serà necessari i efectiu en aquest escenari (sala mitjana-gran).

A continuació, calcularem el PAG, que, com sempre, serà la diferència entre L_{OC} i L_{OD} .

1) Pas 1

Considerem el sistema desconnectat. La distància crítica del locutor ($D_{cs} \cong 2,09 \text{ m}$) és molt superior a la distància del micròfon al locutor ($D_s = 0,6 \text{ m}$). Per tant, **el micròfon està totalment immers en el camp directe del locutor**. En canvi, **l'oient es troba plenament immers en el camp reverberant del locutor**: la distància locutor-oient és $D_0 = 12 \text{ m}$, de manera que es compleix sobradamente que $D_0 > 3D_{cs}$.

Si assignem un valor arbitrari de 70 dB_{SPL} en el micròfon a causa del locutor (D_s), podem deduir, aplicant el mateix raonament que anteriorment ja vam aplicar en les equacions (29) i (37), que el nivell directe a la distància crítica (D_{cs}) serà:

$$70 \text{ dB}_{\text{SPL}} + 20 \log 0,6 - 20 \log 2,07 \cong 59,24 \text{ dB}_{\text{SPL}} \quad (43)$$

Aquest valor coincideix amb la magnitud del camp reverberant en tota la sala i, per tant, el nivell que rep l'oient amb la megafonia desconnectada ($L_{OD} \cong 59,24 \text{ dB}_{\text{SPL}}$).

2) Pas 2

A continuació, considerem el sistema connectat, i fem el mateix raonament respecte de l'altaveu i veiem que **tant el micròfon com l'oient es troben plenament immersos en el camp reverberant de l'altaveu** ($D_1 > 3D_1$ i $D_2 > 3D_2$).

La condició de realimentació ens dicta que el nivell total produït per l'altaveu en el micròfon no pot superar el nivell que produeix el locutor (en el nostre cas, $70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$). I aquest és el mateix nivell que rebirà l'oient per part de l'altaveu, ja que tots dos estan en el camp reverberant, per tant, $L_{OC} = 70 \text{ dB}_{\text{SPL}}$.

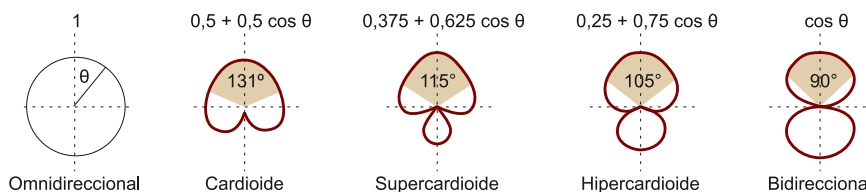
3) Pas 3

Obtinguts aquests valors, podem calcular el PAG a partir de la seva definició ($L_{OC} - L_{OD}$) i aplicant-li el marge de seguretat de 6 dB, amb el que obtenim un valor de PAG petit, però perceptible:

$$PAG = L_{OC} - L_{OD} - 6 \text{ dB} \cong 70 \text{ dB}_{\text{SPL}} - 59,16 \text{ dB}_{\text{SPL}} - 6 \text{ dB} = 4,84 \text{ dB} \quad (44)$$

Per finalitzar l'estudi d'aquest cas, introduïm una variant en l'escenari. D'entrada, hem suposat que el nostre micròfon és omnidireccional. Què succeeix si ho substituïm per un cardioide? Recordem ràpidament els patrons directius dels diferents tipus de micròfons (figura 17) i observem els seus índexs de directivitat típics aproximats (taula 2).

Figura 17. Comparació de patrons directius de diferents tipus de micròfon. La zona rosada i l'angle indicat indiquen la cobertura a -3 dB



Taula 2. Índex de directivitat per a diferents tipus de micròfon

	Omnidireccional	Cardioide	Supercardioide	Hipercardioide	Bidireccional
DI [dB]	0	4,8	5,7	6	4,8

Referent a això, cal contemplar dos efectes:

- Des del punt de vista del micròfon, l'altaveu està «fora d'eix», així que, en principi, haurà de captar menys nivell provinent d'ell, la qual cosa suposa

un avantatge. No obstant això, **el fet que el micròfon estigui en el camp reverberant de l'altaveu anul·la aquest avantatge, ja que el micròfon capta el seu so des de totes les direccions.**

- Així i tot, **el micròfon sí està en el camp directe del locutor** i, sent el micròfon cardiode, té un *DI* d'uns 4,8 dB (taula 2). Recuperant l'equació (12), aquest *DI* pot sumar-se directament a el PAG obtinguda en l'equació (44), amb el que **la nova PAG seria d'uns 9,64 dB.**

Finalment, recordem que una manera també efectiva d'augmentar el PAG és apropant el micròfon el màxim possible al locutor (tal com ja vam veure al final de l'apartat 1.4).

2.4. NAG en espais tancats

De la mateixa manera que en el cas dels espais oberts (veure apartat 1.4), podem fer el mateix raonament respecte de la NAG per al cas d'espais tancats. En l'escenari del subapartat 2.3.2 (sala mitjana-gran), hem obtingut un PAG d'uns 9,64 dB. El que ara interessa és saber si aquest valor és suficient o insuficient per a l'aplicació en qüestió.

A aquest efecte, utilitzarem com a criteri l'EAD, que escollirem en funció del tipus d'entorn en el qual ens trobem (veure taula 1). Igual que en espais oberts, en espais tancats també interessa que el PAG sigui igual o superior a la NAG ($PAG \geq NAG$), però hem de tenir en compte que l'expressió de la NAG es modifica en espais tancats, ja que a partir de la distància crítica considerem el camp sonor uniforme. Així, la NAG en espais tancats es calcula com:

$$NAG = 20 \log D_{cs} - 20 \log EAD \quad (45)$$

Posem primer per cas, doncs, que ens trobem en un teatre silenciós, on l'EAD requerida és de 6 metres. En el cas que ens ocupa ($D_{cs} \cong 2,07$ m), la NAG resultant és:

$$NAG = 20 \log 2,07 - 20 \log 6 \cong -9,24 \quad (46)$$

Obtenim una **NAG negativa**. No es tracta de cap error, sinó que indica que **no és necessari cap reforç sonor**. En una sala tan silenciosa, el locutor ja genera el suficient nivell a la distància crítica com perquè a tota la sala hi hagi un nivell més que adequat.

Suposem ara que, en lloc d'un teatre silenciós, es tracta d'una fàbrica amb un nivell de soroll molt elevat que requereix una EAD de 0,5 metres. En aquest cas, la NAG resultant és:

$$NAG = 20 \log 2,07 - 20 \log 0,5 \cong 12,34 \quad (47)$$

En aquest cas, veiem que $NAG > PAG$, la qual cosa indica que **el sistema no podrà funcionar en la pràctica, ja que ens limita la realimentació.**

Com a conclusió, podem afirmar que, **perquè un sistema de reforç funcioni correctament en espais tancats**, l'EAD ha de complir que:

$$2D_s < EAD < D_{cs} \quad (48)$$

Tots dos límits garanteixen el següent:

- $EAD > 2D_s$: condició per **evitar realimentació.**
- $EAD < D_{cs}$: condició que determina que **cal reforç sonor.**

Si l'EAD requerida és inferior a $2D_s$, no es pot dissenyar el sistema amb un sol altaveu, sinó que ha d'implementar-se un sistema amb altaveus distribuïts, el disseny dels quals s'estudia en la secció 4 d'aquest mòdul.

3. Sistemes d'altaveus per a reforç sonor

Per al reforç sonor es poden emprar diferents configuracions d'altaveus, depenent de diversos factors. Les configuracions més habituals són el clúster central, el clúster dividit, o clúster partit, i el sistema distribuït.

Un clúster és un altaveu o conjunt d'altaveus amb els seus respectius woofers i tweeters concentrats en un únic lloc de l'espai.

Depenent dels requeriments de potència i cobertura, haurem d'agrupar diversos altaveus per aconseguir el resultat desitjat. Al llarg d'aquesta secció, així com de la secció 4, es descriuen algunes d'aquestes configuracions amb les seves aplicacions típiques:

- El **clúster central** (apartat 3.1).
- Variacions del clúster central, com el **clúster partit** i el **clúster LCR** (apartat 3.2).
- **Sistemes distribuïts** d'altaveus (secció 4).

3.1. El clúster central

El clúster central és una agrupació d'altaveus, més o menys complexa, situada en un lloc centrat i enfocat a l'audiència. Tradicionalment, un clúster central es situa **damunt de l'escenari, o damunt de la posició habitual del micròfon.**

En situar el clúster per sobre del públic, es minimitza la diferència entre les distàncies del clúster a l'oient més proper i al més allunyat, la qual cosa facilita el poder garantir una bona cobertura per a tota l'audiència. Així i tot, **l'alçària d'un clúster central no ha de superar els 10-12 metres sobre els oients**, ja que, en aquest cas, els espectadors més propers a l'escenari sentiran la veu natural del locutor i el so amplificat, essent aquest un efecte molt molest.

L'audició humana discrimina millor la localització sonora en angles azimuthals (esquerra-dreta) que en angles d'elevació (a dalt - a baix). Així, encara que el clúster central es trobi més elevat que el locutor, l'oient tindrà la impressió que el so emana de l'escenari i no del clúster.

Un últim avantatge del clúster central és que gairebé sempre és **menys costós que un sistema distribuït**, en intervenir menys altaveus i en ser la seva infraestructura associada més senzilla.

Figura 18. Exemple real de clúster central format per sis altaveus enfocats a l'audiència



En alguns recintes, el sostre és massa baix per garantir el funcionament d'un sistema de clúster central, perquè el PAG no és suficient i entrariem en realimentació.

Com a regla general, s'ha de complir que, perquè el sistema de clúster central funcioni, D_2 no ha de ser major que quatre vegades D_1 ($D_2 \leq 4D_1$).

Com a conseqüència d'aquesta regla general:

- Si ens atenim a l'alçària màxima de 12 metres abans comentada, la profunditat del recinte haurà de ser menor de 50 metres perquè el sistema funcioni.
- En els casos en els que l'espectador mai escolti la veu natural del locutor, es pot ignorar la limitació de 12 metres d'alçària. Aquest cas es dona, per exemple, en grans recintes esportius.

Així mateix, en ocasions pot succeir que un criteri estètic impedeixi la col·locació d'un clúster central. Per exemple, podria tapar elements arquitectònics en recintes religiosos o enlletgir un conjunt de valor històric.

3.2. Variacions del clúster central

En espais llargs amb sostres relativament baixos, sol instal·lar-se un segon (o fins i tot un tercer) clúster. El segon clúster es col·loca a una certa distància endinsant-nos a la sala i el seu senyal d'àudio es retarda electrònicament per sincronitzar-se temporalment amb el so que arriba del primer clúster,

a fi que els oients més allunyats no percebin les dues fonts per separat. El segon clúster té l'efecte de dividir acústicament el recinte en dues parts, de manera que el primer clúster solament ha de cobrir un espai la meitat de profund.

3.2.1. El clúster partit

Una manera de configurar un sistema de reforç preservant estèticament l'espai central consisteix a **partir el clúster en dues meitats, a esquerra i dreta de l'escenari** (clúster partit en configuració LR, *left-right*), tal com s'il·lustra a la figura 19.

Figura 19. Un teatre amb un reforç sonor simple LR (*left-right*)



Desgraciadament, aquesta configuració pot provocar fàcilment *comb filtering* a les zones de l'audiència en les quals es solapen les cobertures dels dos clústers. El nociu efecte del *comb filtering* és especialment rellevant quan es tracta de senyals monofònics, com el senyal de micròfon d'un locutor que s'amplifica per igual en els dos altaveus.

No obstant això, per a la reproducció de música, es requereix, com a mínim, d'una parella de clústers esquerre i dret per reproduir en estèreo. En aquest cas, perquè l'audiència percebi l'estereofonia, no solament és desitjable, sinó necessari, que les cobertures dels dos clústers es solapen en certa mesura.

En conclusió, **una configuració LR serveix per a la reproducció musical**, però resulta problemàtica per a la reproducció de senyals de veu, ja que **un oient no centrat escoltarà simultàniament dues versions desfasades del mateix senyal**.

3.2.2. El clúster LCR

És a causa de la problemàtica que presenta la configuració LR que molts dissenys es basen directament en una configuració LCR de tres clústers (*left-center-right*). A la figura 20, es pot veure un exemple real d'aquest tipus de disseny.

Figura 20. Teatre amb una configuració d'altaveus (*left-center-right*). Es tracta del Fox Performing Arts Center, a Califòrnia. En aquest cas, els clústers són *line arrays* del fabricant JBL. Els *arrays* esquerre i dret reproduïen música, mentre que l'*array* central reproduïx veu



Font: <http://www.sound-image.com/fox-performing-arts-center-upgrades-audio-system-with-jbl-vertec-line-arrays/> (Fox Performing Arts Center); <http://www.jblpro.com/www/products> (JBL).

El clúster LCR és una opció adequada per a auditoris polivalents en els quals s'ha de poder reproduir tant veu com música (conferències, representacions, concerts, etc.). En aquests sistemes, és desitjable que en qualsevol punt de l'audiència es pugui sentir cadascun dels tres clústers.

Generalment, aquesta configuració respon a la següent repartició de senyals:

- El clúster central s'encarrega de reproduir els senyals de veu.
- Els clústers esquerre i dret s'usen bàsicament per reproduir música.

4. Reforç sonor en espais tancats amb fonts distribuïdes

Existeixen molts tipus de sistemes amb altaveus distribuïts, però tots estan definits per una característica comuna.

Un sistema distribuït és aquell en que els altaveus es col·loquen de llarg a llarg de tota l'audiència amb la finalitat de cobrir uniformement tota la superfície, a diferència d'un clúster central, on els altaveus estan concentrats en un sol punt.

Atès que garanteix que qualsevol oient està més o menys a la mateixa distància d'un altaveu, un sistema distribuït pot proporcionar una **cobertura molt uniforme**. A més, si el sistema està ben dissenyat, **la possibilitat de realimentació és molt baixa** i, atès que cada oient està relativament a prop d'un altaveu (D_2 es redueix), la ràtio directe/reverberant és elevada i, en conseqüència, es millora la intel·ligibilitat. Per aquest motiu, és molt habitual l'ús de sistemes distribuïts per a aplicacions en les que la intel·ligibilitat de la paraula és vital.

No obstant això, un problema habitual d'aquest tipus de sistemes consisteix en que els oients perceben que el so prové de damunt dels seus caps. És a dir, **la localització natural del so que es preserva amb un clúster central no es pot proporcionar amb un sistema distribuït**. Així i tot, normalment, aquest és un **problema menor** i se pot minimitzar mitjançant l'ús de **retards electrònics**.

En ocasions, un sistema distribuït s'ha de col·locar en un **recinte molt voluminós i amb un temps de reverberació elevat**. Un bon exemple seria un recinte firal o un aeroport. En aquests casos, el sistema es sol emprar per reproduir missatges parlats (*paging*) o per proporcionar música ambiental, que són aplicacions en les que la localització de la font és irrellevant. **Els problemes de soroll i reverberació que presenten aquests recintes es poden minimitzar usant una densitat d'altaveus adequada i mitjançant una equalització que emfatitzi les freqüències de la parla**.

Un altre motiu per preferir l'ús de sistemes distribuïts, és que permeten una **major flexibilitat en l'ús de la sala enfront de sistemes amb clúster central**. En alguns recintes polivalents, la posició de l'escenari pot canviar o fins i tot es pot arribar a prescindir d'un escenari. El sistema distribuït permet **col·locar el micròfon en qualsevol lloc i, tot i així, aconseguir una cobertura de so uniforme en tot el recinte**. Així mateix, en grans recintes, es poden des-

connectar els altaveus situats en zones no usades en aquest moment, la qual cosa evita provocar camp reverberant innecessari, millorant així la intel·ligibilitat.

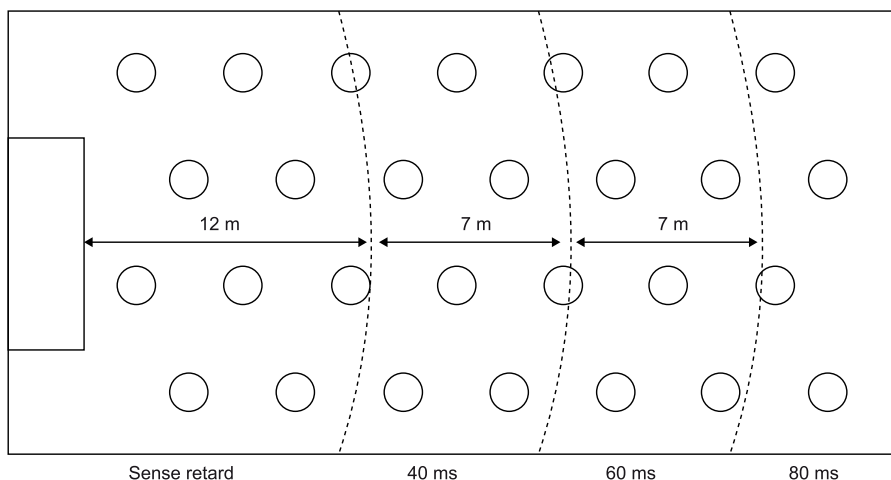
El principal desavantatge d'un sistema distribuït és el seu elevat cost en relació amb una solució basada en clúster central.

4.1. Altaveus de sostre

Els altaveus de sostre s'instal·len normalment en espais amb sostres baixos, en els quals un clúster central no pot donar una cobertura satisfactòria. En general, tots els altaveus es poden alimentar amb el mateix senyal en una línia de 100 V o, si així es desitja, agrupar-los per zones i tenir la possibilitat d'enviar diferents senyals a diferents zones.

En la figura 21, s'il·lustra, a mode d'exemple, una sala d'uns 550 m² de sòl (i, per tant, també de sostre) coberta amb 28 altaveus de sostre. El disseny consta de quatre grups d'altaveus segons la seva distància a l'escenari.

Figura 21. Distribució d'altaveus en una sala d'aproximadament 550 m² de sòl. Es creen quatre grups d'altaveus per aplicar retards diferents a cadascun d'ells



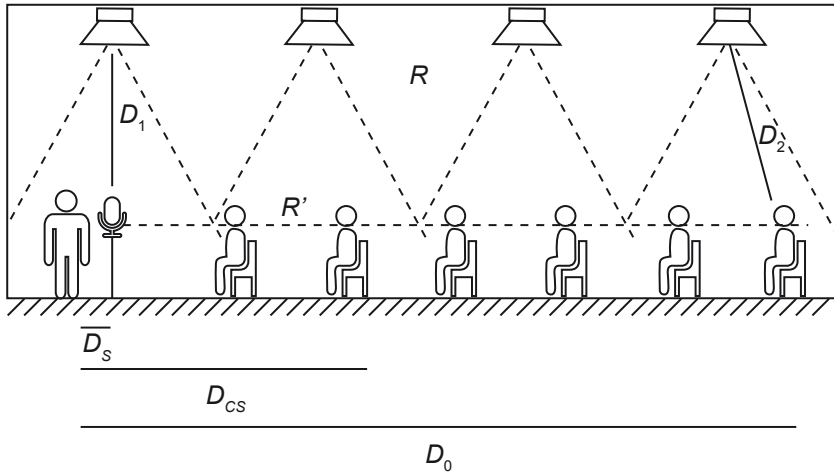
Per conservar cert grau de localització cap a la part frontal de la sala, el senyal és retardat progressivament a mesura que ens allunyem de l'escenari. D'aquesta manera, el senyal amplificat en qualsevol posició de la sala s'aconsegueix sincronitzar aproximadament amb el so creat en l'escenari.

En el disseny d'un sistema distribuït, els altaveus es situen de manera que les seves àrees de cobertura es vagin solapant, per garantir una cobertura uniforme. Si els altaveus estan massa separats, es produeix una caiguda de nivell entre altaveus, mentre que, si estan massa junts, es produeix un realç.

4.2. PAG en sistemes distribuïts

Per al càlcul de el PAG en el cas d'altaveus distribuïts, les distàncies D_1 i D_2 es consideren sempre respecte a l'altaveu més proper al micròfon i a l'oient, respectivament, tal i com es pot observar en la figura 22.

Figura 22. Distàncies rellevants per al càlcul de el PAG en un espai tancat amb altaveus distribuïts



Sol donar-se el cas que la zona de l'audiència presenta un coeficient d'absorció (α') bastant més elevat que el coeficient d'absorció acústica mitjà de la sala buida ($\bar{\alpha}$). En aquest sentit, hem de discernir entre dos valors (R i R') en calcular la constant de sala, tal i com seguidament es justifica:

$$R = \frac{S_T \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (49)$$

$$R' = \frac{S_T \bar{\alpha}}{1 - \alpha'} \quad (50)$$

on R és la constant de la sala estant la sala buida i R' és la constant de la sala estant l'audiència present.

Anem a assumir dues suposicions:

- Tant el micròfon com l'oient es troben en el camp reverberant creat per tota la megafonia.
- L'oient es troba també en el camp reverberant del locutor.

Si aquestes suposicions (que són bastant raonables) no es complissin, caldria replantejar les equacions i fer l'estudi corresponent.

Per al càlcul del nivell reverberant (L_{rev}) amb la megafonia enfocada a l'audiència i amb l'audiència present, cal considerar la potència acústica total produïda per tots els altaveus (W_{tot}) i el valor de constant de sala R' .

$$L_{rev} = 10 \log \left(\frac{W_{tot} \rho c}{R 10^{-10}} \right) \quad (51)$$

Donades les suposicions assumides, aquest nivell reverberant coincidirà amb el nivell que arriba a l'oient amb la megafonia connectada (L_{OC}). Tornant als raonaments realitzats anteriorment en l'equació (28) d'apartat 2.3, veiem que el valor màxim de L_{OC} per evitar la realimentació amb un marge de seguretat de 6 dB és el següent:

$$L_{OCmax} = L_{ML} - 6 \text{ dB} \quad (52)$$

Així mateix, i recuperant ara l'equació (29), veiem que amb el sistema desconectat es compleix el següent:

$$L_{OD} = L_{ML} + 20 \log D_s - 20 \log D_{cs} \quad (53)$$

És important notar que, a l'equació (53), D_{cs} es calcula a partir de la constant R i no de R' , ja que el locutor projecta la seva veu cap al conjunt de la sala, no únicament al pla d'audiència com sí fan els altaveus.

Finalment, i com sempre, obtenim el PAG a partir de la seva definició: la diferència entre L_{OC} i L_{OD} , havent tingut ja en compte el marge de seguretat de 6 dB en el càlcul de L_{OC} :

$$PAG = L_{OC} - L_{OD} = 20 \log D_{cs} - 20 \log D_s - 6 \text{ dB} \quad (54)$$

S'observa que l'equació (54) coincideix amb la (30), la qual cosa permet concloure el següent:

El PAG en un sistema distribuït és igual a el PAG per a un sol altaveu, o un clúster central, considerant sempre que:

- Les distàncies D_1 i D_2 es prenen respecte a l'altaveu més proper al micròfon i a l'oient, respectivament.
- Les distàncies crítiques es calculen amb els modificadors M i N , que es defineixen a continuació, en el subapartat 4.2.1.

4.2.1. Modificadors de la distància crítica

En els casos en que hi ha altaveus dirigits exclusivament a un pla d'audiència molt més absorbent que la resta de la sala, cal corregir la teoria estadística que ens permet calcular la distància crítica (D_c). A aquest efecte, es defineixen els modificadors M i N de la distància crítica.

Recuperem ara l'equació (20), que, recordem, permet calcular la distància crítica en funció del factor de directivitat (Q) de la font, o conjunt de fonts, i de la constant de la sala (R). Així, la nova equació per al càlcul de la distància crítica queda com segueix:

$$D_c = 0,14 \sqrt{\frac{Q \cdot R \cdot M}{N}} \quad (55)$$

El **modificador M** s'introdueix tenint en compte que el pla d'audiència rebrà directament tot el so de la megafonia i, si s'absorbeix la major part de l'energia incident, encara que la resta de la sala sigui molt reverberant, amb prou feines es produirà reverberació. De fet, es tracta d'una correcció a la teoria estadística, que en aquest cas fallaria per la **no homogeneïtat de l'absorció**. Aquest modificador ve definit per l'expressió següent:

$$M = \frac{1 - \bar{\alpha}}{1 - \alpha'} \quad (56)$$

a on, recordem, $\bar{\alpha}$ és el coeficient d'absorció mitjana de la sala buida i α' és el coeficient d'absorció de la zona de l'audiència estant l'audiència present.

Això equival a augmentar la distància crítica de manera que, si $\alpha' = 1$ (absorció total), la distància crítica seria infinita ($D_c \rightarrow \infty$), la qual cosa indicaria que no hi ha camp reverberant. Aquest augment de la distància crítica es pot interpretar com un augment virtual del factor de directivitat de l'altaveu (Q), o bé com un augment de la constant de sala. De fet, és important notar que el **modificador M és justament el factor que posa en relació les constants de sala R i R'** , definides respectivament en les equacions (49) i (50):

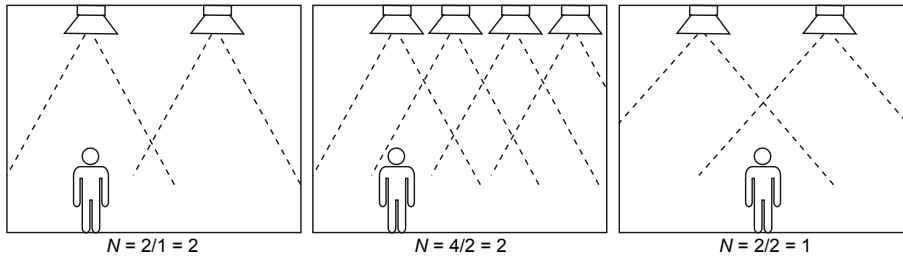
$$R' = R \cdot M = \frac{S_T}{1 - \bar{\alpha}} \cdot \frac{1 - \bar{\alpha}}{1 - \alpha'} = \frac{S_T}{1 - \alpha'} \quad (57)$$

a on, recordem, R és la constant de la sala estant la sala buida i R' és la constant de la sala estant l'audiència present.

El **modificador N** s'introdueix per considerar l'**augment del camp reverberant a mesura que incrementem el nombre d'altaveus**, i queda definit per la següent expressió:

$$N = \frac{W_{tot}}{W_{dir}} \quad (58)$$

a on W_{tot} representa la potència acústica total instal·lada a la sala i W_{dir} és la potència acústica de les fonts que radien directament sobre el punt considerat. Es considera que on punt de la sala rep so directe d'un altaveu determinat si es troba sota l'angle de cobertura del mateix. Així, en la figura 23 es poden veure tres exemples que il·lustren el càlcul del modificador N .

Figura 23. Càlcul del modificador N en tres exemples

Exemple 1

En una sala de dimensions 25 x 22 x 4 m (llargària x amplària x alçària), s'instal·len 28 altaveus tal i com es mostra a la figura 21. Degut al solapament en les cobertures dels altaveus, es considera que el valor del modificador N per a un oient qualsevol es de 28/4, mentre que per al micròfon, que està més apartat dels altaveus, es de 28/1. A més, les parets i el sostre de maó de la sala presenten un coeficient d'absorció acústica mitjà de 0,05, mentre que l'àrea de l'audiència (el sòl) presenta un coeficient d'absorció acústica de 0,7 quan està completament ocupada pel públic. Finalment, el locutor parla a 20 cm del micròfon.

Se demana calcular el PAG estimada per a aquest recinte.

Solució

Començarem calculant les distàncies crítiques D_{cs} , D_{c1} i D_{c2} , per tal de poder determinar si es compleixen o no les condicions necessàries requerides per calcular el PAG tal com s'ha establert a l'equació (54).

Per al càlcul de D_{cs} , cal tenir en compte el coeficient d'absorció acústica mitjà de la sala ($\bar{\alpha}$), atès que el locutor projecta la seva veu frontalment al conjunt de la sala, no solament a l'audiència. A més, podem suposar un factor de directivitat $Q = 2$, en tractar-se d'altaveus muntats en superfície. Per tant:

$$S_T = 2(25 \cdot 22) + 2(25 \cdot 4) + 2(22 \cdot 4) = 1476 \text{ m}^2 \quad (59)$$

$$R = \frac{S_T \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{1476 \cdot 0,05}{1 - 0,05} \cong 77,68 \quad (60)$$

$$D_{cs} = 0,14\sqrt{Q \cdot R} \cong 0,14\sqrt{2 \cdot 77,68} \cong 1,75 \text{ m} \quad (61)$$

En canvi, per al càlcul de D_{c1} i D_{c2} , hem d'emprar la constant de sala modificada (R'), atès que els altaveus de sostre estan enfocats directament a la audiència, l'absorció de la qual és molt major que la de la resta de superfícies. A més, mentre que per al càlcul de D_{c1} aplicarem el valor del modificador N corresponent al micròfon ($N = 28/1 = 28$), al càlcul de D_{c2} hi aplicarem el valor corresponent a la audiència ($N = 28/4 = 7$). Així mateix, en tractar-se d'altaveus de sostre directament enfocats d'igual manera a l'oient i al micròfon, en ambdós casos es manté que $Q = 2$. Per tant:

$$R' = \frac{S_T \bar{\alpha}}{1 - \alpha'} = \frac{1476 \cdot 0,05}{1 - 0,7} = 246 \quad (62)$$

$$D_{c1} = 0,14\sqrt{\frac{Q \cdot R'}{N}} = 0,14\sqrt{\frac{2 \cdot 246}{28}} \cong 0,59 \text{ m} \quad (63)$$

$$D_{c2} = 0,14\sqrt{\frac{Q \cdot R'}{N}} = 0,14\sqrt{\frac{2 \cdot 246}{7}} \cong 1,17 \text{ m} \quad (64)$$

Reprenent el fil argumental obert a l'inici de l'explicació, s'observa que aquestes distàncies crítiques indiquen que sí es compleixen les condicions requerides per poder calcular el PAG, a saber, les condicions especificades en l'equació (27):

- Atès que el locutor parla a 20 cm del micròfon ($D_s = 0,2$ m), el micròfon està clarament en el camp directe produït pel locutor ($D_s < D_{cs}$).
- Tal como es defineix a la figura 22, prenem la distància locutor-oient aproximant-la respecte de l'última fila de l'audiència ($D_0 \cong 20$ m). Evidentment, l'oient està en el camp reverberant produït pel locutor ($D_0 > D_{cs}$).
- Aproximant, de manera raonable, que el micròfon està situat a 1,5 metres del sòl, tenim que $D_1 \cong 2,5$ m amb el qual es compleix que el micròfon està en el camp reverberant produït pels altaveus ($D_1 > D_{c1}$).
- Si assumim que el pla d'audiència està a 1 metro del sòl (valor mitjà per a persones assegudes), aleshores $D_2 = 4 - 1 = 3$ m, amb el qual es compleix que els oients estan en el camp reverberant produït pels altaveus ($D_2 > D_{c2}$).

Així doncs, calculem sense més el PAG mitjançant l'equació (54):

$$PAG = 20 \log D_{cs} - 20 \log D_s - 6 \text{ dB} \cong 20 \log 1,75 - 20 \log 0,2 - 6 \cong 12,84 \text{ dB} \quad (65)$$

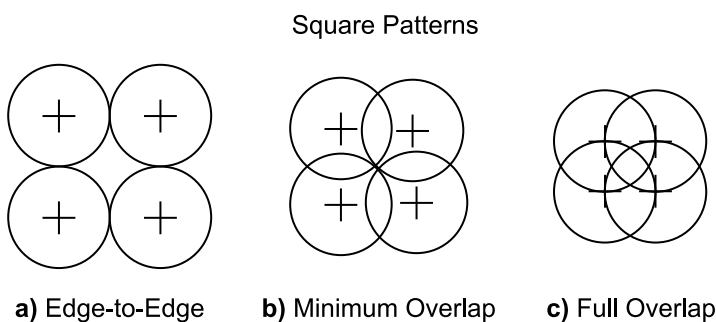
4.3. Distribució geomètrica dels altaveus

La **distribució dels altaveus de sostre** es pot implementar mitjançant diverses geometries, assegurant sempre una **bona uniformitat de cobertura**. En aquest apartat, es presenten breument dos de les geometries més habituals en la pràctica (subapartats 4.3.1 i 4.3.2) i, per finalitzar, es presenta també un mètode d'estimació del nombre d'altaveus necessari en un sistema distribuït (subapartat 4.3.3).

4.3.1. Distribució quadrada

En la figura 24, es mostren els diferents graus de solapament que pot presentar una **distribució quadrada de quatre** (2×2) altaveus. Sovint, aquesta distribució dona lloc a un **nombre total d'altaveus menor** i és molt fàcil d'implementar en espais amb falsos sostres també quadrats. La distribució quadrada se sol preferir, almenys com a punt de partida, ja que proporciona **bona cobertura amb menys altaveus**, la qual cosa **redueix el cost**.

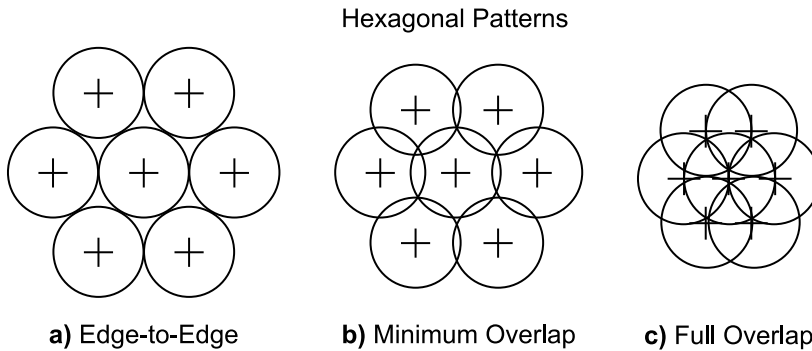
Figura 24. Distribucions quadrades amb diferents graus de solapament: a) sense solapament, o «vora amb vora»; b) solapament mínim; c) solapament complet



4.3.2. Distribució hexagonal

En la **distribució hexagonal**, les files alternes es desplacen per obtenir geometries com les il·lustrades en la figura 25. En alguns casos, aquesta distribució és més òptima que l'anterior, especialment quan amb una distribució quadrada tocaria col·locar una fila d'altaveus molt a prop d'una paret, desaprofitant així gran part de la seva cobertura potencial.

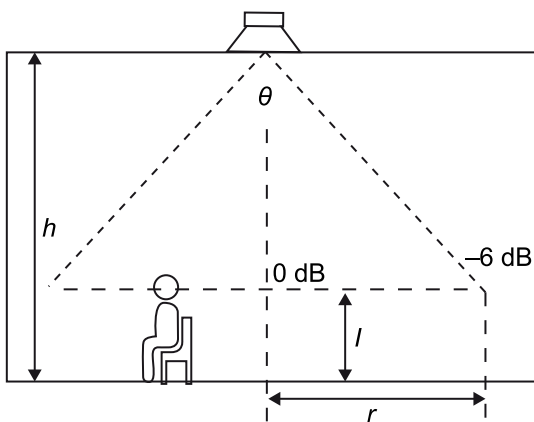
Figura 25. Distribucions hexagonals amb diferents graus de solapament: a) sense solapament, o «vora amb vora»; b) solapament mínim; c) solapament complet



4.3.3. Estimació del nombre d'altaveus necessaris

En els patrons de distribució de la figura 24 i la figura 25, cada cercle representa la cobertura a -6 dB d'un altaveu en el pla d'audiència. Per poder fer el **càlcul d'estimació del nombre necessari d'altaveus**, és necessari conèixer aquest angle, així com la distància entre l'altaveu i el pla d'audiència. Prenguem, per exemple, un recinte l'alçària del qual (h) sigui de 4 metres i on el públic estigui assegut tal com s'il·lustra en la figura 26, és a dir, on l'alçària del cap (l) estigui, aproximadament, a un 1 metre del sòl. En aquest cas, la distància altaveu-oient ($h - l$) serà de 3 metres.

Figura 26. Dimensions en una distribució d'altaveus de sostre



D'altra banda, els altaveus de sostre solen ser bastant omnidireccionals, a fi de garantir la major àrea de cobertura possible. En aquest cas, l'angle de cobertura de cada altaveu (θ) pot considerar-se d'uns 120° .

Per tant, i aplicant una simple fórmula trigonomètrica, l'expressió que permet trobar el radi r és la següent:

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2} \quad (66)$$

Amb aquestes dades, i distingint entre els diferents graus de solapament il·lustrats en la figura 24 i la figura 25 (sense solapament o «vora amb vora», solapament mínim i solapament complet), podem calcular que la distància entre altaveus (d) a l'exemple de la figura 26 ha de ser la següent:

- **Sense solapament** o «vora amb vora»: $d = 2r \cong 10,39$ m.
- **Solapament mínim:** $\begin{cases} d = \sqrt{2}r \cong 7,35$ m (cuadrada). \\ $d = \sqrt{3}r \cong 9$ m (hexagonal).
- **Solapament complet:** $d = r \cong 5,2$ m.

Així doncs, s'observa que podem optar per un **major grau de solapament entre altaveus**. Aquesta opció presenta tot un seguit d'avantatges:

- **Increment de la capacitat del nivell de pressió sonora (SPL)** que podem obtenir en un punt, atès que es sumen els nivells de pressió sonora de diversos altaveus.
- **Millor superació del soroll ambient** existent en el recinte.
- **Reducció de la variació del nivell de pressió sonora** en tot el recinte, atès que la cobertura que s'aconsegueix és més uniforme.

Per contra, l'inconvenient que un major solapament suposa és, com resulta evident, un **cost proporcionalment superior** als de les opcions amb menor solapament, a causa del major nombre d'altaveus que implica i a la seva infraestructura associada.

La taula 3 mostra l'impacte que tenen en el SPL els diferents graus de solapament que poden aplicar-se tant en una distribució quadrada d'altaveus, com en una hexagonal.

Taula 3. Valors de SPL en funció del tipus de distribució i del grau de solapament

		Increment de SPL respecte un altaveu sol [dB]	Variació de SPL a l'àrea d'audició [dB]
Distribució quadrada	Sense solapament	+0,7	-4,4
	Solapament mínim	+2	-2
	Solapament complet	+5,2	-1,4
Distribució hexagonal	Sense solapament	+1	-5,4
	Solapament mínim	+1,4	-2,6

		Increment de SPL respecte un altaveu sol [dB]	Variació de SPL a l'àrea d'audició [dB]
	Solapament complet	+5,4	-1,2

Així, el **nombre total d'altaveus** a utilitzar per als casos d'una distribució quadrada (NA_C) i d'una distribució hexagonal (NA_H), independentment del seu solapament, es calcula mitjançant les següents expressions:

$$NA_C = \frac{S}{d^2} \quad (67)$$

$$NA_H = \frac{2S}{\sqrt{3} d^2} \quad (68)$$

on S és la superfície a cobrir (en m^2) i d és la distància entre altaveus (en m).

Exemple 2

Es desitja sonoritzar amb una cobertura òptima un auditori de les següents dimensions: 25 m x 10 m x 3 m (llargària x amplària x alçària). Els altaveus de sostre escollits tenen una dispersió (angle de cobertura) de $\theta = 90^\circ$.

Solució

Posem que, d'entrada, ens decantem per una distribució quadrada d'altaveus en el sostre sense solapament. La quantitat d'altaveus vindrà determinada per l'equació (67).

D'una banda, la superfície a cobrir és:

$$S = 25 \cdot 10 = 250 \text{ m}^2 \quad (69)$$

D'altra banda, la distància entre altaveus (d) la podem calcular a partir de l'equació (66), que ens dona el radi de cobertura de cada altaveu. Així doncs, tenint en compte que ens hem decantat per una distribució sense solapament ($d = 2r$):

$$d = 2r = 2 \underbrace{(3 - 1)}_r \tan \frac{90^\circ}{2} = 4 \text{ m} \quad (70)$$

Per tant, el nombre d'altaveus requerit per a una distribució quadrada sense solapament és:

$$NA_C = \frac{250}{4^2} \cong 15,63 \quad (71)$$

És a dir, es requereix entre 15 i 16 altaveus amb una separació de 4 metres entre altaveus. A partir d'aquests nombres, hem de poder decidir si ens convé més cobrir la superfície del sostre amb una distribució quadrada (per exemple: 5 files i 3 columnes), o si seria més convenient passar-se a una distribució hexagonal, la qual cosa implicaria refer el càlcul del nombre d'altaveus requerit, que, òbviament, passaria a ser una mica més elevat:

$$NA_H = \frac{2 \cdot 250}{\sqrt{3} \cdot 4^2} \cong 18,04 \quad (72)$$

4.4. Potència elèctrica requerida (EPR)

Una última i crucial baula completa el disseny d'un sistema de sonorització com els que hem estudiat. Es tracta de la **potència elèctrica requerida (EPR, *electric power required*)**. Fins a aquest moment, hem parlat únicament de nivells de pressió sonora (SPL) en el domini de l'acústica. No obstant això, és necessari relacionar aquestes magnituds acústiques amb les magnituds elèctriques requerides per produir-les. Plantejat d'una altra manera: **Quanta potència elèctrica necessitem proporcionar a un altaveu (EPR) per provocar un determinat SPL?** Aquest valor dependrà de diversos factors i ens permetrà dimensionar i escollir els amplificadors i altaveus més adequats per a cada situació.

Com a punt de partida, prenem la sensibilitat de l'altaveu que ens proporciona el fabricant. Recordem que la sensibilitat (S) d'un altaveu relaciona justament la potència elèctrica lliurada a l'altaveu amb la pressió sonora que produeix. Aquesta dada s'indica de manera estandarditzada per a una potència d'1 W, mesurant-se la pressió sonora a 1 metre de distància en l'eix principal de l'altaveu.

Així, l'EPR s'obté com a resultat de calcular quina potència es requereix per obtenir una determinada pressió sonora (L_p) a una determinada distància (D_2). Generalment, es sobredimensiona la potència elèctrica de manera que fins i tot els pics del senyal musical no arribin a distorsionar mai. Com a mínim, cal proveir un *headroom* (H), això és, un marge de reserva, de 10 dB per sobre del nivell de programa.

Tenint tot això en compte, la **equació de càlcul de l'EPR** queda com segueix:

$$EPR = 10^{\left(\frac{L_p + H + 20 \log D_2 - S}{10}\right)} \quad (73)$$

on l'EPR està expressada en W; L_p , H i S en dB; i D_2 en metres.

Exemple 3

La fulla tècnica d'un petit altaveu de 5" ens indica que té una sensibilitat de 92 dB (1 W / 1 m). La potència RMS admissible per aquest altaveu és de 25 W.

Es demana determinar si aquest altaveu és adequat per generar 80 dB_{SPL} a 7 m de distància, assegurant un *headroom* de 10 dB.

Solució

Sense més, podem aplicar l'equació (73) i calcular l'EPR, doncs disposem de totes les dades necessàries:

$$EPR = 10^{\left(\frac{80 + 10 + 20 \log 7 - 92}{10}\right)} \cong 30,92 \text{ W} \quad (74)$$

En aquest cas, la potència requerida és superior a la potència que admet l'altaveu (25 W), així que haurem de buscar un que suporti potències majors.

La sensibilitat dels altaveus per a reforç sonor es troba típicament entre els 90 i els 100 dB (1 W / 1 m), així que el marge de variació en el resultat de l'EPR en aquest aspecte no

és massa gran (un factor de 10). En canvi, sí que trobem grans diferències en la potència admissible, ja que aquesta depèn de la grandària i el procés de construcció de l'altaveu. Típicament, podem trobar des de petits altaveus de 3" que admeten uns 10 W i que són aptes per sonoritzar espais tals com, per exemple, una sala d'espera, fins a grans altaveus de 18" per a sonorització de concerts, que poden arribar a suportar fins a uns 2 kW.

Resum

En aquest mòdul hem estudiat els principis bàsics per al disseny d'un reforç de so en diferents entorns. Per a això, hem diferenciat clarament el disseny en espais oberts i en espais tancats.

En primer lloc, hem estudiat els elements electroacústics que componen una cadena d'àudio per al reforç sonor i la principal problemàtica que apareix en tots els escenaris: la realimentació electroacústica. Hem plantejat un escenari estàndard compost per un locutor que parla per un micròfon i un oient que escolta gràcies a un altaveu en un espai obert. Es defineixen unes distàncies i uns angles relatius que marcaran el funcionament del reforç.

Mitjançant l'estudi dels nivells de pressió sonora en funció de les distàncies, arribem a la definició de el PAG, que representa el guany acústic potencial que percep l'oient amb la megafonia connectada respecte a quan no ho està. A banda de les distàncies, és important saber que el PAG també depèn de la directivitat dels transductors, podent afavorir o perjudicar el rendiment del sistema. Així mateix, és fonamental poder avaluar si una determinada PAG és suficient per a una situació concreta i, per a això, hem introduït el paràmetre NAG que va íntimament lligat a la distància acústica equivalent (EAD) recomanada per a diferents situacions.

A continuació, hem passat a l'estudi del reforç sonor per a espais tancats, fent un breu repàs als coneixements bàsics d'acústica que es requereixen a aquest efecte. És important conèixer les distàncies crítiques implicades i com respon el sistema si els elements estan situats en camp directe o en camp reverberant.

Seguidament, hem presentat alguns sistemes d'altaveus basats en el clúster central i les seves variacions, citant els seus avantatges i inconvenients. Per a certes instal·lacions, és recomanable l'ús de sistemes distribuïts, els principis de funcionament dels quals també hem estudiat.

Finalment, per completar el disseny del sistema, s'ha presentat el càlcul de la potència elèctrica requerida (EPR) perquè un altaveu aconsegueixi un determinat nivell de pressió sonora a una certa distància.

Exercicis d'autoavaluació

Qüestions breus

1. En una determinada instal·lació de reforç sonor en exteriors, el PAG és de 12 dB. Determina si això és suficient per a un oient situat a una distància de 8 m.
2. Calcula el PAG per a la següent situació: sala de dimensions 20 m x 15 m x 4 m, coeficient d'absorció acústica mitjà de 0,1, micròfon cardioide perfectament orientat al locutor, altaveu omnidireccional, distància locutor-micròfon de 5 cm (micròfon de diadema), distància locutor-oient de 15 m (última fila), distància altaveu-micròfon de 3 m i distància altaveu-oient de 16 m (última fila).

Exercicis d'elecció múltiple

1. Podem considerar que la llei quadràtica inversa es compleix a l'aire lliure. Un altaveu omnidireccional genera 114 dB_{SPL} a 1 m. Quin és el nivell que produeix a 16 m?
 - a) 98 dB_{SPL}.
 - b) 60 dB_{SPL}.
 - c) 90 dB_{SPL}.
 - d) 93 dB_{SPL}.
2. Pel que fa a la probabilitat de realimentació en un sistema de reforç sonor, quina de les següents afirmacions és la correcta?
 - a) Augmenta si l'altaveu s'apropa al micròfon.
 - b) Augmenta si l'altaveu s'allunya de l'oient.
 - c) Augmenta si el micròfon s'allunya del locutor.
 - d) Totes les afirmacions anteriors són correctes.
3. Pel que fa a el PAG quan s'usen transductors directius, quina de les següents afirmacions és la correcta?
 - a) El PAG augmenta si l'angle entre l'eix principal de l'altaveu i l'oient augmenta.
 - b) El PAG augmenta si l'angle entre l'eix principal del micròfon i el locutor augmenta.
 - c) El PAG augmenta si l'angle entre l'eix principal del micròfon i l'oient augmenta.
 - d) El PAG augmenta si l'altaveu es situa en la direcció en la qual el micròfon té menor sensibilitat.
4. Pel que fa a la distància crítica, quina de les següents afirmacions és la correcta?
 - a) A partir de la distància crítica, la pressió sonora decreix a raó de 3 dB cada vegada que es dobla la distància.
 - b) Es pot considerar que la pressió sonora es manté constant a partir de 3 vegades la distància crítica.
 - c) La contribució del nivell directe desapareix en assolir la distància crítica.
 - d) En la distància crítica, el nivell directe és 3 dB superior al nivell reverberant.
5. Calcula la distància crítica per a un altaveu que presenta angles de cobertura horitzontal i vertical a -6 dB de 70° i 60°, respectivament, situat en un recinte la superfície total del qual és de 1000 m² i el coeficient d'absorció acústica mitjà del qual és de 0,05.
 - a) 3,36 m.
 - b) 1,25 m.
 - c) 33,6 m.
 - d) 0,33 m.
6. Pel que fa a una instal·lació d'altaveus distribuïts, quina de les següents afirmacions és la correcta?

- a) Un major solapament dels altaveus suposa un increment en les variacions de nivell en la superfície d'audiència.
- b) Usant el mateix nombre d'altaveus de sostre, la cobertura serà més uniforme si la directivitat dels altaveus és alta.
- c) Si el pla d'audiència té una absorció significativament major que la resta de la sala, la distància crítica s'incrementa.
- d) Si el pla d'audiència té una absorció significativament major que la resta de la sala, la distància crítica es redueix.

Solucionari

Exercicis d'autoavaluació

1. $EAD = 1$, per ser el pitjor cas en exteriors, segons la taula 1.

$NAG \cong 18$ dB, per l'equació (13).

Per tant, **no és suficient, ja que $NAG > PAG$.**

2. $S_T = 880$ m².

$R \cong 97,78$ m, per l'equació (19).

En estar perfectament orientat al locutor, cal tenir en compte l'índex de directivitat del micròfon cardioide que, segons la taula 2, és: $DI = 4,8$ dB.

$D_{cs} \cong 2,41$ m, per l'equació (21).

L'índex de directivitat de l'altaveu omnidireccional és $DI = 0$ dB.

$D_{c1} = D_{c2} \cong 1,38$ m, per l'equació (21).

Per tant, veiem que es compleixen les condicions especificades en l'equació (27): $D_s < D_{cs}$, $D_0 > D_{cs}$, $D_1 > D_{c1}$, $D_2 > D_{c2}$.

Així, calculem el PAG mitjançant l'equació (30): $PAG \cong 27,65$ dB.

3. c

4. d

5. d

6. b

7. a

8. c

Bibliografia

Augspurger, G. i Eargle, J. (1999). *Sound System Design Reference Manual*. JBL Professional.

Ballou, G. (2015). *Handbook for Sound Engineers*. Focal Press.

Boner, C. P. i Boner, R. E. (1969). The Gain of a Sound System. *Journal of Audio Engineering Society*, 17 (2).

Davies, G. i Jones, R. (1990). *The Sound Reinforcement Handbook*. Yamaha Corporation.