



Universitat de Girona

DESENVOLUPAMENT DE MÈTODES DE PREDICCIÓ
DE SOROLL I ANÀLISI DE L'IMPACTE ACÚSTIC
PRODUÏT PEL TRÀNSIT VIARI I EL FERROCARRIL
EN LA CIUTAT DE GIRONA

Joaquim RUIZ FLUVIÀ

ISBN: 84-689-2571-3
Dipòsit legal: GI-577-2005

Presentació del disc de tesis

Distingits senyors,

La tesis s'ha fragmentat en tretze documents, que es poden obrir separatament, per facilitar-ne el maneig i la lectura (es poden tenir varies pantalles obertes alhora). L'ordre en que s'han disposat els diferents apartats és estrictament el mateix que apareix en el document escrit original. Seguidament els detallo la distribució de les diferents carpetes i documents:

01.- INTRODUCCIÓ

- 1.0.- PRESENTACIO DEL DISC
- 1.1.- PORTADA
- 1.2.- INDEX
- 1.3.- INTRODUCCIO

02.- CAPITOLS

- 2.0.- CAPITOL I
- 2.1.- CAPITOL II
- 2.2.- CAPITOL III
- 2.3.- CAPITOL IV
- 2.4.- CAPITOL V
- 2.5.- CAPÍTOL VI

03.- APENDIXS

04.- FONTS CONSULTADES

- 4.0.- BIBLIOGRAFIA
- 4.1.- PÀGINES WEB VISITADES
- 4.2.- SOFTWARE UTILITZAT
- 4.3.- AGRAÏMENTS

Agraint-los d'avançada la seva atenció i disposició a llegir aquest treball de tesis, els saluda atentament,

Joaquim Ruiz Fluvà

ESCOLA POLITÈCNIA SUPERIOR

- Departament d'enginyeria industrial -

MÈTODES DE MESURA ACÚSTICA:

**DESENVOLUPAMENT DE MÈTODES DE PREDICCIÓ DE
SOROLL I ANÀLISI DE L'IMPACTE ACÚSTIC PRODUÏT PEL
TRÀNSIT VIARI I EL FERROCARRIL EN LA CIUTAT DE
GIRONA**

JOAQUIM RUIZ FLUVIÀ



Universitat de Girona
Departament d'Enginyeria

ÍNDIX

INTRODUCCIÓ

I ONES SONORES

1.1.- PROPAGACIÓ I EFECTES DEL SOROLL

1.1.1.- Fonaments físics del soroll	1
1.1.2.- Dispersió espacial del so	1
1.1.3.- Fisiologia de l'oïda	3
1.1.4.- Efectes del soroll sobre l'ésser humà	4

1.2.- FÍSICA DEL SO

1.2.1.- Ones harmòniques	6
1.2.2.- Equació d'ones	11
1.2.3.- Energia i intensitat sonora	12
1.2.4.- Potència sonora	13
1.2.5.- Ones estacionàries en una corda.....	14
1.2.6.- Ones sonores estacionàries	18
1.2.7.- Composició de nivells	20
1.2.8.- Propagació de l'ona sonora	22
1.2.9.- Equació general d'ones i velocitat de propagació	23
1.2.10.- Variació de la pressió acústica en funció de la distància	29
1.2.11.- Variació de la pressió acústica en funció de les condicions atmosfèriques	30

1.3.- FENÒMENS DE PROPAGACIÓ

1.3.1.- Superposició i interferència d'ones harmòniques	32
1.3.2.- Reflexió i transmissió	34
1.3.3.- Refracció	34
1.3.4.- Difracció	35
1.3.5.- Pulsacions	37
1.3.6.- Reflexió i transmissió d'ones planes amb incidència normal	38
1.3.7.- Reflexió en la superfície d'un sòlid per incidència normal	41
1.3.8.- Ones estacionàries	42
1.3.9.- Reflexió i transmissió entre dos medis per incidència obliqua	42
1.3.10.- Refracció deguda a fenòmens atmosfèrics	44
1.3.11.- Absorció atmosfèrica	45

1.4.- ACÚSTICA ARQUITECTÒNICA

1.4.1.- Generalitats	46
1.4.2.- Absorció acústica	47
1.4.3.- Materials i coeficients d'absorció	50

II SOROLL DEL TRÀNSIT VIARI

2.1.- INDICADORS I PARÀMETRES DE MESURAMENT

2.1.1.- Consideracions generals.....	60
2.1.2.- Indicadors de trànsit	60
2.1.3.- Paràmetres i condicions de mesura	61
2.1.4.- Llocs de mesurament	62

2.2.- ESTIMACIÓ I MESURA DEL SOROLL DEL TRÀNSIT

2.2.1.- Introducció	63
2.2.2.- Mostreig de llarga durada	63
2.2.3.- Mostreig de curta durada	64
2.2.4.- Mesura del nivell de soroll en carrers	65
2.2.5.- Predicció dels nivells acústics en vials de circulació ràpida	66

2.3.- CRITERIS D'AVAUACIÓ DEL SOROLL

2.3.1.- Criteris quantitius	69
2.3.2.- Control de soroll dels vehicles	70
2.3.3.- Criteris qualitius	71

III ACÚSTICA URBANA

3.1.- L'ACÚSTICA I EL DISSENY URBANÍSTIC

3.1.1.- Acústica urbana i arquitectura	73
3.1.2.- Anàlisi de façana: model numèric	80

3.2.- NIVELLS SONORS DEL FERROCARRIL DE GIRONA

3.2.1.- Descripció del soroll del tren a Girona	84
3.2.2.- Soroll en un ferrocarril urbà	92
3.2.3.- Principis d'una política acústica pels ferrocarrils de l'UE	94
3.2.4.- Instruments legals i econòmics per prevenir el soroll dels trens	97

3.3.- EFECTES DEL SOROLL

3.3.1.- Els efectes del soroll	98
3.3.2.- Mesures de soroll i vibracions	104
3.3.3.- Efectes del soroll i la vibració del ferrocarril	112
3.3.4.- El soroll en zones urbanes	117
3.3.5.- Efectes a llarg termini de les barreres acústiques	118

3.4.- MESURES CONTRA EL SOROLL

3.4.1.- Criteris d'exposició al soroll	120
3.4.2.- La lluita contra el soroll	125

IV MODELS MATEMÀTICS

4.1.- MÈTODES MATEMÀTICS

4.1.1.- Mètode de predicció de soroll	138
4.1.2.- Mètode anglès de predicció	142
4.1.3.- Model del CETUR	145
4.1.4.- Estadística acústica	146
4.1.5.- Programació lineal	150
4.1.6.- Anàlisi de Fourier	155

4.2.- MODELS DESENVOLUPATS PER L'AUTOR

4.2.1.- Model de predicció de soroll (J.R.)	160
4.2.2.- Soroll generat en un carrer (J.R.)	165
4.2.3.- Anàlisi dels nivells acústics en túnels (J.R.)	171

V ANÀLISIS DE GIRONA (J.R.)

5.1.- METODOLOGIA DE DISTRIBUCIÓ DEL TRÀNSIT

5.1.1.- Base axiomàtica de la distribució del trànsit	187
5.1.2.- Zona 1A	190
5.1.3.- Zona 2B	198

5.2.- PROPOSTA DE XARXA DE TRANSPORT PÚBLIC

5.2.1.- Tancament de l'àrea central: xarxa de transport públic	201
5.2.2.- Càlcul del nombre de places d'aparcament	204

5.3.- ANÀLISI ESTADÍSTIC	
5.3.1.- Valoració de les dades experimentals	209
5.3.2.- Mostra exhaustiva del territori: anàlisi de normalitat	211
5.3.3.- Estadística descriptiva de les mesures reals	213
5.3.4.- Valoració conjunta dels resultats experimentals	217
5.4.- VALORACIÓ GLOBAL DE L'IMPACTE ACÚSTIC	224
VI CONCLUSIONS	225

APÈNDIXS

- A: Nivells acústics recomanats.
- B: Coeficients d'absorció.
- C: Coeficients d'absorció de materials interiors.
- D: Àbac dels nivells d'emissió.
- E: Emplaçament del micròfon respecte dels tubs d'escapament.
- F: Relació de ferrocarrils.
- G: Taules de les bandes d'octava i terç d'octava.
- H: Corbes NC, PNC i ISO.
- I: Nivells equivalents de 10 s de durada.
- J: Coeficients C_D .
- K: Coeficients C_i .
- L: Aplicació del model de J. Ruiz a Vic i Figueres.
- M: Càlculs integrals a 30 Km/h.
- N: Càlculs integrals a 70 Km/h.
- O: Taules de les 6 zones.
- P: Mapes de soroll corresponents a les 6 zones.
- Q: Mapes de soroll representatius d'una situació admissible.
- R: Gràfics de residus.
- S: Índex compost i continu.
- T: Coordenades de les 36 àrees en que s'ha dividit Girona.
- U: Mapa de les 36 àrees.
- V: Legislació.
- X: Espectres acústics.
- Y: Anàlisi fet amb el MITHRA de la zona 1A.
- Z: Simulació amb el MITHRA d'apantallaments.
- AA: Derivades parcials corresponents al càlcul de l'error absolut.
- AB: Punts de mesura reals (ferrocarril).
- AC: Anàlisi SoundPLAN.
- AD: Temperatura de Girona.
- AE: Humitat relativa de Girona.

INTRODUCCIÓ

La feina feta en aquest treball de tesis s'ha desenvolupat a partir de tres objectius vertebradors, que fonamentalment són:

- El primer dels objectius d'aquest treball de tesis és presentar un recull dels factors que intervenen en l'acústica urbanística: soroll produït pels diferents vehicles, fórmules de predicció de soroll, geometria dels edificis... , tot estudiant els seus efectes en la ciutat de Girona.
- Un altre objectiu ha estat desenvolupar uns mètodes numèrics propis, contrastats experimentalment i extrapolables a qualsevol entorn urbanístic, que permetin predir els valors de les perturbacions acústiques produïdes pels diferents vehicles en diferents situacions, entre els que es destaquen:
 - Fórmula de predicció del soroll en un entorn urbà i la seva aplicació a Girona.
 - Càlcul de l'increment de soroll en un carrer provocat per les reflexions de les ones sonores en les façanes dels edificis.
 - Estudi del nivell de soroll en la boca de la cavitat d'un túnel produït pel pas del ferrocarril.
 - Determinació del soroll provocat pel pas d'un tren sobre un viaducte.
 - Mètode de distribució i planificació del trànsit urbà per disminuir l'impacte acústic sobre la zona.
- El darrer objectiu consisteix en fer una descripció analítica de les principals fonts de soroll que afecten a la ciutat: el trànsit viari i el ferrocarril.

Per realitzar aquests objectius s'ha disposat d'un banc de dades amb més de 2.000 mesures sonores de Girona (nivells equivalents de 10 minuts de durada). La metodologia seguida i els principis en que es fonamenta es detallen a l'inici de cada apartat. La finalitat de tots aquests estudis, no és altre que millorar el confort acústic, i la qualitat de vida, de les ciutats.

Gairebé tots els grans nuclis de població del planeta es veuen afectats per una gravíssima problemàtica mediambiental, doncs a l'anomenada contaminació acústica cal afegir uns alts índexs de pol·lució atmosfèrica (altes concentracions de biòxid de carboni, generació d'illes de calor...). Aquesta situació, generalitzada arreu del planeta, ha propiciat l'aparició de mesures dràstiques consistents fonamentalment en restringir l'accés dels vehicles motoritzats als nuclis i zones centrals de les àrees urbanes. Precisament aquesta opció s'ha proposat per les zones interiors de Girona on l'elevada densitat de les edificacions deixa un escàs marge per plantejar la construcció de noves rutes o vies alternatives.

Cal esmentar que tots els càlculs i teories que es desenvolupen en aquest treball de tesis reflecteixen la realitat acústica actual provocada pels diferents mitjans de transport. Molt possiblement, en un futur no massa llunyà, els nivells de soroll (dB) enregistrats en situacions de tràfic similar seran força menors. Són molts els factors que poden contribuir a aquesta disminució de la intensitat de les emissions sonores: reducció del fregament mecànic, augment del coeficient aerodinàmic, nous materials pels pneumàtics i l'asfalt ...

Sense cap mena de dubte, però, una millora transcendental, i no només pel que fa al confort acústic sinó per l'ecosistema en general, seria potenciar la construcció de motors elèctrics o d'hidrogen. Aquests últims per exemple, a diferència dels motors de combustió, funcionen mitjançant piles de combustible que converteixen, amb molta netedat, el gas hidrogen en electricitat i possibiliten l'existència de vehicles no contaminants propulsats per motors elèctrics menys sorollosos. Així, al haver-hi menys fregament entre les parts mòbils del motor (no hi ha pistons ni cilindres) el soroll generat es reduiria considerablement.

Finalment, voldria expressar el meu agraïment al Dr. Josep Arnau per la seva inspiració i encertats consells ja que, sense ell, aquest treball i tota la tasca que porta a terme el nostre grup de treball de l'UDG no seria possible.

I ONES SONORES

1.1.- PROPAGACIÓ I EFECTES DEL SOROLL

1.1.1- Fonaments físics del soroll

Mesura de la pressió sonora

La pressió és el paràmetre físic més emprat per descriure la pertorbació sonora provocada per una ona de pressió al voltant del seu valor d'equilibri, que en condicions normals i al nivell del mar és de 10^5 N/m^2 o 1 atm. Quan una ona es propaga hi ha zones on la pressió augmenta i en d'altres disminueix, per la qual cosa el valor mig d'aquesta dada és aproximadament zero. Cal prendre doncs una altra variable més representativa; la **pressió sonora eficaç**, p_{rms} , (nivell equivalent) que està relacionada amb l'energia que transporta l'ona i es calcula a partir de l'arrel quadrada de la mitjana temporal de la pressió sonora instantània, p_{inst} , elevada al quadrat.

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p_{inst}^2(t) dt} \quad (1.1)$$

de fet, aquesta expressió representa la mitjana d'un procés lineal on el quadrat de la senyal s'ha mitjanat en l'interval de temps T, immediatament anterior a l'instant t.

Per mesurar sorolls amb una gran variació temporal, com ara el soroll del trànsit, s'utilitza el nivell sonor equivalent o $L_{Aeq,T}$, on T és el temps que dura el procés de mesura. Aquest paràmetre permet referir un soroll variable, en un interval de temps T, al nivell de pressió sonora equivalent al d'un soroll continu en aquest mateix interval. L'equip de mesura integra l'energia sonora durant el temps que dura el mesurament, per tant el resultat obtingut es equivalent al d'un soroll continu que tingui la mateixa energia que el soroll variable mesurat en aquest període de temps. Per exemple, si es mesura durant una hora el soroll del tren en una ciutat podem obtenir un valor $L_{Aeq,1h} = 70 \text{ dB}$, malgrat que just en l'instant que està passant per davant l'aparell de mesura es puguin enregistrar valors instantanis d'uns 90 dB.

1.1.2.- Dispersió espacial del so

En la figura es representa esquemàticament la distribució del so quan l'ona sonora incideix sobre una superfície. Bàsicament es distingeix la part de l'ona que es reflexa, la que s'absorbeix en el material i la que es transmet a través d'ell. Cal destacar que el fenomen de l'absorció té un paper fonamental en l'acústica arquitectònica.

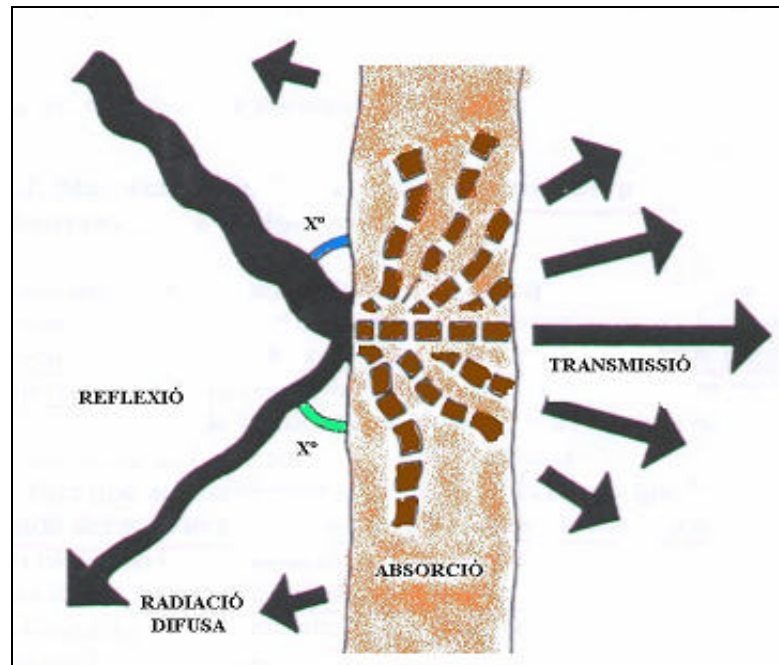


Figura 1.1.- Incidència d'una ona sonora sobre una superfície.

Absorció

Es defineix com el fenomen que consisteix en que una part de l'energia sonora, que incideix sobre una superfície, es transforma en una altra forma d'energia. Normalment aquesta energia acústica contribueix a incrementar els diferents graus d'excitació molecular dels àtoms d'aquesta superfície. Així, es defineix el coeficient d'absorció com:

$$a = \frac{\text{Energia absorvida}}{\text{Energia incident}} \quad (1.2)$$

Les parets molt polides i dures tindran un valor del coeficient α pròxim al zero, doncs gairebé tota l'energia sonora es reflecteix. Un material porós, d'altra banda, tindrà un valor d' α proper a la unitat. L'absorció d'un material es mesura en "sabines" que s'expressa en un unitats d'absorció per m^2 i és funció de:

- L'espectre de l'ona incident
- La natura del material (composició molecular i geometria)
- Les condicions termohigromètriques de l'ambient.

Existeixen tres tipus bàsics de materials absorbents: els dissipatius o fibrosos, els de membrana ressonant i els de tipus Helmholtz que, al llarg del capítol, es comentaran detalladament.

Materials fibrosos o absorbents dissipatius

Es caracteritzen per tenir petits poros o cavitats que es comuniquen entre ells, permetent que les ones sonores hi penetrin fàcilment i es propaguin entre els conductes que els comuniquen. Hi ha una dissipació de l'energia acústica que es transforma en energia cinètica de les molècules d'aire que es troben dins aquests intersticis i en calor generat pel fregament de l'aire sobre una superfície sòlida. Per a que es realitzi aquesta fricció cal, però, que la longitud d'ona del so

sigui d'un ordre de magnitud similar al diàmetre d'aquestes cavitats, produint-se també el fenomen de la reflexió difusa. Aquests efectes són més importants a mesura que disminueix la longitud de l'ona sonora incident, per la qual cosa hi haurà menys reflexió a altes freqüències. La densitat del material té poca influència en el valor d'aquest coeficient per l'amplitud de banda audible, tal com s'aprecia en la següent taula

Densitat (Kg/m ²)	Coeficient d'absorció α_i per les freqüències centrals						
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	NRC
4'88	0'11	0'24	0'58	0'86	0'85	0'77	0'63
7'32	0'09	0'20	0'57	0'88	0'86	0'79	0'63
10'98	0'07	0'19	0'50	0'85	0'85	0'76	0'60
14'64	0'07	0'22	0'62	0'95	0'90	0'82	0'67
20'75	0'07	0'18	0'51	0'89	0'88	0'80	0'62
29'29	0'07	0'19	0'57	0'93	0'90	0'83	0'65

Taula 1.1.- Coeficients d'absorció d'un pannel de fibra de vidre de 25'4 mm de gruix per diferents densitats.

Si es vol tenir un valor d'aquest coeficient proper a la unitat, per a tot l'espectre de freqüències, cal tenir també en compte la geometria i forma de la superfície. En la gràfica (1.2) pot apreciar-se el perfil típic de la paret d'una **cambra anecoica**, així com el valor del coeficient d'absorció quan augmenta la freqüència de l'ona.

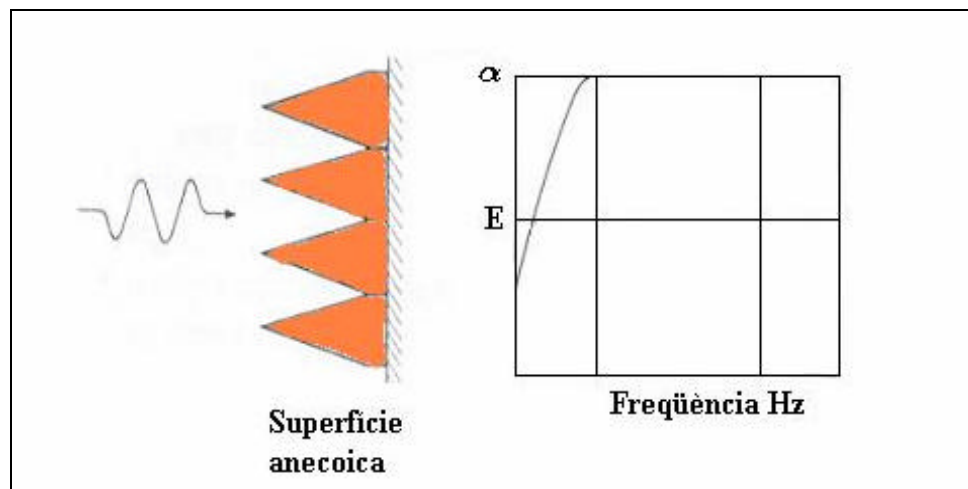


Figura 1.2.- Detall d'una superfície anecoica i la corba d'absorció.

1.3.3.-Fisiologia de l'oïda

L'aparell auditiu és un òrgan molt complex que es divideix fonamentalment en tres zones ben diferenciades: l'oïda externa, l'oïda mitjana i l'oïda interna. Seguidament es detalla breument la funció de cadascuna d'aquestes parts.

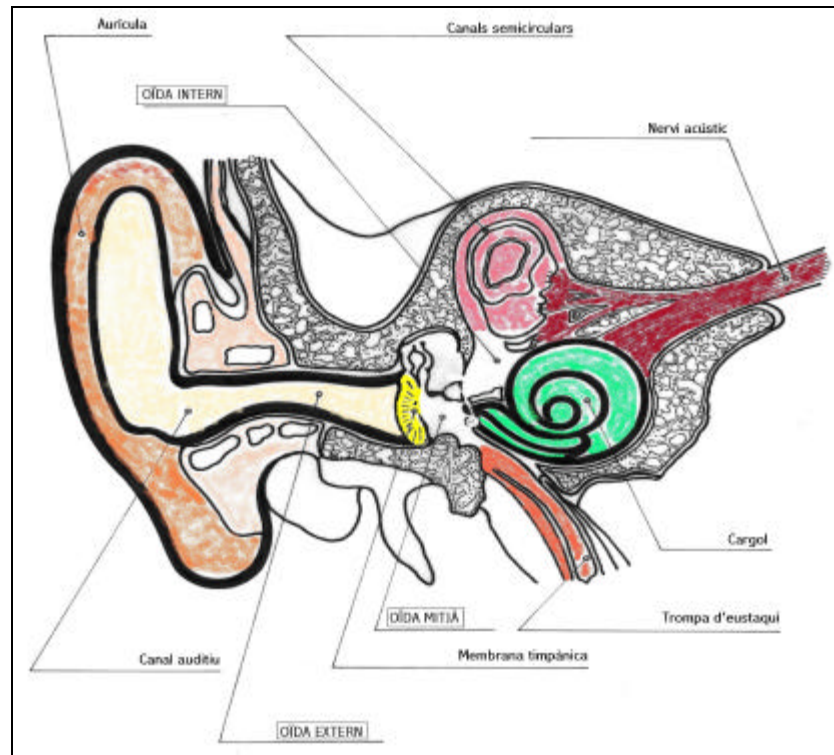


Figura 1.3.- Tall transversal de l'oïda

L'oïda externa. Està formada pel pavelló auditiu, que permet localitzar en l'espai l'origen del so mitjançant les depressions i plecs de l'orella, i el canal auditiu que, amb una longitud de poc més de 2 cm, està obert per l'extrem del pavelló i tancat per l'altre on es troba el timpà. En aquest tub apareixen unes ressonàncies, amb una longitud d'ona que seran múltiples de $\lambda/4$ de la longitud del tub a una freqüència d'uns 4.000 Hz, la qual varia sensiblement en funció de la particular configuració de l'anatomia de l'oïda de cadascun.

L'oïda mitjana. La seva principal funció és fer possible el pas de l'ona sonora des d'un medi aeri a un altre de líquid, que és el que hi ha dins la còclea. Menys del 0'5% de l'energia de l'ona incident es transmet, doncs la relació d'impedàncies és de 4000:1.

L'oïda interna. En aquesta part hi ha la membrana basilar, amb moltes cèl·lules ciliades, que separa les dues parts de la còclea. Aquestes cèl·lules permeten la transformació d'un senyal de pressió a través del líquid endolinfàtic en un senyal elèctric, doncs el seu moviment envia impulsos elèctrics cap als nervis auditius i posteriorment al cervell on és processat i interpretat.

1.1.4.-Efectes del soroll sobre l'ésser humà

La majoria de sons que escoltem no són motiu de molèstia, afortunadament, per nosaltres. N'hi ha alguns, però, que tenen una elevada intensitat o una freqüència determinada que poden esdevenir una font de malestar i angoixa. Si l'oient hi està exposat de forma continuada pot patir repercussions psíquiques i físiques serioses (canvis d'humor, pèrdua d'audició...). L'anàlisi dels efectes del soroll sobre el cos humà s'estan estudiant actualment i les societats desenvolupades mostren una creixent preocupació per aquest tema. En aquesta línia el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya a portat a terme el projecte SONICAT, que consisteix en enregistrar sobre el plànol de tots i cada un dels municipis i

ciutats del nostre país els nivells de soroll màxims permesos en les diferents zones i carrers a fi i efectes de desenvolupar una referència que sigui la base d'una futura legislació sobre el tema. El soroll té importants efectes psicològics i fisiològics en l'home. Una societat amb un cert nivell tecnològic desenvolupa nuclis industrials, ciutats, àrees comercials i d'esbarjo... relacionades per vies de comunicació terrestre, marítimes i aèries. Aquesta activitat genera sorolls de tota mena i intensitat variable que, sens dubte, afecten les persones que hi estan exposades. Per exemple, un obrer d'una fàbrica on hi hagi maquinària pesada pot estar immers en un ambient d'un nivell de soroll proper als 100 dB. L'exposició continuada a fonts d'aquesta intensitat poden provocar disminució de la capacitat auditiva i, fins i tot, una sordesa permanent. Fonts de soroll puntuals menys intenses, però, poden esdevenir motiu de molèstia i angoixa. Així fresses com la botzina d'un cotxe, una motocicleta amb tub d'escapament lliure, gent cridant en un mercat... poden esdevenir un focus de pertorbació, sobretot si es repeteixen periòdicament amb una certa regularitat. Llavors la gent que visqui en un carrer força transitat per vehicles o proper a un mercat amb molta activitat haurà de tenir cura de condicionar el seu habitatge amb barreres i apantallaments acústics que els protegeixin de les ones sonores externes.

Val a dir, que l'efecte del soroll en l'home és, en última instància, subjectiu. Hi ha efectes físics, però, que si es poden avaluar objectivament i mesurar amb aparells a partir de registres i dades empíriques fàcilment contrastables per tothom. En aquest sentit pot afirmar-se, tot generalitzant, que intensitats sonores superiors als 120 dB provoquen una forta molèstia, que pot esdevenir en un dolor agut per la majoria dels oients. L'efecte o influència d'altres tipus de sons, amb una intensitat menor i un ampli espectre de freqüències, és variable i depèn en última instància de la persona que els escolta. Hi ha diverses situacions, comunament acceptades, que exemplifiquen aquest supòsit.

Pel que fa a casos individuals s'ha observat que un soroll repetitiu, no provocarà gairebé cap efecte en una persona de tarannà tranquil, mentre que per una persona nerviosa pot esdevenir una font d'enuig insuportable. D'altra banda, la reacció d'un col·lectiu de persones està determinada per la resposta de la majoria o bé d'una minoria molt activa, fortament sensibilitzada, i que expressa rotundament la seva angoixa. Hi ha una legislació nacional i internacional que recull una normativa, amb uns valors a partir dels quals es considera perillós el fet que un grup nombrós de persones pugui estar sota la influència de molèsties externes susceptibles de provocar una reacció adversa i potencialment perillosa per part d'aquest col·lectiu. Aquests estudis s'inclouen dins la teoria de la psicologia de masses, la qual observa i avalua el comportament d'un grup nombrós d'individus sota diferents influències i situacions. Les seves conclusions són molt interessants i cal tenir-les en consideració, sobretot a l'hora de planificar la concentració d'un grup multitudinari (*esdeveniments esportius, concerts musicals, mítings polítics* ...). Altres afirmacions generals que poden fer-se sobre els efectes del soroll sobre les persones són:

- Un so sense tons purs accentuats i de nivell constant relaxa i afavoreix el son, mentre que si hi ha tons aguts amb una freqüència elevada i forts nivells de pressió, poden esdevenir una molèstia i un focus d'irritabilitat.
- Els sorolls intensos (més de 120 dB) provoquen forts dolors i fins i tot poden ocasionar la ruptura del timpà.
- Una soroll no regular, amb un espectre d'intensitat variable, captarà més l'atenció de l'oient que un so monòton i regular.

- Cal esmentar també que les ones sonores fora del rang de les freqüències audibles (infrasons i ultrasons) tenen efectes sobre els éssers vius. Aquests estudis són objecte d'investigació en l'actualitat.

La dispersió dels resultats que s'observen en diferents persones és força gran, doncs la resposta humana depèn bàsicament dels paràmetres fisiològics propis de cada individu. Per aquest motiu és molt difícil predir el grau de molèstia a certes persones situades en determinades condicions i marcar una línia divisòria a partir de la qual pugui establir-se que s'està causant un perjudici. Malgrat aquesta dificultat en la taula de l'apèndix A es recullen els valors recomanats de nivell de soroll en diferents llocs i dependències.

Amb l'edat es produeix una pèrdua de percepció de les altes freqüències. Això no presenta un gran problema doncs, els sons fonamentals de la paraula i la música es transmeten a freqüències molt més baixes. Amb un test auditiu, o audiograma, s'enregistren aquestes deficiències d'audibilitat. Algunes de les malalties o tipus de sordesa més comunes són:

- **Sordeses de percepció.** El focus de l'afecció està en l'oïda intern o en el sistema nerviós auditiu i sovint es localitzen en una determinada banda de freqüència. El seu origen acostuma a ser degut a un cansament prolongat que provoca alteracions en la membrana basilar.
- **Sordeses de transmissió.** Generalment són provocades per una obturació de la trompa d'Eustaqui o a una esclerosi de la cadena d'ossets, que en dificulta la conducció.

Hi ha aparells de pròtesis que ajuden a corregir alguns tipus de sordesa. Aquests aparells es componen bàsicament d'un micròfon, que rep els sons, d'un amplificador electrònic amb filtres per augmentar la intensitat de la senyal rebuda i d'un emissor telefònic situat en l'oïda per transmetre el senyal amplificat.

1.2.-FÍSICA DEL SO

Per estudiar el comportament i les magnituds fonamentals emprades per descriure la dinàmica i propagació de les ones sonores generades per una font puntual que radia en totes direccions, pot prendre's per model el moviment d'una corda, l'extrem de la qual es desplaça cap amunt i avall. S'obté així una equació d'ones bidimensional extrapolable a les 3 dimensions.

1.2.1.- Ones harmòniques

Si es desplaça l'extrem d'una corda en la direcció perpendicular a la direcció de propagació, seguint un moviment harmònic simple es produeix un tren d'ones sinusoidal. La forma de la corda en un instant de temps és la mateixa que la descrita per la funció trigonomètrica (*sinus o cosinus, doncs només existeix una diferència de fase*).

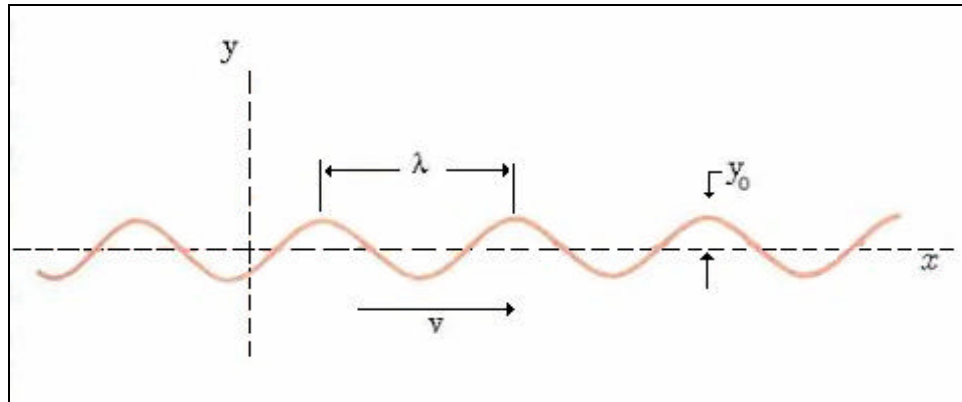


Figura 1.4.- Ona harmònica en un instant determinat.

λ és la longitud d'ona i y_0 la seva amplitud. La distància entre dues crestes successives de la corda és el que s'anomena **longitud d'ona**, λ , que és la distància recorreguda en l'espai fins que la funció d'ona es repeteix a si mateixa. Quan l'ona es propaga per la corda, cada punt es mou amunt i avall, perpendicularment a la direcció de propagació, fent un moviment harmònic simple de freqüència, f , (nombre d'ones per unitat de temps), igual a la de l'agent extern que provoca les oscil·lacions. La velocitat de propagació, v , de les ones és directament proporcional a aquestes dues magnituds. Aquest fet pot apreciar-se tenint en compte que en un temps, t , el nombre d'ones generades és: $N = ft$, mentre que la primera ona generada recorre una distància igual a vt . El quocient entre aquesta distància i el nombre d'ones generades és precisament la longitud d'una única ona.

$$\lambda = \frac{vt}{N} = \frac{vt}{ft} = \frac{v}{f} \Rightarrow v = \lambda f = \frac{\lambda}{T} \quad (1.3)$$

El període, T , es defineix com l'invers de la freqüència i és igual al temps que triga la vibració de l'ona a recórrer la distància entre dues crestes successives. Aquestes definicions es poden fer extensives a les dues i tres dimensions. En la figura (1.5) es mostren les ones circulars generades sobre la superfície de l'aigua per una font puntual que es desplaça en la direcció vertical, perpendicular a la superfície de propagació, amb un moviment harmònic simple.

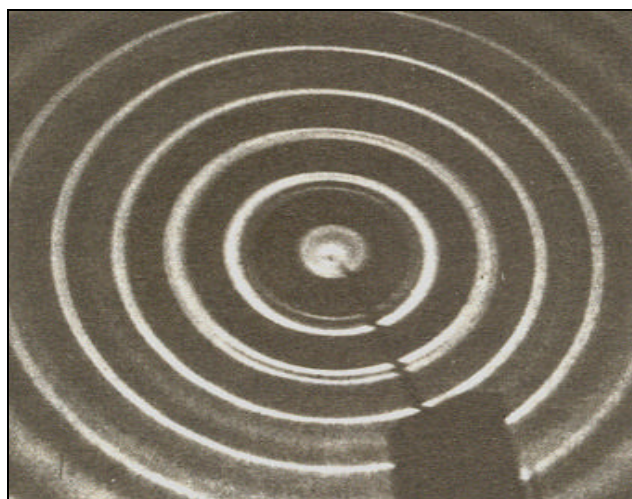


Figura 1.5.- Fronts d'ona circulars.

Anàlogament al cas unidimensional, la longitud d'ona és la distància entre dues crestes successives, que són circumferències concèntriques, que són corbes de fase constant per aquestes ones bidimensionals i reben el nom de **fronts d'ona**. Quan es tracta d'una font puntual que radia en l'espai, les ones sonores es desplacen en totes les direccions i els fronts d'ona són superfícies esfèriques concèntriques. El seu moviment es representa mitjançant línies dirigides perpendicularment al front, anomenades **raigs**. Si els fronts d'ona són esferes perfectes els raigs són línies radials.

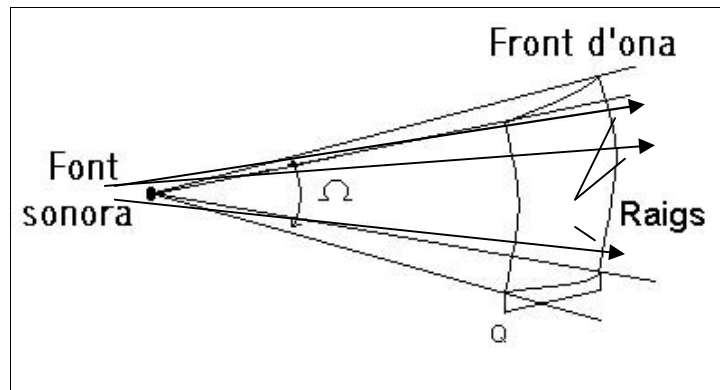


Figura 1.6.- Raigs i fronts d'ona d'una superfície esfèrica.

A grans distàncies de la font es pot aproximar una petita part del front d'ones a un pla, i els raigs que la travessen per línies paral·leles. En aquestes condicions aquestes ones reben el nom d'**ones planes**. Pot representar-se una ona que es propaga cap a la dreta en un gràfic cartesià. En l'eix d'ordenades es representa l'amplitud de l'ona, $y(x,t)$, i en el d'abscisses la posició, x . Si l'ona es desplaça cap a la dreta aquestes variables estan relacionades de la forma $x-vt$, on v és la velocitat de l'ona (figura 1.4). Com que l'ona té forma sinusoidal, la funció d'ona per una ona harmònica que es desplaça cap a la dreta pot escriure's com:

$$y(x,t) = y_0 \sin K(x - vt)$$

El nombre d'ona, K , i la freqüència angular, w , es defineixen com:

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad i \quad w = 2\pi f = Kv$$

Així, la funció d'ona pot escriure's,

$$\boxed{y(x,t) = y_0 \sin(Kx - Kvt) = y_0 \sin(Kx - wt)} \quad (1.4)$$

Es poden produir ones sonores harmòniques fent vibrar un pistó o un altaveu amb un moviment harmònic simple, llavors les molècules d'aire properes al pistó o l'altaveu oscil·laran amb moviment harmònic simple respecte la seva posició d'equilibri, xocant amb les molècules veïnes fent-les oscil·lar. Es pot substituir l'amplitud de l'ona pel desplaçament, $s(x,t)$, de les partícules com una funció de x i t :

$$\boxed{s(x,t) = s_0 \sin(Kx - wt)} \quad (1.5)$$

en aquesta equació, s_0 , és el desplaçament màxim del gas des de la seva posició d'equilibri. Aquesta desplaçament té la mateixa direcció que el moviment de l'ona; el so es una ona longitudinal.

El desplaçament de les molècules de gas fa que la seva densitat augmenti o disminueixi en un punt, la qual cosa depèn de si el gas es desplaça cap a aquest punt o bé se n'allunya. Les fluctuacions de densitat són proporcionals a la pressió, essent aquestes variacions de pressió les que generen ones de pressió relacionades amb el desplaçament.

En la figura (1.7-a) s'aprecia aquest fenomen on es representa la funció de desplaçament per veure que en un moment determinat, t_0 , l'ona de pressió està desfasada 90° respecte a l'ona de desplaçament. Els punts P_1 i P_3 són punts d'equilibri en estat de moviment zero. S'observa que a l'esquerra i a la dreta del primer punt el desplaçament és negatiu i positiu respectivament, la qual cosa indica que hi ha un mínim de densitat en P_1 . Pel que fa a P_3 , la densitat és un màxim, doncs els desplaçaments s'apropen a aquest punt per les dues bandes.

Els desplaçaments propers a aquests punts s'indiquen en la figura (1.7- b). En el punt P_2 , la funció de desplaçament és un màxim perquè les molècules es mouen en el mateix sentit (*positiu*), llavors la densitat pràcticament no varia en els punts propers. En la figura (1.7-c) es representen les variacions de densitat que corresponen a aquesta ona de desplaçament on s'observa la següent correlació: la pressió és màxima on la densitat també ho és. Finalment en l'apartat (d) d'aquesta mateixa figura s'observa l'ona de pressió corresponent desfasada 90° .

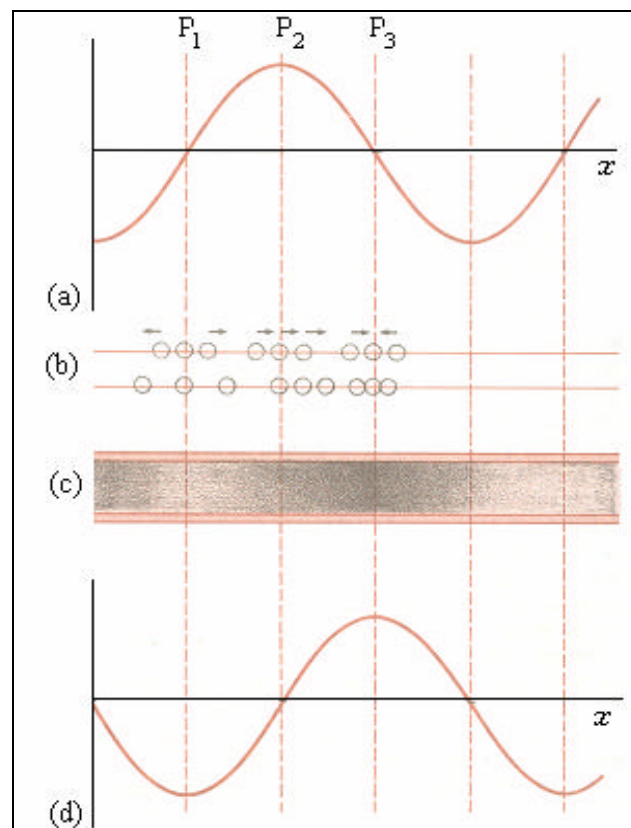


Figura 1.7.- Gràfiques de pressió i desplaçament molecular.

fix: t_0 . Anàlogament, i pel mateix motiu, podem identificar la densitat en equilibri, ρ_0 , amb la densitat del gas, ρ .

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta x} \rightarrow \frac{\partial s}{\partial x} \Rightarrow P = -r v^2 \frac{\partial s}{\partial x}$$

tenint en compte que el desplaçament pot expressar-se com una funció sinusoidal, calculant aquesta derivada parcial s'esdevé:

$$s(x, t) = s_0 \sin(Kx - wt) \quad i \quad \frac{\partial s}{\partial x} = K s_0 \cos(Kx - wt)$$

Així doncs,

$$P = -r v^2 s_0 k \cos(kx - wt_0) = +kr v^2 s_0 \sin(kx - wt_0 - 90^\circ)$$

i finalment podem escriure l'ona de pressió com:

$$\boxed{P = p_0 \sin(kx - wt - 90^\circ)} \quad (1.8)$$

on s'ha identificat: $p_0 \equiv kr v^2 s_0 = r w v s_0$

1.2.2.- Equació d'ones

Aquesta equació pot obtenir-se a partir de la funció que és una solució particular de les ones harmòniques:

$$y(x, t) = y_0 \sin(Kx - wt) = y_0 \sin(Kx - Kvt)$$

i les segones derivades respecte la posició i el temps són:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x} &= ky_0 \cos(kx - kvt) \Rightarrow \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -k^2 y_0 \sin(kx - kvt) = -k^2 y(x, t) \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= kv y_0 \cos(kx - kvt) \Rightarrow \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -k^2 v^2 y_0 \sin(kx - kvt) = -k^2 v^2 y(x, t) \end{aligned}$$

s'observa que, exceptuant el quadrat de la velocitat, s'obtenen expressions idèntiques que poden relacionar-se per obtenir l'equació d'ones:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -k^2 y(x, t) = \frac{-k^2 v^2 y(x, t)}{v^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

així,

$$\boxed{\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}} \quad (1.9)$$

Aquesta equació descriu les ones sonores on v representa la velocitat de l'ona en un medi si s'interpreta que y representa l'augment o disminució de la pressió o densitat d'un gas. Es satisfà per qualsevol ona que es propaga en una dimensió sense dispersió o variació de forma. Posteriorment, i de manera anàloga, es farà la generalització a tres dimensions en aquest mateix capítol.

1.2.3.- Energia i intensitat sonora

La intensitat es defineix com el valor mig de l'energia, W , transportada per l'ona per unitat de temps, dt , a través d'una superfície perpendicular a la direcció de propagació, dS . Tenint en compte la definició clàssica diferencial de l'energia mecànica: $dW = F \cdot dx$, pot expressar-se la intensitat acústica en funció de la pressió sonora i la velocitat de les partícules:

$$I = \frac{d^2 E}{dS dt} = \frac{dF}{dS} \cdot \frac{dx}{dt} = P \cdot v$$

Podem fer un raonament similar en el cas que sigui un focus puntual que emet una potència, P_m , uniformement i en totes direccions. En aquest cas, i a una distància r del focus, la potència es distribueix uniformement en una superfície esfèrica d'àrea $4\pi R^2$ i la intensitat esdevé:

$$I = \frac{(\Delta E / \Delta t)_m}{S} = \frac{P_m}{4\pi R^2}$$

Existeix una relació entre la intensitat d'una ona i l'energia per unitat de volum en el mitjà que la transporta. Si representem l'energia mitja per unitat de volum per h , l'augment d'energia que experimenta un volum d'àrea transversal A i longitud $v \Delta t$ és:

$$\Delta E = h A v \Delta t$$

ara, pot expressar-se la intensitat de l'ona en un punt dividint aquesta equació de l'energia per l'àrea i el temps.

$$\boxed{I = \frac{\Delta E}{A \Delta t} = h v} \quad (1.10)$$

Aquest resultat, aplicable a totes les ones, indica que la intensitat és igual al producte de la velocitat de l'ona per la densitat d'energia mitja. Un altre resultat important de les ones es pot deduir a partir de considerar una ona harmònica de freqüència angular ω i amplitud y_0 que viatja a través d'una corda. L'energia d'un segment d'aquesta corda pot expressar-se a partir de l'energia cinètica i la velocitat màxima de l'ona.

$$E_c = \frac{1}{2} (\Delta m) v^2 \quad i \quad v(x, t)_{Max} = \frac{dy(x, t)_{Max}}{dt} = \omega y_0$$

així un segment de corda amb una massa, Δm , i densitat ρ té una energia:

$$\Delta E = \frac{1}{2} (\Delta m) \omega^2 y_0^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 y_0^2 \Delta V \quad on \quad \rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

i la densitat d'energia mitja és:

$$h = \frac{\Delta E}{\Delta V} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 y_0^2$$

gràcies a aquesta fórmula s'obté un resultat important i general per a totes les ones: “la intensitat és proporcional al quadrat de l'amplitud”.

$$I = \mathbf{h}v = \frac{1}{2} \mathbf{r}w^2 y_o^2 v \quad (1.11)$$

També és possible escriure la intensitat d'una ona sonora en funció de l'amplitud de pressió, p_o , doncs pot identificar-se l'amplitud de l'ona, y_o , amb la corresponent al desplaçament, s_o .

$$I = \frac{1}{2} \mathbf{r}v w^2 s_o^2 = \frac{p_o^2}{2 \mathbf{r}v} \quad (1.12)$$

El terme $\mathbf{r}v$ es defineix com la “*impedància acústica específica*” i és el producte de la densitat del medi, ρ , per la velocitat de propagació del so, v . El valor de la pressió acústica, p_o , correspon al valor de la pressió instantània o de pic. La deducció teòrica d'aquesta fórmula, donada la seva importància, es farà posteriorment per altres camins

A partir d'aquesta fórmula, però, podem determinar la intensitat màxima que pot suportar l'oïda humana. Tenint en compte que la màxima pressió sonora que tolera el nostre aparell auditiu és d'uns 28 N/m^2 , prenent els valors mitjos de la densitat de l'aire i la velocitat de propagació del so, dóna una xifra per la intensitat del següent ordre:

$$I = \frac{(28 \text{ N/m}^2)^2}{2 \times 1.29 \text{ Kg/m}^3 \times 340 \text{ m/s}} = 1 \text{ w/m}^2$$

Aquestes variacions tan petites de pressió se superposen al nivell de pressió atmosfèrica normal constant d'aproximadament 101 Kpa .

1.2.4.- Potència sonora

Aquesta variable dóna idea de l'energia que radia una font sonora per unitat de temps. Pot obtenir-se el seu valor integrant la component d'intensitat, I_s , que travessa cada element diferencial de superfície, ds .

$$P = \frac{dW}{dt} = \int_s I_s ds \quad \text{on} \quad I_s = \frac{d^2W}{dsdt}$$

Cal diferenciar, però, entre potència elèctrica i acústica. Malgrat que el concepte d'aquestes dues variables és idèntic, doncs la potència elèctrica es defineix anàlogament com l'energia elèctrica radiada per unitat de temps, els ordres de magnitud dels seus valors, però, són força diferents. Aquesta idea pot il·lustrar-se amb un exemple força representatiu: la potència mitja produïda per una persona quan parla és de 10^{-5} w . Suposant que la població actual d'un país sigui de 6 milions d'habitants, s'obté que la potència radiada per tota aquesta gent parlant a l'hora es de: $6 \cdot 10^6 \cdot 10^{-5} \text{ w} = 60 \text{ w}$, que és el valor de la potència necessari per encendre una petita bombeta.

A qualsevol font sonora se li pot associar una potència sonora, que es defineix com l'energia sonora que emet per unitat de temps i que produeix en un punt determinat una pressió sonora que depèn de molts factors, com són la distància del punt a la font, el condicionament de la

sala, El seu rang de valors oscil·la des de menys d'una cent milionèsima de W (*caiguda d'una fulla*) fins als cent milions de W (*llançament d'un coet*). Aquests ordres de magnitud tan dispars imposen també l'ús d'una escala logarítmica per expressar el nivell de potència sonora com:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_{ref}} \quad dB \quad \text{amb} \quad W_{ref} = 10^{-12} \text{ vats}$$

1.2.5.- Ones estacionàries en una corda

Una propietat general de les ones és que la seva velocitat depèn de les propietats del medi on es propaga i és independent del moviment relatiu de la font. Considerant deformacions de les cordes suficientment petites i que la força creada per la tensió en un arc infinitesimal de corda provoca acceleracions centrípetes s'obté que una expressió per la velocitat de l'ona

$$v = \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (1.13)$$

on T representa la tensió aplicada i μ és la massa per unitat de longitud. És instructiu estudiar les ones confinades en cordes perquè molts dels resultats que s'obtenen són extrapolables a espais de dimensions superiors. Quan les ones es propaguen per les cordes d'un piano o un tub d'òrgan es produeixen reflexions en els extrems i conseqüentment ones que es mouen en ambdós sentits, que es combinen segons la llei general d'interferències de les ones. En aquest apartat s'estudiaran les ones estacionàries produïdes en cordes sota diferents condicions de contorn.

Corda fixa pels dos extrems

Es considera una corda fixa en un extrem i en l'altre lligada a un diapasó que vibra amb una freqüència f i una petita amplitud, el qual envia ones que es reflecteixen i són invertides en l'extrem fix.

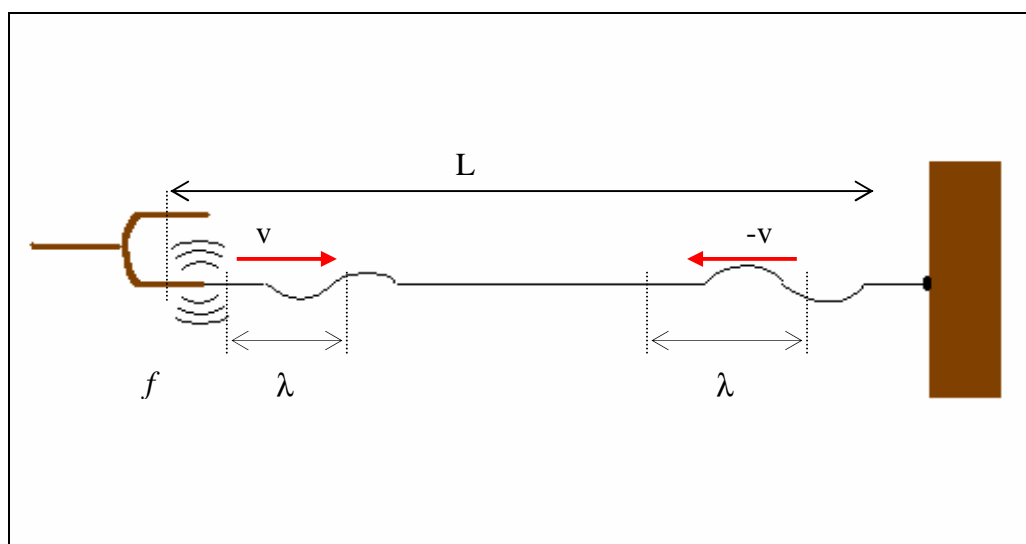


Figura 1.9.- Corda que vibra amb un extrem fix lligada a un diapasó de freqüència f .

En la figura de la pàgina anterior s'il·lustra com es genera una cresta d'ona en l'extrem esquerra de la corda que es mou cap a la dreta on es reflexa i torna al diapasó. Aquest procés pot repetir-se indefinidament, però cal tenir en compte aquests punts:

- El camí que recorre l'ona té una longitud igual a $2L$, on L és la longitud de la corda. Si aquesta distància és exactament igual a la longitud d'ona λ , l'ona reflectida interferirà constructivament.
- La corda absorbeix energia de vibració del diapasó, per la qual cosa quan la interferència es constructiva l'ona resultant té una amplitud doble que qualsevol de les ones que la produeixen. Així, quan la longitud de l'ona és igual a la longitud de la corda, per exemple, la distància $2L$, és igual a dos longituds d'ona.

En aquestes condicions es produeix el fenomen de la ressonància, que origina una major amplitud en la corda (*augment d'energia*) si la distància $2L$ és igual a un nombre enter qualsevol multiplicat per la longitud d'ona. Llavors la condició de ressonància pot escriure's

$$n \frac{\lambda}{2} = L \quad 2L = n \frac{v}{f}$$

Aquest resultat pot expressar-se en funció de la freqüència fonamental, f_1 , que és la freqüència de ressonància més baixa ($n=1$) i tenint en compte l'equació (1.13) resulta que

$$\boxed{f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}}} \quad (1.14)$$

Amb aquest resultat s'esdevé que qualsevol freqüència de ressonància és un múltiple enter de la fonamental, doncs

$$2L = n \frac{v}{f} \Rightarrow f_n = n \frac{v}{2L} = n f_1$$

Aquestes freqüències, f_n , són les **naturals** de la corda. Quan la freqüència del diapasó no és igual a una de les freqüències naturals de la corda, l'ona que ha recorregut la distància $2L$ i es reflexa en el diapasó difereix en fase de l'ona que s'hi està produint en aquest moment. Les ones reflectides i les que procedeixen del diapasó tenen unes diferències de fase que depenen

del nombre de reflexions. La interferència pot ser *constructiva* o *destructiva*. En el primer cas l'amplitud de l'ona augmentarà, mentre que en el segon disminuirà, en valor mig, però, l'amplitud no augmenta sinó que resta igual que la de la primera ona generada.

Quan la corda es fa vibrar en qualsevol de les freqüències naturals, absorbeix energia de la força externa i l'amplitud augmenta fins arribar a un valor màxim; llavors la velocitat a la que es perd energia per efecte de l'esmoreïment és igual a la velocitat amb que s'absorbeix, i l'energia total de la corda en vibració es constant. L'ona produïda s'anomena *ona estacionària*.

Aquestes ones estacionàries produïdes en una corda fixa pels dos extrems s'anomenen **harmònics**. En la següent figura es visualitza l'harmònic fonamental i els primers harmònics.

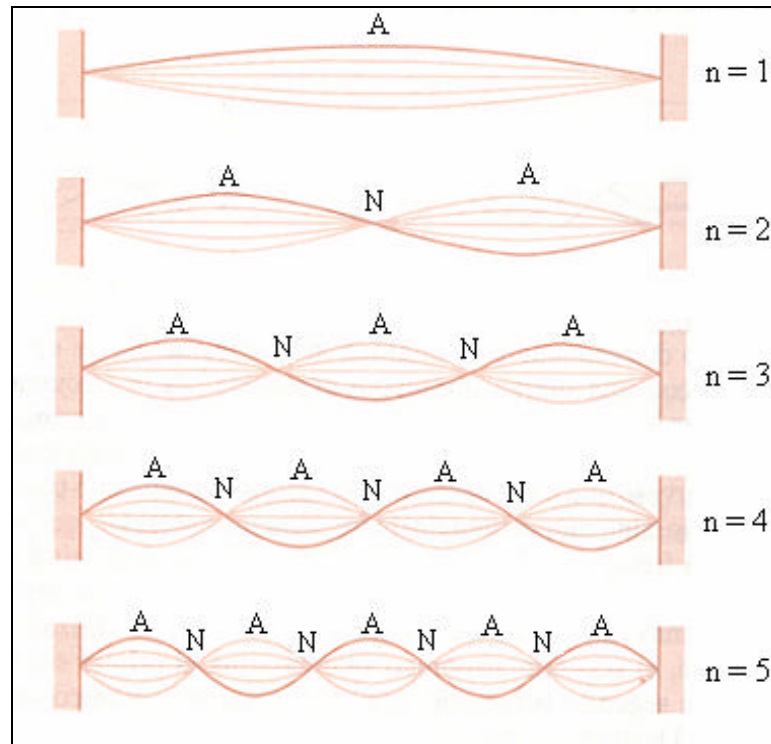


Figura 1.10.- Ones estacionàries o harmònics.

Els punts que romanen en repòs reben el nom de **nodes**, i en general, n'hi ha $n-1$ (sense comptar els extrems $x = 0$ i $x = L$ per l'enèsim harmònic. D'altra banda, els punts on l'amplitud de vibració és màxima s'anomenen **ventres** i el seu nombre és igual a n .

Corda fixa en un extrem

També es poden produir ones estacionàries en una corda amb un extrem lliure en lloc de fix. Aquestes condicions poden aconseguir-se si es lliga l'extrem lliure amb un fil molt llarg i lleuger.

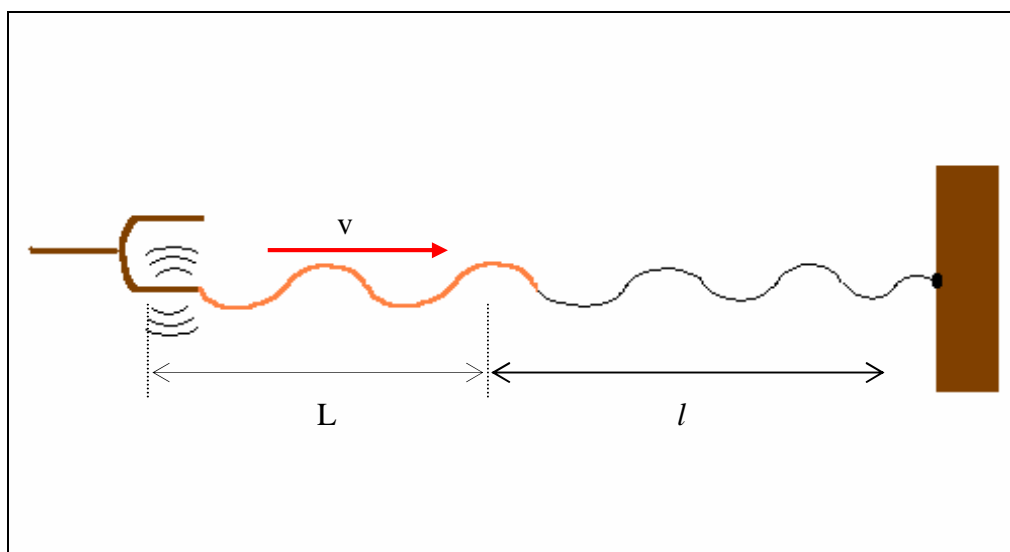


Figura 1.11.- Corda que vibra amb un extrem lliure lligada a un diapasó de freqüència f .

Per produir l'efecte d'extrem lliure cal que $l \gg L$. Així, quan la primera ona es reflexa en l'extrem lliure del fil no s'inverteix; pel contrari, sí que ho fa quan es reflexa en el diapasó. La *interferència constructiva* es produeix si el temps emprat per a que la primera ona recorri dues vegades la longitud de la corda és igual a $3/2$ vegades el període, $5/2$ vegades el període o qualsevol nombre senar de semiperíodes. En aquest cas, doncs, la condició de ressonància per a ones estacionàries és:

$$\frac{2L}{v} = \frac{nT}{2} \Rightarrow n \frac{L}{4} = L$$

Les freqüències naturals també poden posar-se en funció de la fonamental segons:

$$f_1 = \frac{v}{4L} \quad i \quad f_n = nf_1$$

En la figura s'aprecien els harmònics de les ones estacionàries que es produeixen en una corda amb un extrem lliure, que es converteix en un ventre.

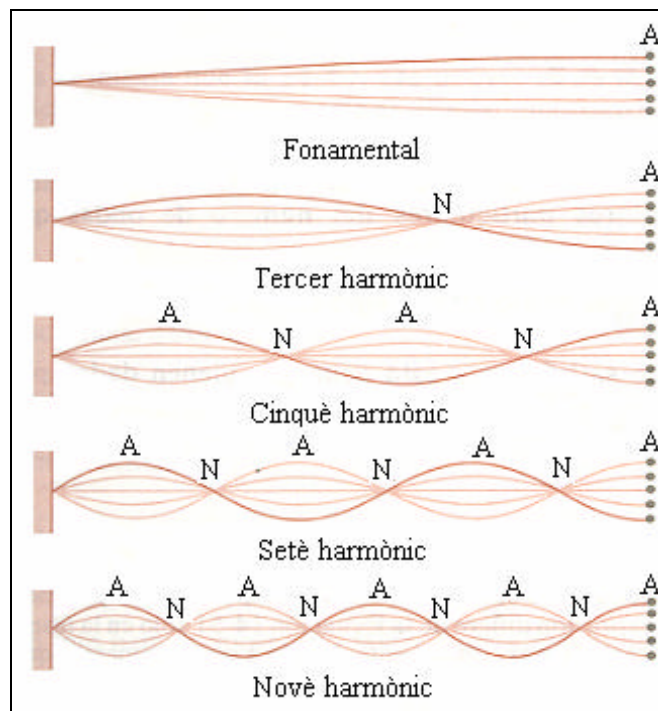


Figura 1.12.- Harmònics de les ones estacionàries en una corda amb un extrem lliure.

Funcions d'ona estacionàries

És possible deduir la forma matemàtica de les funcions d'ona que apareixen en les il·lustracions (1.11) i (1.12) considerant l'ona resultant formada per la suma d'una ona que es mou cap a la dreta, y_D , i d'una altra que es desplaça cap a l'esquerra, y_E . Així mateix, s'admet que les respectives amplituds, y_0 , són iguals. Llavors:

$$y_D = y_0 \sin(Kx - wt) \quad i \quad y_E = y_0 \sin(Kx + wt)$$

La suma d'aquestes ones és

$$y(x,t) = y_D + y_E = y_0 \sin(Kx - \omega t) + y_0 \sin(Kx + \omega t)$$

Aquesta expressió pot simplificar-se emprant una identitat trigonomètrica i fent les corresponents identificacions:

$$\sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right) \Rightarrow \begin{cases} \frac{A+B}{2} = kx \\ \frac{A-B}{2} = \omega t \end{cases}$$

Lavors l'ona estacionària resultant és:

$$\boxed{y(x,t) = 2y_0 \cos \omega t \sin Kx} \quad (1.15)$$

A partir d'aquesta funció i les corresponents condicions límit poden trobar-se les condicions de ressonància per les cordes trobades anteriorment. Si la corda és fixa pels dos extrems les condicions límit, per qualsevol temps t , són:

$$y(x = 0, t) = 0 \quad i \quad y(x = L, t) = 0$$

La primera condició es compleix automàticament, mentre que la segona es verifica només pels valors que anul·len el *sinus*.

$$\sin kx = 0 \text{ en } x = 0 \quad i \quad \sin kL = 0 \Leftrightarrow k_n L = n\pi$$

Ara, emprant la definició de nombre d'ona s'obté la condició de ressonància:

$$\boxed{\frac{2\pi}{\lambda_n} L = n\pi \Rightarrow n \frac{\lambda_n}{2} = L} \quad (1.16)$$

Pel contrari, si la corda té un dels extrems lliure, les condicions límit són ara

$$y(x = 0, t) = 0 \quad i \quad y(x = L, t) \rightarrow \text{Max} \Leftrightarrow \sin k_n L = \pm 1$$

perquè l'extrem lliure, el punt $x = L$, és un ventre. A partir d'aquestes consideracions s'obté la corresponent condició de ressonància:

$$\boxed{k_n L = \frac{n\pi}{2} \Rightarrow n \frac{\lambda_n}{4} = L} \quad (1.17)$$

Molts d'aquests conceptes de les ones estacionàries que es generen en cordes vibrants, són aplicables a les ones sonores, les quals són el veritable objecte d'estudi d'aquest treball.

1.2.6.- Ones sonores estacionàries

Gran part dels resultats obtinguts en l'estudi de les ones estacionàries en cordes són aplicables a les ones sonores estacionàries. Es poden generar aquest tipus d'ones sota determinades

condicions de contorn en l'espai. El cas més senzill pot ocórrer dins un tub ple d'aire i tancat per ambdós extrems. Un d'ells, però, és un pistó mòbil que pot fer petits desplaçaments, per la qual cosa la condició per obtenir ones estacionàries és la mateixa que la corresponent a una corda fixa per ambdós extrems.

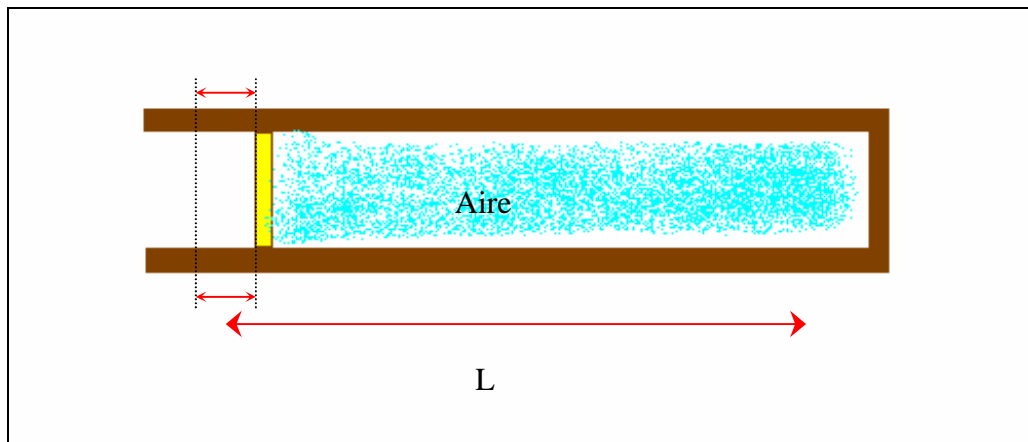


Figura 1.13.- Aire tancat dins un tub amb un pistó mòbil.

En l'extrem de la dreta l'aire no pot vibrar, per la qual cosa aquest punt és un node. Així mateix, si la vibració en el pistó del costat esquerre és de petita amplitud, aquest extrem també pot considerar-se en bona aproximació un node de desplaçament. En aquestes condicions la condició d'ona estacionària és la mateixa que per una corda fixa pels dos extrems i es poden aplicar les mateixes equacions. Anàlogament doncs, la distància $2L$ ha de contenir un nombre sencer de longituds d'ona.

$$n\lambda = 2L \Rightarrow n\frac{\lambda}{2} = L \quad i \quad 2L = n\frac{v}{f}$$

resulta que les longituds d'ona permeses són les que s'ajusten dins el tub amb nodes de desplaçament en els extrems, que són alhora antinodes de pressió, donat que està desfasada 90° respecte el desplaçament. Hi ha tubs, en els instruments musicals per exemple, amb un extrem obert a l'atmosfera. Aquest punt és un node de pressió i un ventre de desplaçament. La condició per a que es generin ones estacionàries és la mateixa que per les cordes amb un extrem lliure i l'altre fix; només hi ha harmònics senars i la longitud d'ona del mode de vibració fonamental és igual a quatre vegades la longitud del tub.

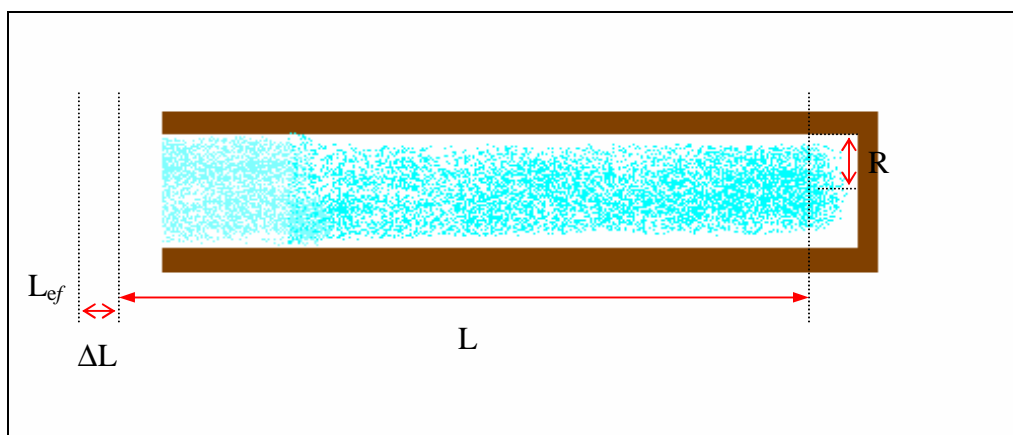


Figura 1.14.- Tub amb un extrem obert a la pressió atmosfèrica.

Aquestes consideracions, però, únicament són certes si el diàmetre del tub és molt petit comparat amb la longitud d'ona del so. Cal tenir en compte també, que en aquestes condicions, el node de pressió i l'antinode de desplaçament es troben una mica desplaçats en relació al veritable extrem obert i cal fer una petita correcció, ΔL , de l'ordre igual al radi, R , del tub. La longitud efectiva, L_{ef} , és:

$$L_{ef} = L + \Delta L$$

Ara, la distància entre dos nodes o antinodes segueix essent la meitat de la longitud d'ona, malgrat que la distància des de l'extrem obert del tub al primer node de desplaçament és lleugerament menor que $\lambda/4$, degut precisament a aquesta correcció en l'extrem. Un tub d'òrgan és un bon exemple per visualitzar ones estacionàries en columnes d'aire, on les freqüències de ressonància depenen de la longitud del tub i del tancament o obertura de l'altre extrem.

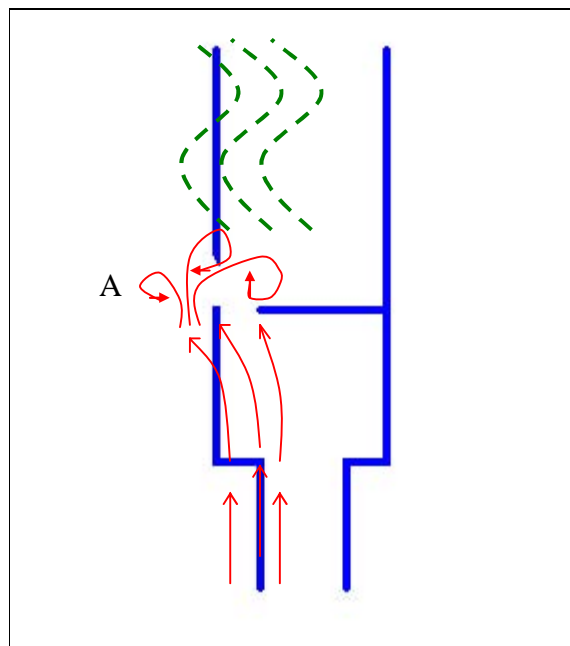


Figura 1.15.- Tall transversal d'un tub d'òrgan.

Quan passa un corrent d'aire pel punt A es produeixen remolins d'aire en aquesta zona que provoquen l'aparició d'ones estacionàries en el tub i es crea un node de pressió en aquest punt. En un tub d'òrgan tancat hi ha un antinode de pressió en l'extrem tancat i un node de pressió prop de l'obertura (punt A de la figura 1.15). En aquest cas la longitud d'ona del primer harmònic és aproximadament quatre vegades la longitud del tub i només s'hi generen els modes senars. Si el tub d'òrgan és obert existeix un node de pressió en els dos extrems i ara la longitud de l'ona fonamental és igual a només dues vegades la longitud efectiva del tub i estan presents tots els harmònics.

1.2.7.- Composició de nivells

Normalment, en un mateix espai hi interfereixen sons que provenen de diverses fonts que produeixen diferents pressions que varien en funció del temps: $p_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Si les intensitats sonores instantànies, $p_i(t)$ no són gaire elevades, la pressió eficaç total serà la suma de les respectives pressions (*rang lineal*)

$$P(t)_{rms} = \sum_{i=1}^n p_i(t) = p_1(t) + p_2(t) + \dots + p_n(t)$$

El valor eficaç de la pressió sonora pot obtenir-se generalitzant l'equació (1.1) per vèries fonts puntuals, fent la mitjana temporal i integrant sobre el temps.

$$P_{rms}^2(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \left[\sum_i p_i(t) \right]^2 dt = \sum_i P_{irms}^2 + \frac{2}{t_2 - t_1} \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} \int_{t_1}^{t_2} p_i(t) p_j(t) dt$$

on el terme $\sum_i P_{irms}^2$, representa la contribució dels termes quadràtics del desenvolupament.

$$\sum_i P_{irms}^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2$$

Si el valor absolut de la integral corresponent als termes creuats $p_i(t) \cdot p_j(t)$ és molt petit o nul, significa que entre aquests termes hi ha poca o gairebé nul·la correlació i pot menysprear-se en el càlcul. Llavors l'expressió de la pressió sonora resultant eficaç és redueix a:

$$P_{rms}^2(t) = \sum_i P_{irms}^2$$

Pot expressar-se el valor de la pressió en l'escala logarítmica, prenent com origen la pressió de referència: $2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

$$L_T = 10 \log \sum_i \frac{P_{irms}^2}{P_{ref}^2} \tag{1.18}$$

Aplicant les propietats dels logaritmes podem expressar la pressió total a partir de cadascun dels nivells, doncs:

$$\frac{L_i}{10} = \log \left[\frac{P_{irms}^2}{P_{ref}^2} \right] \Rightarrow \left[\frac{P_{irms}^2}{P_{ref}^2} \right] = 10^{\frac{L_i}{10}}$$

Així substituint aquest quocient en l'equació (1.18) s'obté la fórmula de la composició de nivells per a sorolls aleatoris.

$$L_T = 10 \log \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} \tag{1.19}$$

Com ja s'ha esmentat, aquesta mesura del so es fa a partir de tècniques i paràmetres objectius que no depenen de l'opinió de l'observador. Per avaluar la sensació o molèstia que una mateixa pertorbació sonora provoca sobre oients diferents i que, depèn en última instància del criteri de cadascun dels individus, cal emprar mètodes diferents, però que en última instància són complementaris de les tècniques descrites fins ara.

1.2.8.- Propagació de l'ona sonora

Un “radiador isòtrop” és una font esfèrica on l'aire que l'envolta experimenta una sobtada compressió. Aquesta pertorbació es propaga en totes les direccions arribant, en un mateix instant, a tots els punts de la superfície d'una esfera centrada en el punt 0, que s'anomena **front d'ona**, **S**, o **superfície d'ona**. En la gràfica s'observa com els diferents fronts d'ona: S, S' i S'' tenen simetria esfèrica respecte l'origen de la pertorbació.

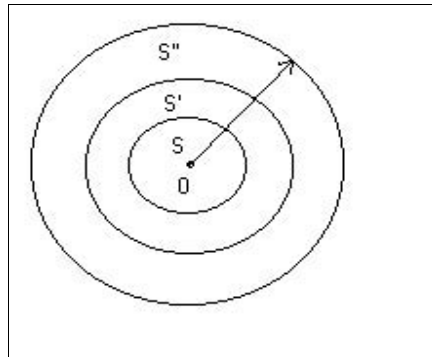


Figura-1.16.- Ones esfèriques.

Si la pertorbació provocada en 0 és periòdica, el conjunt de punts del medi que estan en el mateix estat de vibració són una família de superfícies esfèriques concèntriques, separades entre sí per un espai igual al de la longitud d'ona. Això s'aconsegueix fent que el radi de l'esfera experimenti contraccions i dilatacions periòdiques, la qual cosa permet donar una definició equivalent de front d'ona com el lloc geomètric dels punts en que les vibracions tenen la mateixa fase en el mateix instant. Si s'examina el moviment dels punts situats molt lluny de la font per un petit angle sòlid Ω el vèrtex del qual és la font de la pertorbació, es pot confondre la part Q de la superfície esfèrica pel corresponent pla tangent; o sigui, a grans distàncies de la font, les porcions de superfície d'ona es poden considerar com fronts d'ones planes i la línia normal en cadascun dels seus punts s'anomena **raig**.

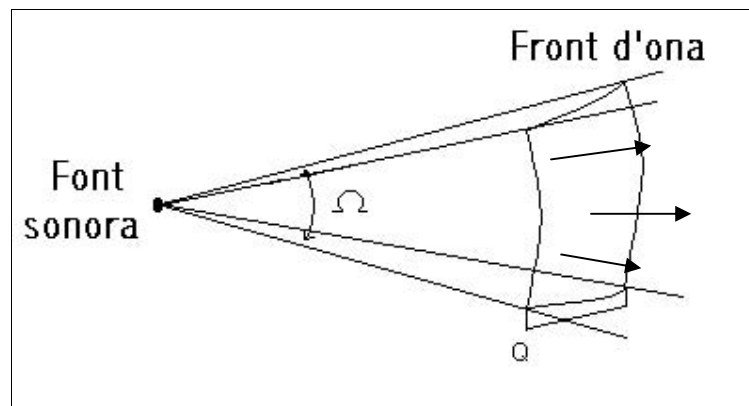


Figura 1.17.- Raigs normals als fronts d'ona.

Per obtenir l'expressió del desplaçament de les partícules de l'ona s'empren tres equacions bàsiques: la de continuïtat, propietats elàstiques i esforços per fluids, l'estudi de les quals es detalla seguidament.

1.2.9.- Equació d'ones general i velocitat de propagació

Es considera el vector de la posició en equilibri i el desplaçament d'una partícula en un medi fluid respectivament com:

$$\vec{r}(x, y, z) \quad i \quad \vec{s}(\mathbf{x}, \mathbf{h}, \mathbf{u})$$

Així, el vector velocitat és la derivada del vector desplaçament respecte el temps.

$$\vec{v} = \frac{\partial \vec{s}}{\partial t} = \left(\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t}, \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}, \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right)$$

Si en un element de volum “ $dx dy dz$ ” (Fig. 1.18) hi incideix una ona sobre cada parell de superfícies paral·leles originant desplaçaments $\delta\xi$, $\delta\eta$, $\delta\upsilon$ i tenint en compte que cadascuna d'aquestes desviacions afecta a dues cares paral·leles del cub, l'increment de volum que experimenta aquest element del fluid és:

$$V_f = V_i + \Delta V = dx dy dz + 8 \cdot dx dh du + (dy dz dx + dx dz dh + dx dy du) + (dx du dh + dy du dx + dz dh dx)$$

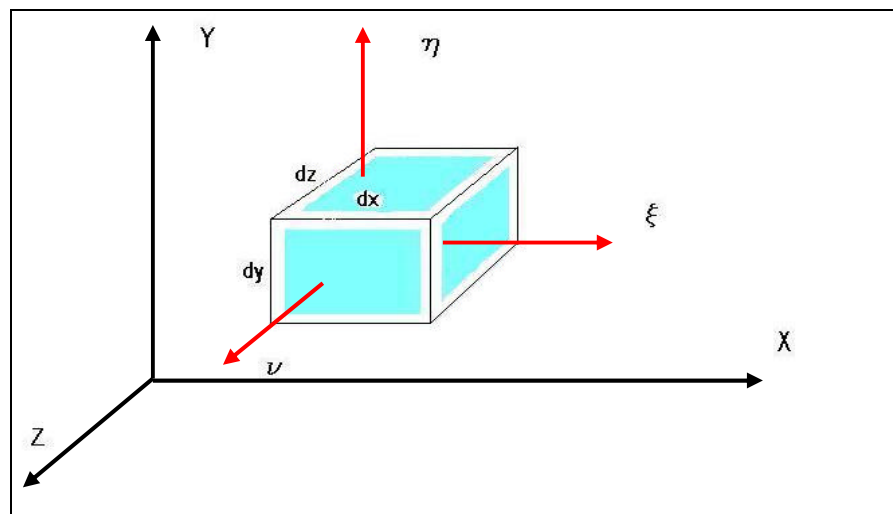


Figura 1.18.- Element de volum d'un fluid.

Prenent dilatacions infinitesimals aquesta expressió pot posar-se, desenvolupant els diferencials i agrupant termes, com:

$$V_f = dx dy dz \left(1 + \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial x} \right) \left(1 + \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial y} \right) \left(1 + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right)$$

Ara, és possible expressar aquesta fórmula en termes de la densitat, ρ , i la condensació, θ , entesa aquesta última com la variació de la densitat, tenint en compte que malgrat l'element de volum experimenti una dilatació la seva massa no varia. En termes de la condensació resulta la següent relació entre la densitat inicial, ρ_i , i la final, ρ_f .

$$\mathbf{q} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\mathbf{r}_i} = \frac{\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_i}{\mathbf{r}_i} \Rightarrow \mathbf{r}_f = \mathbf{r}_i (1 + \mathbf{q})$$

Després de la dilatació que té lloc després de la pertorbació provocada per l'ona, la massa de la regió objecte d'estudi no varia, llavors podem escriure les següents igualtats on m representa la massa:

$$m_i = m_f \Rightarrow \mathbf{r}_i V_i = \mathbf{r}_f V_f \Rightarrow \mathbf{r}_i V_i = \mathbf{r}_i (1 + \mathbf{q}) V_i \left(1 + \frac{\mathcal{J}\mathbf{x}}{\mathcal{J}x}\right) \left(1 + \frac{\mathcal{J}\mathbf{h}}{\mathcal{J}y}\right) \left(1 + \frac{\mathcal{J}\mathbf{u}}{\mathcal{J}z}\right)$$

Simplificant el volum i la densitat inicial en els dos termes de l'equació resulta finalment:

$$1 = (1 + \mathbf{q}) \left(1 + \frac{\mathcal{J}\mathbf{x}}{\mathcal{J}x}\right) \left(1 + \frac{\mathcal{J}\mathbf{h}}{\mathcal{J}y}\right) \left(1 + \frac{\mathcal{J}\mathbf{u}}{\mathcal{J}z}\right)$$

Ara, considerant elements de volum prou petits per poder aplicar el càlcul infinitesimal es poden menysprear els termes on apareixen conjuntament els canvis de densitat i de desplaçament, per la qual cosa desapareixen els productes del tipus

$$\frac{\mathcal{J}\mathbf{x}}{\mathcal{J}x} \cdot \frac{\mathcal{J}\mathbf{h}}{\mathcal{J}y} \rightarrow 0 \quad i \quad \mathbf{q} \cdot \frac{\mathcal{J}\mathbf{x}}{\mathcal{J}x} \rightarrow 0$$

Resulta la forma tridimensional de l'**equació de continuïtat** que relaciona la condensació, o variació de densitat, amb la variació del desplaçament i que emprant l'operador vectorial divergència pot posar-se com:

$$\mathbf{q} = - \left(\frac{\mathcal{J}\mathbf{x}}{\mathcal{J}x} + \frac{\mathcal{J}\mathbf{h}}{\mathcal{J}y} + \frac{\mathcal{J}\mathbf{u}}{\mathcal{J}z} \right) = - \operatorname{div} \vec{r} = - \vec{\nabla} \cdot \vec{r}$$

Suposant, en bona aproximació, que el procés és adiabàtic (no hi ha intercanvi de calor), podem relacionar la pressió, P , amb la densitat, ρ , mitjançant una equació simbòlica $P = P(\rho)$. Diferenciant aquesta equació i tenint en compte que la variació de pressió dP pot substituir-se per la pressió acústica p , si es consideren petits desplaçaments, s'obté la següent fórmula:

$$dP = p = \left(\frac{dP}{d\mathbf{r}} \right)_0 d\mathbf{r} \Rightarrow p = \mathbf{r}_i c^2 \mathbf{q}$$

on s'ha aproximat $d\mathbf{r} \approx \Delta \mathbf{r} = \mathbf{q} \mathbf{r}_i$ i s'ha fet l'equivalència: $c^2 \equiv \left(\frac{dP}{d\mathbf{r}} \right)_0$

La constant, c , representa la velocitat amb que les ones acústiques es propaguen pel fluid en funció del pendent mesurat en el punt de coordenades (P_0, ρ_0) . Seguidament es deduirà una relació entre la velocitat i aquestes dues variables. Primer, cal expressar l'equació d'estat pròpia d'un gas ideal: $PV = nRT$, per un procés adiabàtic quasi estàtic, on només intervinguin explícitament dues variables. Per aconseguir-ho partim del principi de conservació de l'energia:

$$\boxed{dU = dQ + dW} \tag{1.20}$$

que relaciona els increments infinitesimals d'energia interna, dU , amb la suma de les respectives variacions de calor i treball, les quals poden desenvolupar-se com:

$$dU = C_v dT \quad i \quad dW = -PdV$$

La primera d'aquestes relacions ens indica que l'energia interna, en un gas ideal, només depèn de la capacitat calorífica a volum constant, C_v , i de les variacions de temperatura, mentre que la segona expressió correspon a la definició clàssica de treball mecànic. Substituint-les en l'equació (1.21) s'estableix que

$$dQ = C_v dT + PdV$$

Anàlogament podem trobar una altra fórmula que relacioni l'increment de calor amb la capacitat calorífica a pressió constant, C_p , tenint en compte que per un gas ideal es verifiquen dues condicions

$$C_p = C_v + nR \quad i \quad PdV + VdP = nRdT$$

Col·locant-les en l'equació anterior permeten escriure el principi de conservació de l'energia com:

$$dQ = C_v dT + nRdT - VdP = (C_v + nR)dT - VdP \Rightarrow \\ dQ = C_p dT - VdP$$

Tenint present que en aquestes igualtats el terme corresponent a dQ és nul, doncs es tracta d'un procés adiabàtic, resulta que

$$VdP = C_p dT \quad i \quad PdV = -C_v dT$$

i dividint la primera d'aquestes dues expressions per la segona pot escriure's

$$\frac{dP}{P} = -\frac{C_p}{C_v} \frac{dV}{V} = -\gamma \frac{dV}{V}$$

on s'ha identificat la relació entre les capacitats calorífiques amb la constant, γ , la qual en un procés on no hi ha intercanvi de calor i per moderades variacions de temperatura gairebé no experimenta cap canvi. Considerant, doncs, que és constant i integrant, s'obté l'equació d'estat per un gas ideal en un procés adiabàtic

$$\boxed{PV^\gamma = \text{constant}} \quad (1.21)$$

Aquesta equació pot posar-se en funció de la densitat i una constant com:

$$PV^\gamma = \text{cte.} \Rightarrow P = \frac{\text{cte.}}{V^\gamma} = \frac{\text{cte.}}{\left(\frac{m}{r}\right)^\gamma} = \frac{\text{cte.}}{m^\gamma} r^\gamma \Rightarrow P = Kr^\gamma$$

$$\text{Diferenciant: } dP = \gamma Kr^{\gamma-1} dr \Rightarrow \frac{dP}{dr} = \gamma \frac{Kr^\gamma}{r} = \gamma \frac{P}{r}$$

Ara estem en condicions de calcular la velocitat d'una ona sonora en un fluid en funció de les variables termodinàmiques de la pressió i densitat, coneguda la constant adiabàtica, γ . Per l'aire, en condicions normals d'equilibri, tenim els següents valors: $\gamma = 1'402$, $P_0 = 1'013 \cdot 10^5$ N/m² i $\rho_0 = 1'293$ kg/m³, que substituïts en la fórmula de la velocitat resulta:

$$c = \sqrt{\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_0} = \sqrt{g \frac{P_0}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{1'402 \cdot 1'013 \cdot 10^5}{1'293}} = 331'6 \text{ m/s}$$

Així, gràcies a les relacions anteriors, podem expressar la pressió acústica, en funció de la densitat, el quadrat de la velocitat i el gradient de la posició com:

$$p = -\rho_0 c^2 \vec{\nabla} \cdot \vec{r} \quad (1.22)$$

Aquí podem considerar la deformació que experimenta un element infinitesimal de la massa d'aire per on es propaga l'ona sonora (figura 1.18). Llavors, tenint en compte l'equació general de la dinàmica que relaciona la força que s'aplica sobre un cos amb l'acceleració que experimenta, pot escriure's

$$\rho_0 \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\rho_0 \vec{\nabla} p$$

on s'ha simplificat el diferencial de volum, $S dr$, resultant l'equació de força per una ona tridimensional. Si es torna a aplicar l'operador gradient, pot posar-se aquesta equació en funció de l'operador laplaciana com:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} p = \nabla^2 p = \rho_0 \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$

Finalment, si es relaciona aquesta última expressió amb l'equació (1.23) tot substituint el gradient del vector posició en funció dels altres termes s'obté l'expressió de l'**equació general** d'una ona tridimensional

$$\frac{d^2 p}{dt^2} = c^2 \nabla^2 p = c^2 \left[\frac{d^2 p}{dx^2} + \frac{d^2 p}{dy^2} + \frac{d^2 p}{dz^2} \right] \quad (1.23)$$

Aquesta equació està donada en un sistema de coordenades cartesianes, però fent un raonament similar s'obtenen expressions semblants per estudiar ones cilíndriques o esfèriques. Un tipus d'ones importants són les ones esfèriques en que les vibracions són harmòniques. Podem deduir l'equació d'aquestes ones a partir de l'equació general d'ones (1.24), posant en primer lloc l'operador laplaciana en coordenades esfèriques.

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\frac{d}{d\theta} \sin \theta \frac{d}{d\theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{d^2}{d\varphi^2}$$

on r és la distància al centre de l'esfera, θ és l'angle polar i φ l'angle azimutal, tal com s'indica en aquesta il·lustració:

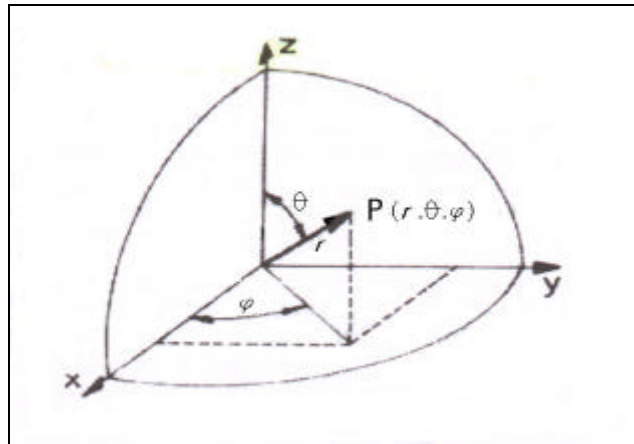


Figura 1.19.- Coordenades esfèriques.

Llavors, considerant que la pressió acústica és funció de la distància radial i el temps, $p(r, t)$, però no de les coordenades angulars, l'equació d'ones pot escriure's com:

$$\frac{\partial^2 (r \cdot p)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (r \cdot p)}{\partial r^2}$$

Si es considera com a variable d'aquesta equació el producte $r \cdot p$, la solució general és de la forma:

$$r \cdot p = f(ct - r) + g(ct + r) \Rightarrow p = \frac{1}{r} f(ct - r) + \frac{1}{r} g(ct + r)$$

El primer terme d'aquesta equació representa una ona esfèrica divergent que surt de l'origen de coordenades amb una velocitat c , el segon terme representa una ona similar però convergent cap a l'origen. Si les vibracions són harmòniques aquestes ones poden expressar-se en forma complexa com:

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr) \quad (1.24)$$

on s'aprecia que la pressió sonora és inversament proporcional a la distància a la font. Així mateix, la pressió es dona com la part real d'aquesta equació en virtut de la relació de Moivre ($e^{ja} = \cos a + j \sin a$). Ara, en virtut de l'equació general de la dinàmica podem trobar la **velocitat** d'una partícula segons

$$r_i \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} = - \frac{\partial p}{\partial r} \Rightarrow v = \frac{\partial r}{\partial t} = - \frac{1}{r_i} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt$$

Si la pressió acústica té una dependència funcional de la forma $e^{j\omega t}$, llavors integrant l'equació anterior respecte el temps podem posar:

$$v = - \frac{1}{j\omega r_i} \frac{\partial p}{\partial r}$$

i substituint per la forma complexa de la pressió resulta finalment:

$$v = -\frac{1}{j\omega r_i} \frac{\mathcal{F}p}{\mathcal{F}r} = -\frac{1}{j\omega r_i} \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{F}r} \left(\frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \right) = -\frac{1}{j\omega r_i} \left(-\frac{A}{r^2} e^{j(\omega t - kr)} + \frac{A}{r} (-kj) e^{j(\omega t - kr)} \right) =$$

$$= \left(\frac{1}{r} + jk \right) \frac{p}{j\omega r_i} \Rightarrow \frac{p}{v} = \frac{j\omega r_i}{\left(\frac{1}{r} + jk \right)} = r_i c \frac{kr}{1 + k^2 r^2} (kr + j)$$

emprant la forma polar dels nombres complexos podem posar aquesta fórmula en funció d'una diferència de fase β , doncs:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sin} \equiv kr + j \\ |n| = \sqrt{1 + k^2 r^2} \\ \mathbf{b} = \arctg \frac{1}{kr} \end{array} \right\} \Rightarrow z = \frac{p}{v} = \frac{r_i c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} e^{j\mathbf{b}}$$

on z es defineix com la **impedància acústica específica** i il·lustra el fet que existeix una diferència de fase, β , entre la pressió i la velocitat de la partícula. Ara podem expressar la velocitat en funció de la pressió i aquest desfasament considerant únicament la part real del nombre complexa:

$$\left. \begin{array}{l} p = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr) \\ z = \frac{r_i c k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} e^{j\mathbf{b}} \end{array} \right\} \Rightarrow v = \frac{p}{z} = \frac{A \sqrt{1 + k^2 r^2}}{r_i c k r^2} \cos(\omega t - kr - \mathbf{b})$$

Ara estem en condicions de definir una magnitud fonamental en el nostre estudi: la **intensitat** d'una ona esfèrica que es defineix com el treball realitzat per unitat de temps i per unitat de superfície:

$$I = \frac{dW}{dS dt} = \frac{p dv}{ds dt} = \frac{p ds dl}{ds dt} = p v$$

En l'expressió anterior s'ha considerat que la velocitat és precisament dl/dt . Així, la intensitat pot posar-se com el producte de la pressió per la velocitat. El seu valor en un període complet d'una ona, serà:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p v dt = \frac{1}{T} \int_0^T [p_0 \cos(\omega t - kr)] \cdot [v_0 \cos(\omega t - kr - \mathbf{b})] dt = \frac{p_0 v_0 \cos \mathbf{b}}{2}$$

on s'han fet les següents identificacions per la velocitat i la pressió inicials:

$$p_0 = \frac{A}{r} \quad i \quad v_0 = \frac{A \sqrt{1 + k^2 r^2}}{r_i c k r^2}$$

Així, la intensitat d'una ona acústica es defineix com el valor mig del flux d'energia que travessa una àrea unitat normal a la direcció de propagació de l'ona. Les seves unitats són $J/(sm^2)$ i com és una potència transmesa per unitat d'àrea pot expressar-se també amb W/m^2 . L'expressió de la intensitat, però, pot posar-se d'una forma molt més útil sense el terme que

inclou el desfasament, $\cos\beta$. Això pot fer-se, prenent mòduls, a partir de la relació entre la impedància, les amplituds de pressió i la velocitat.

$$z = \frac{p_0}{v_0} = r_0 c \frac{k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}} \quad \text{amb} \quad |e^{j\beta}| = 1$$

Emprant el valor del desfasament a partir de la tangent i utilitzant la relació fonamental de la trigonometria podem posar aquest terme, $\cos\beta$, com:

$$\left. \begin{array}{l} \cos^2 \mathbf{b} + \sin^2 \mathbf{b} = 1 \\ \operatorname{tg} \mathbf{b} = \frac{1}{k r} \end{array} \right\} \Rightarrow \cos \mathbf{b} = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \mathbf{b}}} = \frac{k r}{\sqrt{1 + k^2 r^2}}$$

que simplifica l'anterior relació.

$$z = \frac{p_0}{v_0} = r_0 c \cos \mathbf{b} \Rightarrow v_0 \cos \mathbf{b} = \frac{p_0}{r_0 c}$$

Cal dir, però, que la impedància acústica d'un material es calcula sense tenir en compte el terme corresponent al desfasament, $\cos\beta$, negligible a efectes pràctics, llavors suposant un medi amb densitat uniforme:

$$\boxed{z = r c} \quad (1.25)$$

on ρ és la densitat del material i c representa la velocitat de l'ona dins el medi. La impedància es mesura en *ohms acústics* o *rayls*. 1 rayl es defineix com la resistència que oposa un material amb una densitat de 1 Kg/m^3 al pas d'una ona que es propaga amb una velocitat de 1 m/s. D'altra banda, recuperant l'expressió obtinguda de la intensitat en funció del desfasament, podem escriure aquesta magnitud sense relacions angulars.

$$I = \frac{p_0 v_0 \cos \mathbf{b}}{2} = \frac{p^2}{2 r c}$$

1.2.10.- Variació de la pressió acústica en funció de la distància

Quan s'estudien els fenòmens acústics, però, degut al ampli rang que prenen els valors de la pressió i la intensitat (només en el rang de l'audible la intensitat varia des de 10^{-12} a 10 W/m^2) s'utilitza una escala logarítmica per tal de comprimir l'escala de valors. L'escala logarítmica més emprada per descriure els nivells acústics és l'escala de decibels (dB), llavors els valors dels nivells de pressió venen donats per:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_{ref}} \text{ (dB)} \quad \text{amb} \quad p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N / m}^2$$

on p_{ref} és la pressió de referència que s'empra per calcular els nivells de pressió acústica en l'aire. Moltes fonts de soroll poden aproximar-se a una font puntual esfèrica, la qual cosa permet calcular la pèrdua de pressió acústica que experimenta l'ona quan travessa l'aire. Cal dir,

però, que aquests càlculs no són exactes, només ho serien en un medi de densitat uniforme, homogeni i isòtrop, on no hi haguessin moviments de masses d'aire, precipitacions, tempestes ..., tal com succeeix a l'atmosfera. No obstant, és il·lustrador fer el càlcul de pèrdua de pressió en un el cas ideal. Suposem, doncs, una ona esfèrica de pressió amb una amplitud inversament proporcional a la distància a la font.

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \Rightarrow p^2 = \frac{A^2}{r^2} |e^{j(\omega t - kr)}|^2 \Rightarrow p = \sqrt{\frac{A^2}{r^2}}$$

ara, emprant l'escala logarítmica que relaciona la pressió final amb una pressió inicial o de referència tenim que:

$$L_p(r) = 20 \log \frac{p_f}{p_i} = 20 \log \frac{\sqrt{A^2/r_f^2}}{\sqrt{A^2/r_i^2}} = 20 \log \sqrt{\frac{r_i^2}{r_f^2}}$$

Fent l'aproximació consistent en que el soroll és provocat per una font puntual esfèrica de radi unitat, la seva superfície serà: $4\pi(1)^2$, que es substitueix per la distància inicial, r_i , resultant:

$$L_p(r) = 20 \log \sqrt{\frac{r_i^2}{r_f^2}} = 20 \log \sqrt{\frac{4\mathbf{p}(1)^2}{r_f^2}} = 20 \log (4\mathbf{p})^{\frac{1}{2}} - 20 \log r_f = 10 \log 4\mathbf{p} - 20 \log r_f$$

llavors, si es considera una distància inicial r , i que la ona es propaga el doble d'aquesta mesura, sempre que es dupliqui la distància per qualsevol valor de r s'obté:

$$\begin{aligned} L_p(2r) - L_p(r) &= \\ 10 \log 4\mathbf{p} - 20 \log 2r - [10 \log 4\mathbf{p} - 20 \log r] &= \\ = -20 \log 2 - 20 \log r + 20 \log r &= -20 \log 2 \approx -6 \text{ dB} \end{aligned}$$

1.2.11.- Variació de la pressió acústica en funció de les condicions atmosfèriques

En l'apartat anterior s'ha vist com la pressió acústica, p , depèn en segon ordre, de la velocitat de les ones, c , en el medi.

$$p = r c^2 q = f(c^2)$$

La velocitat del so, però, malgrat no depèn dels canvis en la pressió baromètrica, la freqüència ni la longitud d'ona, no és constant, doncs està estretament lligada a les variacions de temperatura. Aquest fet pot veure's a partir de l'equació d'estat del gas ideal.

$$PV = nRT = \frac{m}{M} RT = \frac{V}{M} RT \Rightarrow \frac{P}{r} = RMT$$

on m és la massa del gas, M el pes molecular, ρ la densitat i R la constant universal dels gasos. Considerant l'anterior expressió i l'equació que relaciona la velocitat amb la pressió i la densitat del medi es pot escriure

$$\boxed{c(T) = \sqrt{\mathbf{g} \frac{P}{r}} = \sqrt{\frac{\mathbf{g}RT}{M}}} \quad (1.26)$$

Aquesta expressió, malgrat que s'ha obtingut pels gasos perfectes pot aplicar-se a l'aire. Pot esbrinar-se, però, una relació lineal entre la velocitat de propagació del so i la temperatura. El valor de la velocitat a una temperatura qualsevol amb relació a la velocitat de 0° és:

$$c(T) = \sqrt{\frac{gRT}{M}} \quad i \quad c(T_0) = \sqrt{\frac{gRT_0}{M}}$$

dividint aquestes dues expressions i prenent l'escala Kelvin com referència de la temperatura:

$$c(T) = c(T_0) \sqrt{\frac{T}{T_0}} = c(T_0) \sqrt{\frac{273+T}{273}} = \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \approx c(T_0) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{273}\right)$$

on l'arrel quadrada s'ha desenvolupat en sèrie de McLaurin fins a segon ordre. Finalment substituint el valor de $c(T_0)$, resulta:

$$\boxed{c(T) = 331'6 + 0'6T \quad (m/s)} \quad (1.27)$$

i s'aprecia que el gradient de la velocitat és: $\frac{dc}{dT} = 0'6$

Ara, coneixent la dependència de la velocitat en funció de la temperatura, podem fer una estimació de la variació de la pressió acústica, doncs s'ha vist que existeix una relació. Els càlculs es traslladaran a l'escala de decibels per reflectir l'ordre de magnitud de l'error associat a les mesures experimentals. Així, considerant negligibles les fluctuacions de la densitat, ρ , i la condensació, θ , resulta que la fluctuació de la pressió al voltant del valor de referència provoca una variació en l'escala de decibels aproximadament igual a

$$L_p = 20 \log \frac{P_{Max.}}{P_{Min.}} \text{ dB} = 20 \log \frac{c^2(41^\circ C)}{c^2(27^\circ C)} = 20 \log \frac{(356 \text{ m/s})^2}{(348 \text{ m/s})^2} \approx 0'4 \text{ dB}$$

El valor de 41°C correspon a la temperatura màxima enregistrada a Girona un dels dies de màxima variació: el 13 d'agost del 2003 (veure apèndix AD). S'ha escollit per velocitat de referència la corresponent a la temperatura diürna mínima de la ciutat en aquest mateix dia: 27°C aproximadament. S'observa que les màximes fluctuacions de la pressió acústica són de l'ordre de 0'4 dB, llavors la cota màxima de l'error absolut, associat amb les variacions de la temperatura, pot fer-se correspondre amb aquesta desviació:

$$\Delta T = 0'4 \text{ dB}$$

El reduït valor de l'ordre de magnitud d'aquest resultat indica que els canvis associats als nivells de pressió acústica degut a les variacions de la temperatura no són gaire significatius. Sens dubte, aquestes fluctuacions dels nivells de pressió provocades pels canvis en la temperatura són negligibles i insignificants en comparació a d'altres factors, molt més rellevants, que s'analitzen detalladament en els capítols posteriors.

1.3.-FENÒMENS DE PROPAGACIÓ

1.3.1.- Superposició i interferència d'ones harmòniques

El terme $(kx - \omega t + \mathbf{d})$ és la fase del moviment on \mathbf{d} s'anomena constant de fase. Si es mantenen fixes la posició i el temps, quan la fase augmenta el seu valor en 2π , l'amplitud de l'ona no varia doncs,

$$y(x, t) = y_0 \sin(kx - \omega t) = y_0 \sin(kx - \omega t + 2\mathbf{p})$$

Quan hi ha dues ones harmòniques amb la mateixa longitud d'ona i freqüència que ocupen el mateix lloc de l'espai i el temps, en funció de la fase es poden produir els següents fenòmens:

Interferència constructiva

Es produeix quan les dues ones estan en fase, llavors $\mathbf{d} = 0$ o $\mathbf{d} = 2\mathbf{p}n$ (on $n \in \mathbb{Z}$). Si y_1 i y_2 representen les amplituds de les ones:

$$y_1(x, t) = y_0 \sin(kx - \omega t) \quad i \quad y_2(x, t) = y_0 \sin(kx - \omega t + n2\mathbf{p})$$

l'ona resultant s'obté a partir de la seva suma

$$y(x, t) = y_1 + y_2 = y_0 \sin(kx - \omega t) + y_0 \sin(kx - \omega t + n2\mathbf{p})$$

i emprant una identitat trigonomètrica i fent les corresponents identificacions

$$\sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right) \Rightarrow \begin{cases} \frac{A+B}{2} = kx - \omega t + n\mathbf{p} \\ \frac{A-B}{2} = -n\mathbf{p} \end{cases}$$

i emprant el fet que el cosinus és una funció parella doncs, $\cos(-n\mathbf{p}) = \cos(n\mathbf{p})$, resulta que

$$\boxed{y(x, t) = 2y_0 \cos(n\mathbf{p}) \sin(kx - \omega t + n\mathbf{p}) \quad (n=0,1,2,3\dots)} \quad (1.28)$$

En aquest cas, s'aprecia que l'amplitud, i conseqüentment la intensitat, de l'ona resultant és doble que la de les ones que interfereixen.

Interferència destructiva

Si dues ones que interfereixen tenen una diferència de fase, $\delta = \mathbf{p}$ o $\delta = n\mathbf{p}$ (on $n \in \mathbb{Z}$), s'anul·len mútuament i hi ha una interferència perfectament destructiva. Aquest fet s'aprecia fent un raonament similar al d'abans, doncs la suma de les ones és ara:

$$y(x,t) = y_1 + y_2 = y_0 \sin(kx - \omega t) + y_0 \sin(kx - \omega t + n\pi)$$

que a partir de

$$\sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right) \Rightarrow \begin{cases} \frac{A+B}{2} = kx - \omega t + \frac{n\pi}{2} \\ \frac{A-B}{2} = -\frac{n\pi}{2} \end{cases}$$

i emprant el fet que el *cosinus* és una funció parella pot posar-se com

$$y(x,t) = 2y_0 \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{n\pi}{2}\right) \quad (n=,1,3,5\dots) \quad (1.29)$$

Aquí l'amplitud de l'ona és $2y_0 \cos(n\pi/2)$ que és igual a zero per valors de n senars i les ones es contraresten mútuament. La causa més comú per la que apareixen diferències de fase entre les ones és que recorren camins de diferent longitud. En la il·lustració següent s'han representat dues ones que en el punt A es divideixen en dues parts iguals i segueixen dos camins diferents de longitud x_1 i x_2 respectivament.

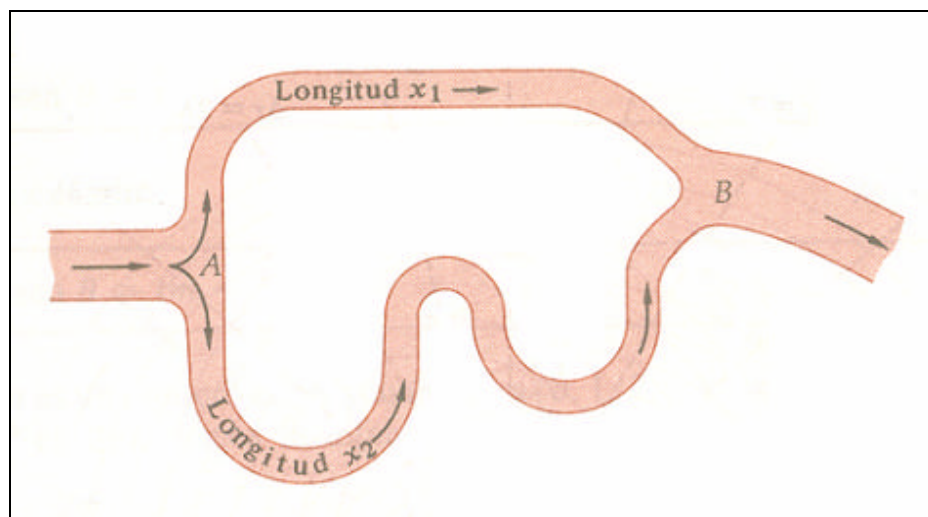


Figura 1.20.- Diferència de camins.

Llavors, si la diferència entre les dues trajectòries és exactament un múltiple de la longitud d'ona, la diferència de fases entre les ones serà un nombre sencer multiplicat per 2π , i interferiran constructivament. Pel contrari, però, si la diferència entre els camins és exactament mitja longitud d'ona o qualsevol nombre senars de semilongituds d'ona, la diferència de fases serà un múltiple de π i la diferència de fases serà destructiva. Per qualsevol altre diferència de la longitud de les trajectòries, Δx , la diferència de fases serà:

$$d = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda}$$

Dues fonts sonores que estan en fase o tenen una diferència de fase constant, s'anomenen **fonts coherents**. Hi ha molts casos, però, on la diferència de fase varia de 0 a 2π . Si les dues tenen,

per exemple, la mateixa intensitat aquesta magnitud en qualsevol instant de temps és proporcional al quadrat de l'amplitud i si la diferència de fase varia ràpidament no existeix cap diagrama d'interferències que es pugui apreciar, doncs

$$4A^2 \cos^2\left(\frac{d(t)}{2}\right)_m \approx 2A_0^2$$

aquest tipus s'anomenen *fonts incoherents*.

1.3.2.- Reflexió i transmissió

Quan una ona es propaga a través d'un medi i es troba amb una superfície de separació d'un medi diferent, s'origina en el punt on incideix l'ona i separa els dos medis, una ona reflectida en el primer i una ona transmesa en el segon. Hom pot experimentar fenòmens de reflexió de les ones sonores en un espai tancat on es toca música.

Normalment escoltarem un so directe que prové directament dels instruments i un so reflectit que és aquesta mateixa ona sonora després de rebotar amb la paret. Cal dir, però, que el so que es reflexa 1/10 de segon després del so original no es detecta per l'oïda, de manera que els dos sons es confonen produint el fenomen de la *reverberació*. Així mateix, sempre que hi ha una ona reflectida es crea també una ona transmesa. Tothom pot percebre aquestes ones quan, per exemple, s'escolta el soroll del trànsit dins els habitatges, doncs el material de la paret ha absorbit part de l'energia de l'ona atenuant-ne la intensitat.

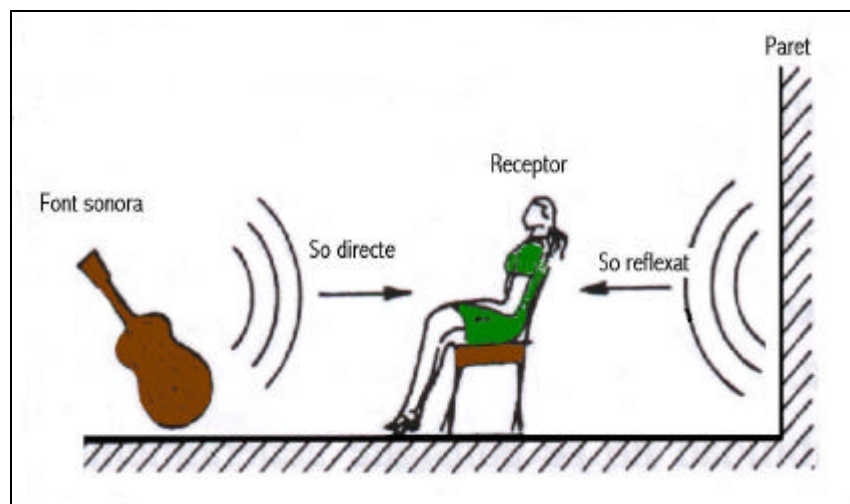


Figura 1.21.- Ona reflectida i ona transmesa.

1.3.3.- Refracció

La direcció de propagació de les ones transmeses no és la mateixa que la de les ones incidents, doncs es desvien de la normal al pla límit en funció de les velocitats de propagació en els diferents medis. Aquest fenomen es coneix com *refracció del so* i té importants efectes sobre les ones sonores que es propaguen per l'atmosfera. En aquest sentit cal esmentar la dissipació d'energia que experimenta una ona quan es propaga per l'atmosfera degut a la refracció amb el terra. Si no hi haguessin pèrdues un soroll amb una potència de 450.000 w, tenint en compte

que el mínim de la intensitat sonora audible és de 10^{-16} w/cm^2 , i que considerem que el front d'ona es propaga sobre mitja superfície esfèrica, s'escoltaria a una distància de:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{450.000 \text{ w}}{(4\pi r^2)/2} \Rightarrow r \approx 2'6 \cdot 10^5 \text{ Km}$$

Aquesta estimació de l'audibilitat del so és infinitament superior al que existeix en realitat sobre la Terra, doncs un soroll d'aquesta potència deixa de ser audible quan l'oient es separa una distància de pocs quilòmetres (3 o 4 quilòmetres en condicions favorables).

1.3.4.- Difracció

La propagació de les ones quan passen pel mig d'una obertura estreta és molt diferent a la que experimentaria un feix de partícules. En la figura s'aprecia la diferència de trajectòries entre les ones (a) i les partícules (b) quan passen a través d'una obertura estreta.

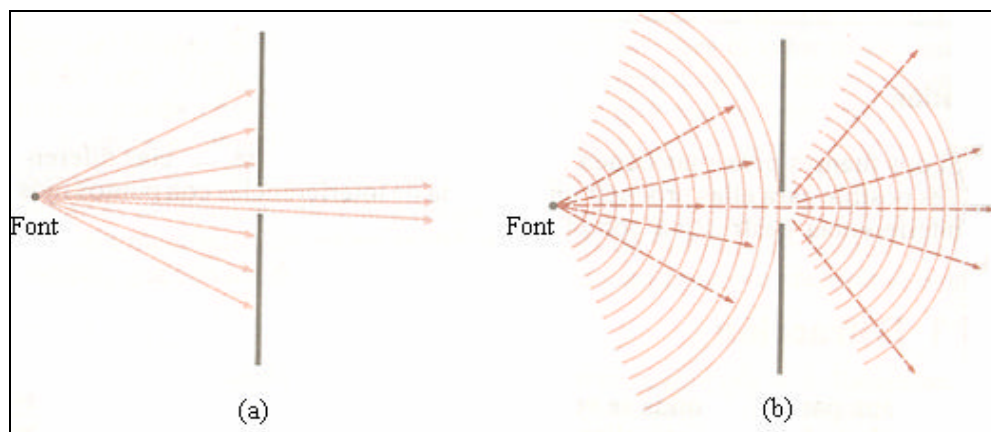


Figura 1.22.- Comparació de la transmissió d'ones i partícules.

Els raigs dibuixats en la part (a) senyalen la direcció d'únicament les partícules que incideixen directament sobre l'obertura i així aconseguen passar la barrera. Les que impacten sobre l'obstacle sòlid de la barrera, pel contrari, són reflectides. Aquest fenomen és molt diferent si en lloc de petits objectes sòlids es projecten ones (b), doncs els raigs que incideixen sobre les vores de l'esclatxa sembla que es dobleguin i es desvien de la seva direcció inicial. Aquest fenomen, anomenat *difracció*, sempre es produeix quan es limita part d'un front d'ona. El càlcul del diagrama d'ones de difracció és complicat, però es pot aconseguir una bona aproximació emprant un mètode geomètric descobert per Christian Huygens al voltant de 1678. El mètode de Huygens considera cada punt d'un front d'ona com un focus puntual d'ones. Passat un cert temps el nou front d'ones és la superfície corresponent a l'envolupant de totes les petites ones esfèriques elementals emeses per aquestes fonts puntuals.

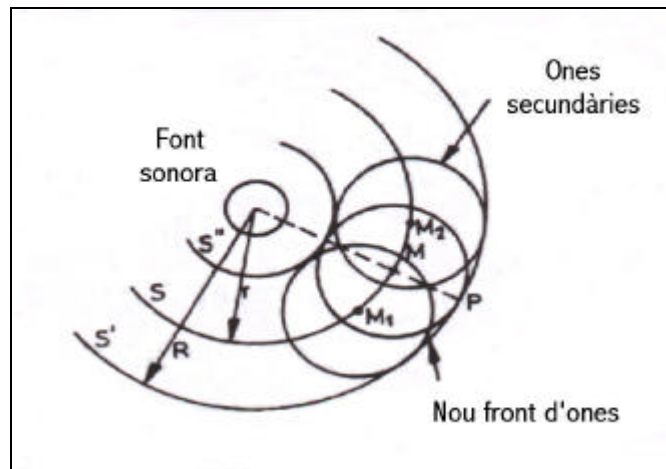


Figura 1.23.- Fronts d'ona secundaris

S'observa com una ona esfèrica que surt d'una font puntual emet un impuls de molt curta durada. Quan ha passat un instant de temps, t , els fronts d'ona secundaris s'allunyen de la superfície S (radi r) i formen una família d'esferes amb envolupants geomètriques les esferes S' i S'' que tenen per radis $R_1 = r + ct$ i $R_2 = r - ct$. Els punts M_1 i M_2 de S són fonts en fase que emeten ones secundàries esfèriques que en l'instant immediatament posterior tenen el mateix radi, llavors són tangents a S' que és l'envolupant de totes aquestes ones secundàries. Cal tenir en compte, però, que si cada punt d'un front d'ona fos realment una font puntual hi hauria d'haver també ones en el sentit contrari de la seva propagació. Per salvar aquesta incoherència Kirchhoff en el segle XIX refinà aquest mètode considerant que la intensitat de les ones elementals secundàries depèn de l'angle, essent nul·la en el sentit contrari al de propagació. Aquesta teoria és coneguda amb el nom d' **aproximació dels raigs**:

“Si l'obstacle o obertura és gran en comparació a la longitud d'ona, no s'observa cap desviació en el front d'ones i l'ona es propaga en línia recta o raigs, de manera similar a com ho faria un feix de partícules”

En la vida real, les longituds d'ona dels sons audibles varien dins un interval que va des d'uns pocs centímetres a varis metres i sovint són grans respecte a la mida de les obertures i obstacles, per la qual cosa la difracció del so es una fet habitual que podem experimentar quan escoltem la fressa que es produeix en una altra habitació, sentim un soroll darrera la cantonada del carrer ...

Un resultat important que s'obté del càlcul del diafragma de difracció de les ones planes que incideixen sobre una obertura circular petita és que a gran distància de l'esclatxa, gairebé tota la intensitat de l'ona es confina en un con de semiangle θ i diàmetre D que està relacionat amb la longitud d'ona per

$$\boxed{\sin \theta \approx \frac{\lambda}{D}} \quad (1.30)$$

Així, si la longitud de les ones és petita, en comparació a D , es confinen en la direcció que tenen davant. Per aquesta raó les ones amb longituds d'ona curtes i altes freqüències que procedeixen d'un altaveu tendeixen a concentrar-se en la direcció que tenen davant, més que les ones de baixa freqüència, que s'expandeixen en totes direccions.

1.3.5.- Pulsacions

Quan es superposen ones en fase amb diferents freqüències la interferència serà constructiva i la intensitat resultant gran, però si en un instant posterior es desfasen degut a que les freqüències són diferents, la interferència serà destructiva. És el que ocorre, per exemple, quan escoltem el so produït per dues cordes de guitarra de freqüència gairebé idèntiques. El so té una intensitat alternativament alta i baixa amb una freqüència que s'anomena *freqüència de bateig*.

Es pot obtenir aquesta ona de pressió a partir de dues ones de freqüència angular ω_1 i ω_2 i igual amplitud, p_0 . Es pot menysprear la part espacial i considerar només la dependència amb el temps si es vol visualitzar l'ona en un sol punt de l'espai. Així, a partir de dues funcions harmòniques simples

$$p_1 = p_0 \sin \omega_1 t \quad i \quad p_2 = p_0 \sin \omega_2 t$$

Per simplificar els càlculs, s'ha suposat sense pèrdua de generalitat, que estan en fase en l'instant inicial, $t = 0$. Quan les ones es superposen, emprant una identitat trigonomètrica resulta que

$$P = p_1 + p_2 = p_0 \sin \omega_1 t + p_0 \sin \omega_2 t = 2 p_0 \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right)$$

Aquesta notació pot simplificar-se posant la freqüència angular ω en funció de la freqüència natural, f , doncs $\omega = 2\pi f$, i fent les següents identificacions per la freqüència mitjana i la diferència de freqüències:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad i \quad \Delta \omega = \omega_1 - \omega_2$$

s'escriu com

$$P = 2 p_0 \cos(p \Delta f) t \sin(2p \bar{f}) t \quad (1.31)$$

La següent figura il·lustra la variació de l'ona de pressió en funció del temps.

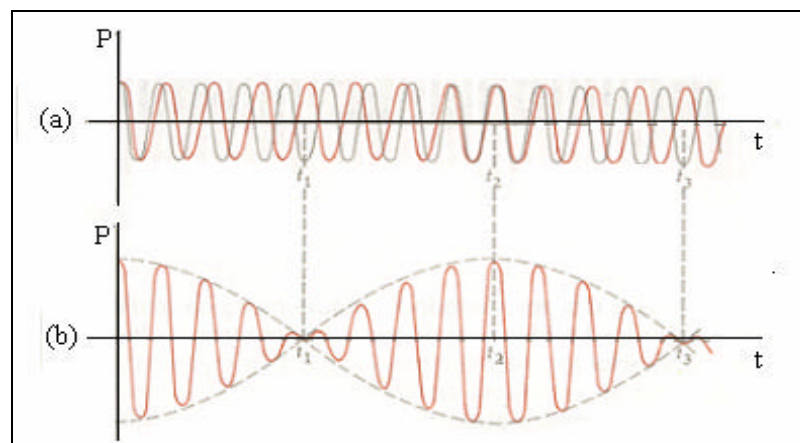


Figura 1.24.- Dues ones de diferent freqüència (a) i la seva resultant (b) .

En la part (a) es representen dues ones de diferent freqüència en fase per $t = 0$. En (b) es mostra la resultant de les dues ones. En un instant posterior, t_1 , les ones estan desfasades 180° com a conseqüència de la diferència de freqüències i la interferència és destructiva. En l'instant $t_2 = 2t_1$, però, les ones estan novament en fase i la interferència és constructiva i en t_3 torna a produir-se novament el desfasament. La freqüència d'aquesta oscil·lació resultant és gairebé la

mateixa que la de les ones originals i la seva amplitud està modulada. L'oïda percep l'energia de l'ona com el quadrat de l'amplitud

$$E \propto \|2 p_0 \cos(p\Delta f) t\|^2$$

Per aquest motiu el soroll és fort sempre que l'amplitud és màxima o mínima, o sigui sempre que $\cos(\pi\Delta f)t$ sigui igual a ± 1 . L'amplitud màxima es presenta amb la freqüència $\Delta f/2$, llavors la freqüència de les amplituds màxima i mínima és exactament el doble, Δf . Per aquest fet, si s'escolten dos diapasons de freqüències igual a 241 Hz i 243 Hz, l'oïda percep una freqüència igual a la mitjana, 242 Hz, i el soroll és doblement intens cada segon. Aquest fenomen de les pulsacions té moltes aplicacions. Els músics l'utilitzen quan afinen un instrument amb un diapasó i comparant una freqüència coneguda amb una altra de desconeguda.

1.3.6.- Reflexió i transmissió d'ones planes amb incidència normal

Per estudiar aquests fenòmens és convenient emprar la definició d'impedància acústica donada en l'expressió (1.25)

$$z = \frac{p}{v} = \frac{rckr}{\sqrt{1+k^2r^2}} e^{jb} \approx rc$$

On s'ha fet aquesta aproximació per distàncies i nombres d'ona suficientment grans (*longituds d'ona en el rang de l'audible*): $1+k^2r^2 \approx k^2r^2$. Així podem considerar, que per les ones sonores, aquesta magnitud es redueix al producte de la densitat del medi per la respectiva velocitat de l'ona.

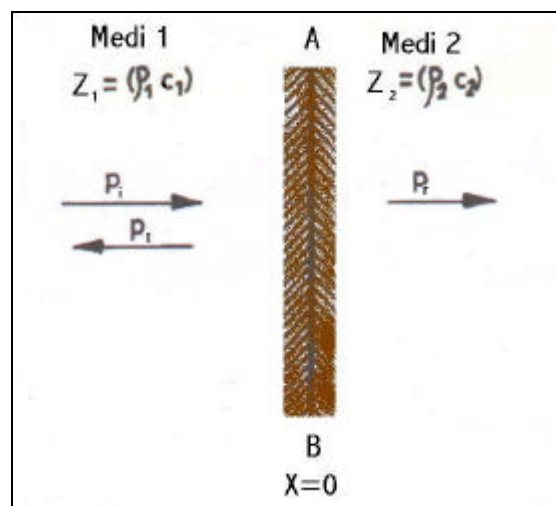


Fig.-1.25.- Reflexió i transmissió d'ones planes en una superfície límit.

Així una ona plana, en el medi 1, que incideix normalment i viatja en la direcció positiva de l'eix d'abscisses pot representar-se per:

$$p_i = p_{0i} e^{j(\omega t - k_1 x)}$$

Anàlogament l'ona transmesa en el medi 2 i reflectida en el 1 es descriuen com:

$$p_r = p_{0r} e^{j(\omega t - k_1 x)}$$

$$p_t = p_{0t} e^{j(\omega t - k_2 x)}$$

Els nombres d'ona, K , són diferents perquè les respectives velocitats de l'ona en aquests medis també són diferents:

$$k_i = \frac{2p}{l} = \frac{2p}{c_i T} = \frac{2p}{c_i / n} = \frac{2p}{c_i / (\omega / 2p)} = \frac{\omega}{c_i}$$

Les dues ones, però, han de complir les condicions frontera en els punts de la superfície de separació dels dos medis:

- 1.- Sobre la superfície del pla de separació la pressió als dos costats d'aquest límit ($x = 0$) és la mateixa. Això implica: $p_i + p_r = p_t$
- 2.- Les velocitats de les partícules amb direcció normal i diferent costat del pla límit tenen de ser iguals en les dues bandes, sinó els dos medis no romandrien contínuament en contacte. Com que hem pressuposat ones amb incidència normal resulta: $v_i + v_r = v_t$.

Tenint present aquestes dues condicions de continuïtat en el pla límit ($x = 0$) es pot escriure la següent relació entre les ones de pressió en termes de les respectives impedàncies acústiques:

$$v_i + v_r = v_t \Rightarrow \frac{p_i}{z_1} - \frac{p_r}{z_1} = \frac{p_t}{z_2} = \frac{p_i}{r_1 c_1} - \frac{p_r}{r_1 c_1} = \frac{p_t}{r_2 c_2} \quad \text{on} \quad \begin{cases} z_1 = r_1 c_1 \\ z_2 = r_2 c_2 \end{cases}$$

on s'ha tingut en compte que la velocitat de l'ona reflectida té signe contrari al de l'ona incident. Anàlogament, en virtut de la primera condició de frontera podem escriure una relació entre les amplituds de pressió.

$$p_i + p_r = p_t \Rightarrow p_{0i} e^{j\omega t} + p_{0r} e^{j\omega t} = p_{0t} e^{j\omega t} \Rightarrow p_{0i} + p_{0r} = p_{0t}$$

Emprant aquestes identitats és possible relacionar les amplituds de l'ona incident i la reflectida en funció de les dels dos medis.

$$\frac{p_{0i}}{z_1} - \frac{p_{0r}}{z_1} = \frac{p_{0t}}{z_2} \Rightarrow z_2 \cdot (p_{0i} - p_{0r}) = z_1 p_{0t} \Rightarrow z_2 \cdot (p_{0i} - p_{0r}) = z_1 \cdot (p_{0i} + p_{0r})$$

Finalment es pot escriure:

$$p_{0r} = p_{0t} \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$$

Segons aquesta fórmula, quan la impedància del segon medi és major que la del primer (*per exemple si ona sonora incideix des de l'atmosfera sobre l'aigua*) un excés de pressió positiva (condensació) es reflexa també com un augment en la condensació de l'ona reflectida. Així mateix, si la diferència d'impedàncies és negativa un excés de pressió positiva en l'ona incident es reflexa com un excés de pressió negativa.

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{\mathbf{r}_2 c_2}{\mathbf{r}_1 c_1} \rightarrow 0 \Rightarrow p_{0r} = p_{0i} \frac{\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}}{z_1} = p_{0i} \frac{0-1}{0+1} = -p_{0i}$$

Cal tenir en compte, però, que generalment la relació entre l'amplitud de la pressió de l'ona reflectida i l'ona incident és menor que la unitat, excepte en casos límit com quan la reflexió es produeix en un medi molt dens o poc compressible i no canvia la seva fase, en canvi si el medi on incideix és poc dens la compressió és molt fàcil i existeix una variació de fase de 180°. En aquest cas la relació entre impedàncies tendeix a zero. El coeficient de reflexió de la potència es defineix a partir de la proporció entre l'energia incident i la reflectida i pot posar-se en funció de les respectives impedàncies com:

$$\mathbf{a}_r = \frac{I_r}{I_i} = \left[\frac{p_{0r}}{p_{0i}} \right]^2 = \left[\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right]^2 \quad (1.32)$$

Una magnitud important en les ones planes és la intensitat, que es defineix com el valor mig del flux d'energia que travessa una superfície per unitat de temps. Per una ona plana aquesta magnitud està donada per $I = p_0^2 / 2\rho_0 c$ i la relació entre l'energia reflectida i l'incident pot posar-se en funció d'un coeficient de reflexió de la potència, α_r , en termes de la impedància (figura 1.32). Anàlogament pot fer-se un raonament similar per l'ona transmesa tenint en compte les condicions de continuïtat per la pressió en el pla límit.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{p_{0i} - p_{0r}}{z_1} = \frac{p_{0t}}{z_2} \\ p_{0i} + p_{0r} = p_{0t} \end{array} \right\} \Rightarrow z_1 p_{0t} = z_2 \cdot (p_{0i} - p_{0r}) = z_2 p_{0i} - z_2 \cdot (p_{0t} - p_{0i}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p_{0t} = p_{0i} \frac{2z_2}{z_2 + z_1}$$

mitjançant aquesta relació podem definir el coeficient de transmissió de la potència, α_t , en funció de les respectives impedàncies.

$$\mathbf{a}_t = \frac{I_t}{I_i} = \frac{\mathbf{r}_1 c_1}{\mathbf{r}_2 c_2} \cdot \left[\frac{p_{0t}}{p_{0i}} \right]^2 = \frac{4z_2 z_1}{(z_2 + z_1)^2} \quad (1.33)$$

Cal destacar, però, que el valor del coeficient de transmissió, α_t , no depèn de la direcció de l'ona, doncs té el mateix valor tant si passem de l'aire a l'aigua o a l'inrevés. És important descriure el fenomen de transmissió de l'ona en dos medis molt comuns en el nostre planeta: l'aigua i l'aire. S'observa, llavors, que quan l'ona passa d'un medi més dens a un altre menys dens l'amplitud de pressió de l'ona transmesa es duplica perquè el quocient d'impedàncies és gran.

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{\mathbf{r}_2 c_2}{\mathbf{r}_1 c_1} \rightarrow \infty \Rightarrow p_{0t} = p_{0i} \frac{\frac{2z_2}{z_2 + z_1}}{z_2} = p_{0i} \frac{2}{1+0} = 2p_{0i}$$

En canvi, si el fenomen ocorre en sentit contrari, i l'ona passa d'un medi de poca densitat a un altre de major densitat (*per exemple de l'aire a l'aigua*), la relació entre impedàncies tendeix a zero a l'igual que l'amplitud de pressió de l'ona transmesa.

$$\frac{z_2}{z_1} = \frac{r_2 c_2}{r_1 c_1} \rightarrow 0 \Rightarrow p_{0r} = p_{0i} \frac{\frac{2z_2}{z_1}}{\frac{z_2}{z_1} + z_1} = p_{0i} \frac{2 \cdot 0}{0+1} = p_{0i} \cdot 0 = 0$$

1.3.7.- Reflexió en la superfície d'un sòlid per incidència normal

Ara l'ona no passa d'un medi compressible a un altre de menor o major densitat, sinó que incideix sobre un sòlid no deformable que es caracteritza per una impedància acústica específica, Z_n , definida pel quocient entre la pressió acústica sobre la superfície del sòlid i la velocitat normal del fluid en aquest punt. Aquestes dues magnituds no sempre estan en fase, llavors la impedància pot ser una variable complexa: $Z_n = R_n + jX_n$. La part real R_n és la component resistiva, mentre que el valor complexa, X_n , és la reactiva, que es defineixen a partir de les condicions de continuïtat en el pla límit ($x = 0$) a partir dels valor de pressió i velocitat de l'ona incident i la reflectida.

$$Z_n = \frac{p_i + p_r}{v_i - v_r} = \frac{p_i + p_r}{\frac{p_i}{z_1} - \frac{p_r}{z_1}} = \frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} \cdot z_1 = \frac{p_{0i} + p_{0r}}{p_{0i} - p_{0r}} \cdot r_1 c_1$$

en el desenvolupament final d'aquesta fórmula s'ha simplificat la part complexa de l'ona $e^{j(\omega t - kx)}$. Ara aïllant l'amplitud de l'ona reflectida en funció dels altres termes podem posar:

$$p_{0r} = p_{0i} \cdot \left[\frac{Z_n - R_1}{Z_n + R_1} \right] = p_{0i} \cdot \left[\frac{(R_n - R_1) + jX_n}{(R_n + R_1) + jX_n} \right]$$

L'amplitud de l'ona reflectida és complexa, llavors pot estar desfasada en relació a l'ona incident. Altres magnituds d'interès són l'amplitud de l'ona i els coeficients de reflexió, α_r , i de transmissió, α_t . Amb raonaments similars als que s'apliquen quan l'ona travessa dos medis diferents s'obté per l'amplitud:

$$p_{0r} = p_{0i} \cdot \left[\frac{(R_n - R_1)^2 + X_n^2}{(R_n + R_1)^2 + X_n^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Així mateix els valors dels coeficients són:

$$\mathbf{a}_r = \left(\frac{p_{0r}}{p_{0i}} \right)^2 = \frac{(R_n - R_1)^2 + X_n^2}{(R_n + R_1)^2 + X_n^2}$$

$$\mathbf{a}_t = 1 - \mathbf{a}_r = \frac{4R_n R_1}{(R_n + R_1)^2 + X_n^2}$$

Cal esmentar, però, que en la majoria de casos l'ona que es transmet en el sòlid és absorbida per les molècules del material i queda atenuada.

1.3.8.- Ones estacionàries

Aquestes ones es formen en el pla límit dels medis fluids. Aplicant les condicions de continuïtat es veu que l'amplitud de l'ona reflexa és funció d'un desfasament respecte a l'ona incident.

L'amplitud d'aquestes ones ve donada per la Relació d'Ones Estacionàries (ROE) que relaciona l'amplitud de pressió en el ventre (*amplitud màxima*) i els nodes (*amplitud mínima*) mitjançant les amplituds de les ones incidents i reflectides.

$$ROE = \frac{|p_{oi}| + |p_{or}|}{|p_{oi}| - |p_{or}|} \quad (1.34)$$

1.3.9.- Reflexió i transmissió entre dos medis per incidència obliqua

Podem suposar que la direcció de propagació de les ones està confinada al pla XY (*no intervé la coordenada z*) i que el front d'ones forma un angle, θ , amb la direcció positiva de l'eix X.

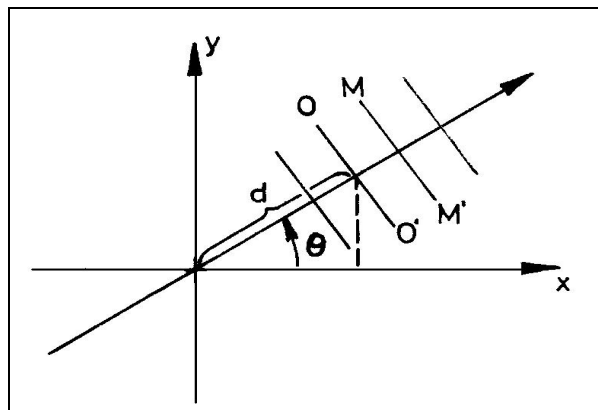


Figura 1.26.- Front d'ones pla per una direcció de propagació.

En aquest gràfic els fronts d'ona plans estan representats pels segments OO' i MM' on la pressió acústica és constant. L'expressió de l'ona en funció de la distància, d, a l'origen de coordenades projectada sobre els eixos és:

$$p = p_0 e^{j(\omega t - kd)} = p_0 e^{j(\omega t - [kx \cos \theta - ky \sin \theta])}$$

Els raigs de l'ona incident, reflexa i transmesa es poden representar en un gràfic en funció dels respectius angles respecte la normal.

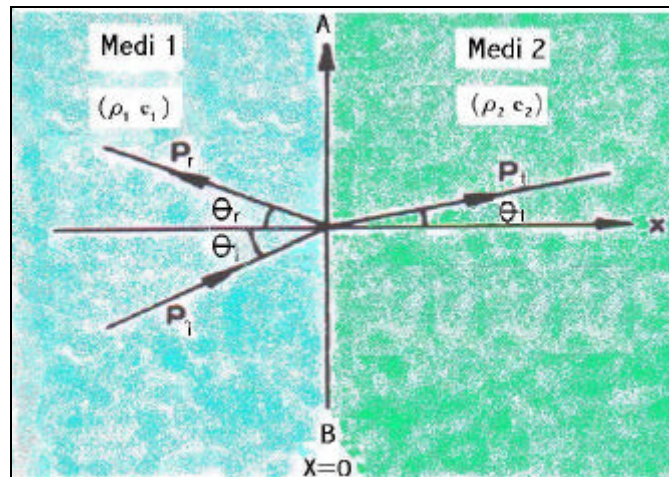


Figura 1.27.- Incidència obliqua d'una ona plana.

Les ones de pressió corresponents a cada zona són:

$$p_i = p_{0i} e^{j(\omega t - [k_1 x \cos \mathbf{q}_i - k_1 y \sin \mathbf{q}_i])}$$

$$p_r = p_{0r} e^{j(\omega t - [k_1 x \cos \mathbf{q}_r - k_1 y \sin \mathbf{q}_r])}$$

$$p_t = p_{0t} e^{j(\omega t - [k_2 x \cos \mathbf{q}_t - k_2 y \sin \mathbf{q}_t])}$$

Les respectives ones poden expressar-se en funció dels nombres d'ona, K , de cada medi i els corresponents angles. Llavors, a partir de les condicions de frontera i la definició dels coeficients de reflexió i transmissió podem expressar aquestes magnituds en funció de les impedàncies.

$$\mathbf{a}_r = \frac{I_r}{I_i} = \left[\frac{p_{0r}}{p_{0i}} \right]^2 = \left[\frac{z_2 \cos \mathbf{q}_i - z_1 \cos \mathbf{q}_t}{z_2 \cos \mathbf{q}_i + z_1 \cos \mathbf{q}_t} \right]^2 \quad (1.35)$$

$$\mathbf{a}_t = \frac{I_t}{I_i} = \frac{\mathbf{r}_1 c_1}{\mathbf{r}_2 c_2} \cdot \left[\frac{p_{0t}}{p_{0i}} \right]^2 = \frac{4 z_2 z_1 \cos^2 \mathbf{q}_i}{(z_2 \cos \mathbf{q}_i + z_1 \cos \mathbf{q}_t)^2} \quad (1.36)$$

Hi ha angles d'especial interès que poden deduir-se a partir de les relacions anteriors. Observant el coeficient de reflexió es veu que si el numerador és nul, o sigui si $z_2 \cos \theta_i = z_1 \cos \theta_t$, el seu valor és zero i es transmet tota la potència. L'angle s'anomena *angle d'intromissió*, θ_{int} , i el seu valor està donat per:

$$\cot^2 \mathbf{q}_{\text{int}} = \frac{(c_1 / c_2)^2 - 1}{(\mathbf{r}_1 / \mathbf{r}_2)^2 - (c_1 / c_2)^2}$$

S'observa també que si $c_1 > c_2$ l'angle d'incidència, θ_i , s'apropa a 90° . En aquestes condicions $\cos \theta_i$ tendeix a zero i el coeficient de transmissió es redueix a:

$$a_r \approx \left[\frac{R_1 \cos q_t}{R_1 \cos q_i} \right]^2 = 1$$

per la qual cosa hi ha una reflexió total de l'energia incident. Quan una ona incideix sobre la superfície que separa dos medis amb diferents índexs de refracció, la direcció dels raigs ve donada per la llei de Snell que relaciona les velocitats de les ones amb els angles d'incidència i refracció en els diferents medis. La natura de cadascun dels medis, no cal dir-ho, depèn de la particular composició molecular dels àtoms que el formen.

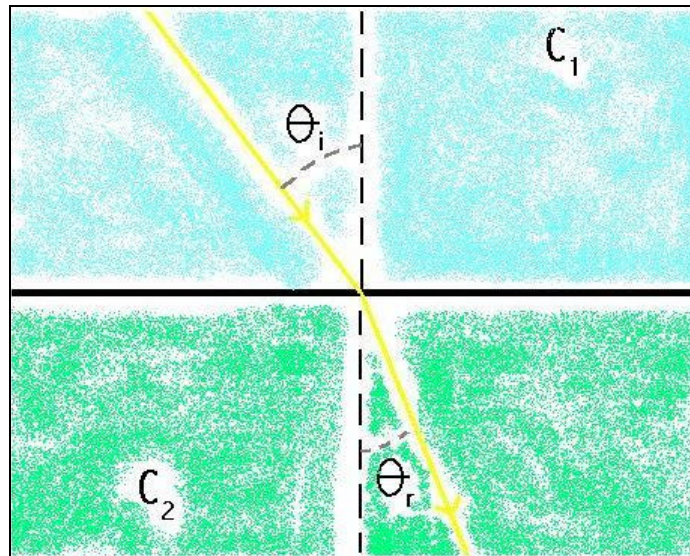


Figura 1.28.- Il·lustració de la llei de Snell.

L'expressió matemàtica d'aquesta fórmula és: $c_1 \sin q_i = c_2 \sin q_r$

La refracció màxima ve donada per un angle de 90° , que correspon a un *angle d'incidència crític*:

$$q_i = \sin^{-1} \frac{c_1}{c_2} \quad (1.37)$$

1.3.10.- Refracció deguda a fenòmens atmosfèrics

Les diferents temperatures que hi ha a les capes atmosfèriques provoquen variacions en la velocitat de propagació de les ones sonores i poden considerar-se com fenòmens de refracció. La velocitat del so és major en l'aire calent que en l'aire fred, per la qual cosa si ens allunyem de la superfície terrestre la velocitat del so, al igual que la temperatura, disminueixen i les ones sonores experimenten una refracció d'una manera similar al so que viatja en contra del vent.

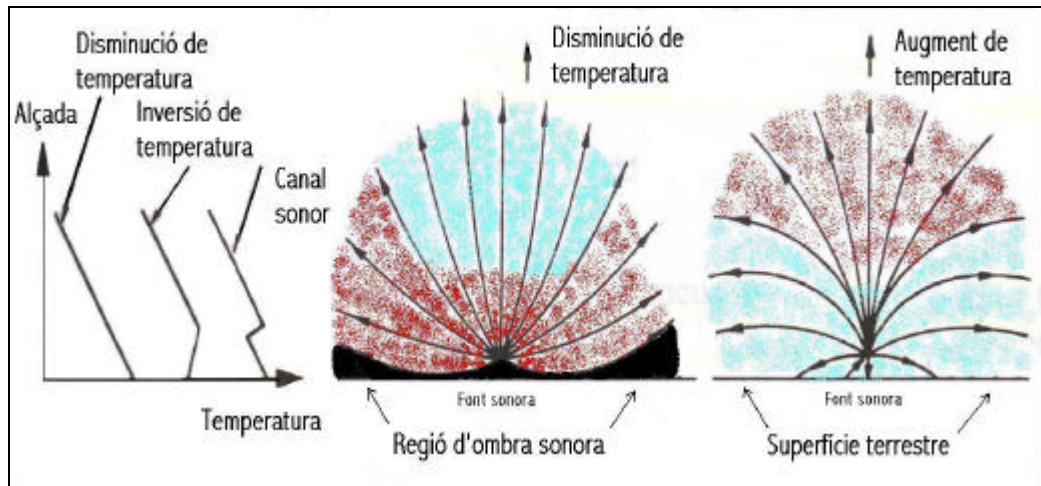


Figura 1.29.- Gradients de temperatura.

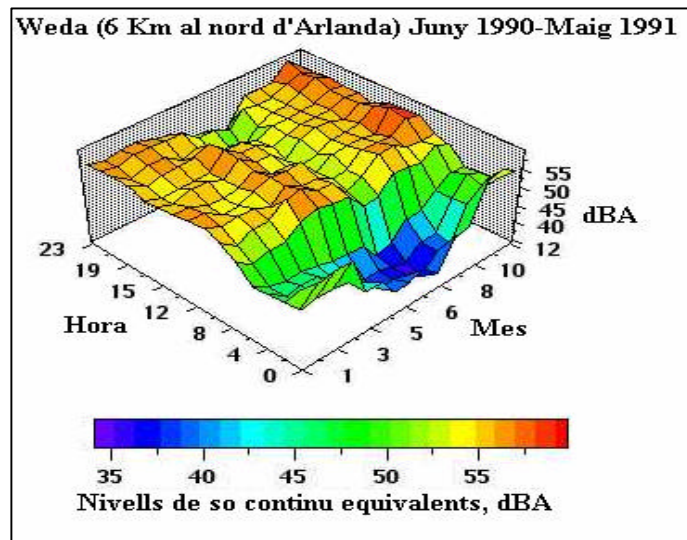
Aquest fenomen és l'explicació de la bona audibilitat que hi ha durant la nit, molt millor que la resta del dia. Això passa perquè per la nit, després d'un dia calent, el terra i les capes d'aire que hi estan en contacte es refreden ràpidament, tot escalfant-se a mesura que s'augmenta l'altura, i incrementant-se consegüentment la velocitat del so. Pel dia les capes que no estan en contacte amb el terra, més elevades, estan a baixa temperatura, la qual cosa no afavoreix la propagació del so. En general s'observa que si el gradient de temperatures és positiu quan ens enlairem tindrem una bona audibilitat, mentre que si aquest gradient és negatiu les condicions serien oposades.

Un altre factor que té un paper important en la propagació del so és el vent. Només en el cas que no existeixi un gradient en la velocitat del vent quan augmenta l'altura, el moviment de les masses d'aire no tenen pràcticament cap efecte sobre l'audició del so. Tenint en compte, però, que el més usual és que hi hagi una variació de la velocitat del vent en funció de l'alçada sobre la superfície terrestre, les ones sonores experimenten un canvi de direcció dificultant la percepció del so.

1.3.11.- Absorció atmosfèrica

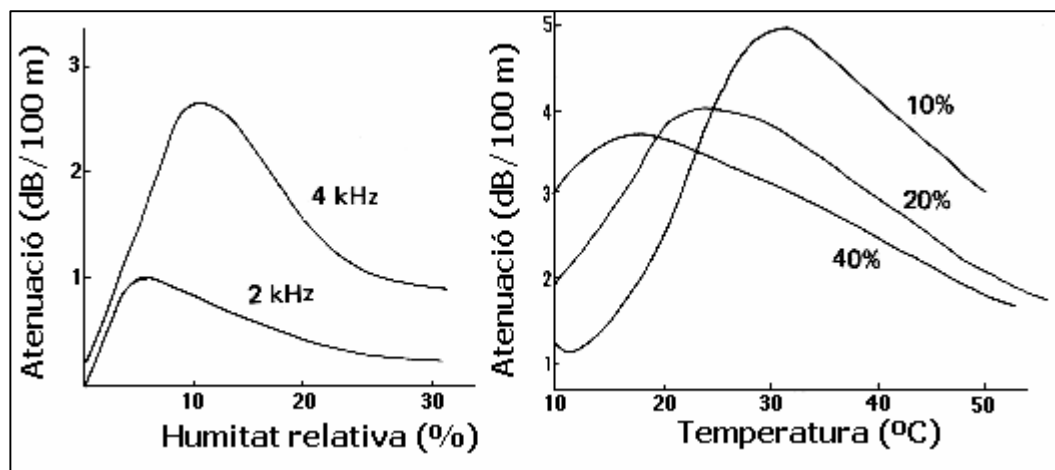
L'absorció atmosfèrica depèn fonamentalment de la humitat relativa, la temperatura i la freqüència de l'ona sonora. Una petita part de l'ona sonora es perd en l'aire degut a varis processos físics. Un dels més importants és el degut a la conducció de la vibració pel medi en forma de calor provocat per la conversió del moviment molecular coherent de l'ona en moviment molecular incoherent que es dispersa per l'aire. La viscositat del medi també té influència en la transmissió del so. La combinació d'aquests dos factors provoca l'atenuació clàssica del so. L'absorció es pot calcular numèricament, ja que augmenta linealment amb la distància i esdevé especialment important en llargs recorreguts.

Cal destacar que l'atenuació disminueix per valors baixos de l'humitat relativa i la temperatura. Normalment l'humitat relativa presenta un màxim just després de la sortida del sol, mentre que el mínim té lloc per la tarda quan la temperatura és més alta. Aquestes variacions diürnes són més acusades durant l'estiu. En el gràfic inferior s'aprecia com el nivell de so, per una ona de la mateixa intensitat, varia en funció de l'època de l'any que ens trobem. Les dades corresponen a un punt situat 6 km al nord de l'aeroport internacional de Stockholm-Arlanda en la regió sud de Suècia. En la gràfica de l'apèndix AE s'aprecien els diferents graus d'absorció de les ones sonores en funció de la freqüència i la humitat relativa.



Gràfic 1.1.- Variació del nivell acústic en funció de l'època de l'any i la franja horària.

S'observa que la màxima atenuació correspon als mesos d'estiu durant les hores de la matinada (*blau*) i la mínima s'enregistra durant els mesos d'hivern al voltant de la mitja nit (*vermell*). La humitat relativa pot influir significativament. Per exemple, una freqüència de 10 KHz i un 20% d'humitat relativa experimenta un esmoreïment de 0'27 dB/m. Pel que fa la freqüència s'ha observat que l'absorció atmosfèrica és màxima a les altes freqüències. En els diagrames del gràfic (1.2)_s'aprecia que per valors mitjans de la freqüència pròpia del llenguatge parlat (2 KHz), el nivell d'absorció és d'uns 0.25 dB/100 m amb un 30% d'humitat relativa i una temperatura de 20 °C. Aquesta xifra, però pot incrementar-se fins els 5 dB/100 m per freqüències dels 8 KHz quan la temperatura és de 20 °C i la humitat del 10%.



Gràfic 1.2.- Atenuació de la pressió sonora per diferents freqüències.

1.4.- ACÚSTICA ARQUITECTÒNICA

1.4.1.-Generalitats

Dins les cases i edificis (magatzems, oficines ...), l'ésser humà passa la major part de la seva vida, llavors cal que estiguin tan ben condicionats com sigui possible en tots els aspectes. Sens dubte, el soroll és un dels principals factors que són causa de molèstia i angoixa, per la qual

cosa cal prendre mesures preventives per disminuir o fins i tot eliminar els seus efectes. No cal dir, que és millor aplicar les solucions “a priori”, incloses en el projecte de l'edifici o emmarcades dins el pla urbanístic, que no “a posteriori”, fent reformes en els edificis o afegint obstacles arquitectònics o apantallaments no previstos en el disseny original.

Els sorolls es poden classificar en dos grans grups: els originats en l'aire (aeris) i en els sòlids (estructurals). En aquest treball, s'estudiarà l'impacte que el brogit aeri, provocat pels ferrocarrils, fa sobre els edificis circumdants, doncs per distàncies superiors als 25 metres els seus efectes són molt més importants que altres factors: pertorbacions estructurals, vibracions....

Hi ha tres mètodes generals de control de les pertorbacions acústiques: **reducció en la font**, en el **camí de propagació** i en el **receptor**. Així, en l'estudi que ens ocupa es podria fer el següent pel que fa a cadascuna d'aquestes tres línies d'actuació:

- **Font:** consistiria en disminuir la fressa deguda a la fricció de les rodes del tren amb els rails i el coeficient aerodinàmic dels ferrocarrils (consultar el nombre de Reynolds). Es tracta, sens dubte, d'una solució tècnicament difícil i costosa. Alguns països com el Japó, però, són pioners en la construcció de trens amb levitació magnètica sense rodes i consegüentment força silenciosos.
- **Camí de propagació:** es tracta de col·locar obstacles arquitectònics: parets, apantallaments, arbres... entre la font i el receptor per disminuir la intensitat de l'ona sonora que arriba fins aquest últim. Aquesta és la solució que es proposa en aquest treball, doncs és una proposta perfectament viable tècnicament i menys costosa que altres alternatives.
- **Receptor:** en aquest cas s'hauria d'actuar sobre els mateixos edificis, col·locant apantallaments sobre les parets i construccions situades al voltant de la línia fèrria. No hi ha dubte que és una solució molt més difícil i costosa que l'anterior, doncs és força més senzill incidir sobre l'ona de soroll en un lloc proper a la font (*costat del viaducte*), evitant així la seva dispersió.

Quan el soroll es propaga a través de l'aire i arriba a la paret dels edificis, part de l'energia de l'ona incident es reflexa, mentre que la resta es transmet a través de l'estructura penetrant en l'interior de l'habitable. Aquesta ona sonora es propaga per l'interior i depèn en gran mesura de l'absorció acústica del medi.

1.4.2.-Absorció acústica

L'absorció pot estar provocada fonamentalment per dues causes diferents:

- L'absorció en l'aire o el medi a través del qual es propaga. En aquest cas la densitat d'energia disminueix degut a processos viscosos de degradació i relaxació molecular, doncs l'ona incideix sobre els àtoms i molècules que hi ha en el seu recorregut, transferint part de la seva energia. Si el medi és homogeni, la velocitat és constant, per la qual cosa l'absorció serà funció del temps o de la distància recorreguda. S'expressa mitjançant un coeficient **m**, amb dimensions de m^{-1} . En l'acústica d'edificis, però, aquest factor és pràcticament menyspreable.

- L'altre concepte, molt més rellevant pel que fa a l'acústica d'estructures arquitectòniques, fa referència al **coeficient d'absorció**, α , que representa la relació entre l'energia sonora absorbida per un material i l'energia sonora incident sobre aquest material per unitat de superfície. Els coeficients d'absorció sonora comercials es determinen pel mètode de la "cambra reverberant", que consisteix en un mètode d'integració en el qual les ones sonores impacten sobre la mostra objecte d'estudi simultàniament i des de diferents direccions, la qual cosa permet determinar aquest coeficient a partir de l'efecte mitjà provocat per la mostra en el camp sonor de la cambra. Així es calcula el coeficient d'incidència aleatòria o de **Sabine**, α_s , que per materials molt absorbents pot tenir un valor superior a la unitat en un 20% o 30%, com a conseqüència de les tècniques de mesura emprades en el seu càlcul. Quan únicament s'estudia la incidència normal de les ones, que xoquen perpendicularment sobre la superfície, s'obté l'anomenat coeficient de **Kundt**, α_{90} , el valor numèric del qual és sempre inferior al de Sabine. En l'apèndix B es detalla una llista amb els valors dels coeficients d'absorció (Sabine) per diferents materials i freqüències.

S'observa que els coeficients d'absorció dels materials emprats en la construcció (formigó, maons, rajoles ...) són petits. Aquest fet, que es comentarà àmpliament en el proper capítol, es deu a la gran impedància acústica que tenen la qual cosa provoca que gairebé total l'energia de l'ona incident es reflecteixi. Quan es coneixen els coeficients d'absorció, α_i , de cadascuna de

les superfícies, s_i , que tanquen una habitació o recinte, pot calcular-se el coeficient d'absorció total, A , mitjançant la formula:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i s_i \quad \text{on} \quad S = \sum_{i=1}^n s_i$$

essent S la superfície total de les parets que tanquen l'espai. Quan cal treballar amb objectes amb àrees que no es poden descompondre fàcilment en superfícies planes (persones, butaques ...) es fa servir el concepte **d'àrea d'absorció sonora equivalent**, que és l'àrea d'un element absorbent amb un coeficient d'absorció igual a la unitat i que produeix la mateixa absorció total.

El nivell sonor d'un espai tancat està determinat pel coeficient d'absorció total, A , suposades iguals les altres característiques físiques i geomètriques. Per avaluar **el nivell sonor estacionari total**, L_P , en un recinte cal tenir en compte les dues contribucions principals: el nivell de potència de la font acústica o so directe, L_W , (pot ser interior o transmesa a través de les parets) i el so procedent de les successives reflexions amb les parets, L_R , anomenat so reverberant. Així el nivell sonor total ve donat per la següent expressió:

$$L_P = L_W + L_R \quad \text{on} \quad L_R = 10 \log \left[\frac{Q}{4p r^2} + \frac{4}{A + 4mV} \right] = 10 \log A_{TOTAL}$$

$$\text{es defineix } A_{TOTAL} \equiv \left[\frac{Q}{4p r^2} + \frac{4}{A + 4mV} \right]$$

El terme L_R , es calcula a partir de:

- Q és el factor direccional de la font. El seu valor màxim és igual a 1 per fonts omnidireccionals (radien en totes direccions). El terme $4\pi r^2$, és la formula de l'àrea d'una superfície esfèrica de radi r . La primera fracció, doncs, és una funció del so directe que es transmet des de la font per unitat d'àrea.

- En el denominador del segon terme del parèntesis hi intervenen l'absorció acústica total, A , el volum, V , i l'atenuació de l'aire m , de petit valor per recintes de reduïdes dimensions (no així per grans auditoris o sales d'espectacles). Llavors per l'escala de dimensions dels edificis propers al viaducte de Girona el terme $4mV$ és petit comparat amb A .

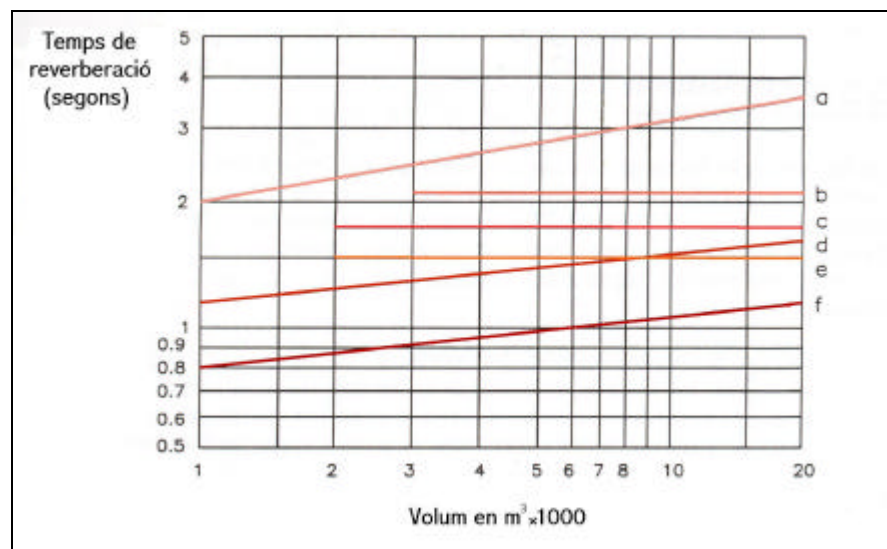
A la pràctica cal tenir en compte que la reducció del nivell sonor total emprant materials amb un alt coeficient d'absorció és difícil, doncs la duplicació de l'absorció total, només produeix una reducció de 3 dB en el nivell de pressió acústica. Si $A_f = 2A_i$, a partir de l'equació que dona el nivell sonor total s'obté:

$$\Delta L_p = L_{pf} - L_{pi} = L_w + 10 \log 2A_i - (L_w + 10 \log A_i) = 10 \log 2 \approx 3 \text{ dB}$$

És important tenir present que l'absorció acústica d'una habitació o sala depèn gairebé únicament del **temps de reverberació**. Magnitud important que condiciona la intel·ligibilitat de la paraula en sales de conferències o cines i la qualitat de la música que s'escolta en auditoris o sales de concerts. Es defineix com el temps necessari per a que la intensitat d'un soroll, inicialment estacionari en un recinte, es redueixi a una milionèsima part del valor inicial a partir del moment que finalitza la seva emissió. En la majoria de casos pràctics aquest temps és el necessari per a que la intensitat acústica es redueixi 60 dB. Per espais tancats on l'absorció de les diferents parets varia poc entre les diferents superfícies que el configuren i a l'hora no és excessivament elevada, la formula de **Sabine** permet calcular amb força exactitud el temps de reverberació.

$$T = 0'163 \frac{V}{\sum_{i=1}^n a_i s_i + 4mV}$$

el significat dels paràmetres que intervenen en les fórmules és el mateix que el donat en les equacions anteriors. En el gràfic següent es donen diferents temps òptims de reverberació per diferents tipus de música i la paraula en funció de les dimensions de la sala (en m^3).



- | | |
|--------------------|---------------------|
| a) Música sacra | b) Música romàntica |
| c) Música clàssica | d) Òpera italiana |
| e) Música barroca | f) Paraula |

Gràfic 1.3.- Temps òptim de reverberació.

S'aprecia, per exemple, en la línia (c) que el temps de reverberació idoni per una sala de concerts de música clàssica és de gairebé 2 segons. Els materials absorbents poden classificar-se en quatre grans grups: porosos, ressonadors, mixtes i anecoics. Els únics, però, que es caracteritzen per ser un veritable material són els porosos. D'altres, com les cambres anecoiques, utilitzen les propietats geomètriques de les superfícies que les componen per no reflectir les ones sonores. Dins una cambra d'aquest tipus només s'escolta el so directe i al no haver-hi ones reflectides en les parets no existeix un temps de reverberació.

Els materials **porosos** estan constituïts per un medi sòlid (esquelet), recorregut per cavitats més o menys tortuoses (porós) que es comuniquen entre si i amb l'exterior. L'absorció de l'energia acústica es produeix per la fricció i degradació de les ones sonores que es veuen obligades a adaptar-se a la recargolada geometria de les porositats que configuren aquests materials.

Les directrius de confort acústic en l'interior dels edificis es recullen en la norma NBE-CA-88 del Ministeri de Fomento, la qual recull els nivells d'exigència que els materials i els components dels edificis han de satisfer. És una mica menys restrictiva que les normes dels

països més desenvolupats d'Europa, però en termes generals és força similar a la normativa francesa vigent i està en consonància amb les normes ISO. (Consultar l'apèndix V on es recullen les directives pioneres sobre temes d'acústica en diferents àmbits que s'han incorporat a la legislació espanyola)

1.4.3.-Materials i coeficients d'absorció

Per estudiar la reverberació d'un local i, en general, el comportament d'un material quan hi incideix una ona sonora, cal conèixer el coeficient d'absorció sonores que, per les diferents freqüències, té aquest material. Sabine, pioner en aquest tipus d'estudis, va centrar les seves experiències en els 512 Hz, per aquest motiu es prenen múltiples i submúltiples d'aquesta freqüència bàsica, els valors de les quals són:

512÷4 =	128 Hz	Baixes freqüències
512÷2 =	256 Hz	
512÷1 =	512 Hz	Freqüències mitjanes
512×2 =	1024 Hz	
512×4 =	2048 Hz	Altes freqüències
512×8 =	4096 Hz	

Taula 1.2.- Múltiples i submúltiples de la freqüència bàsica.

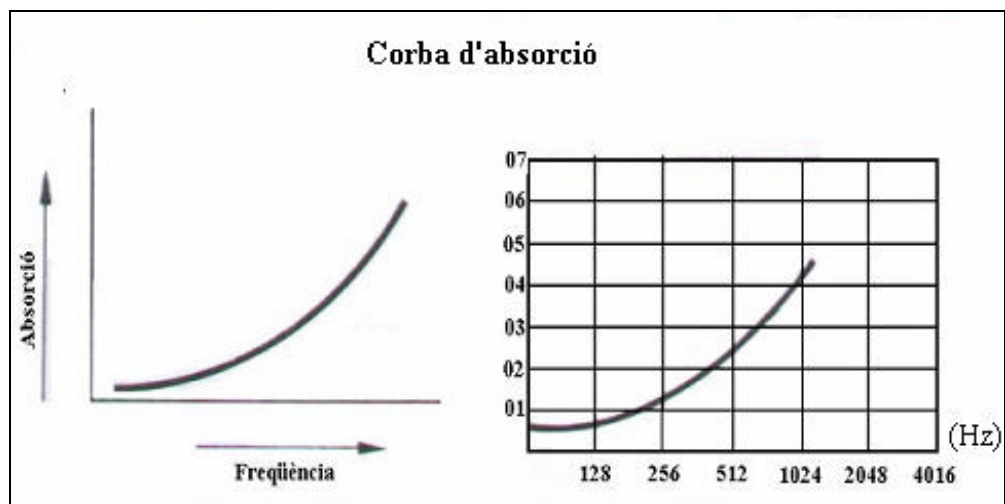
Així, els fabricants i laboratoris determinen els corresponents coeficients d'absorció per aquestes sis freqüències bàsiques, tot i que sovint s'acostumen a arrodonir als 125, 250, 500, 1000, 2000 i 4000 Hz. El **coeficient mig d'absorció** es defineix com la seva mitjana aritmètica. Dins un local és molt important conèixer els diferents temps de reverberació per les diferents freqüències. La seva representació gràfica en funció del to constitueix l'anomenada **corba tonal**.

Un factor que té una importància fonamental és l'anomenat coeficient d'absorció sonora, que es pot aconseguir, bé per la qualitat del material, bé per la seva disposició i geometria. En el

primer cas, cal distingir entre materials *porosos* i *elàstics*, en aquest segon cas distingim entre els *ressonadors* i les *irregularitats* o formació exterior. Els materials mixtes s'obtenen a partir de combinacions d'aquests dos tipus.

Materials porosos

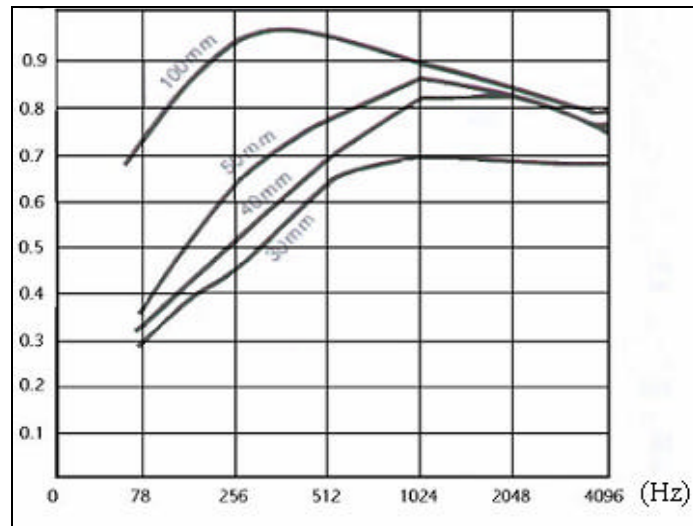
Es distingeixen perquè la seva capa superficial té un aspecte porós, amb petites cavitats. Quan hi incideix l'ona sonora, l'ona de pressió que provoca el moviment de les molècules de l'aire s'anul·la per l'efecte de la fricció en les parets d'aquests petits forats i per l'efecte de viscositat de l'aire que s'hi troba en l'interior. Per a que aquest efecte sigui real, cal que la longitud de l'ona incident sigui molt petita, d'un ordre de magnitud similar al diàmetre dels porus, doncs és precisament en aquests casos quan la perturbació hi penetra produint-se la dissipació. Per aquesta raó, l'absorció d'aquests materials augmenta a mesura que creix la freqüència.



Gràfic 1.4.- Valor del coeficient d'absorció amb la freqüència.

Hi ha materials porosos, però, que no només absorbeixen energia per dissipació, sinó que també experimenten una reflexió difusa en la superfície porosa on es genera una ona reflectida amb una longitud similar al diàmetre de la cavitat on incideix. Aquest fenomen de reflexió difusa és deu única i exclusivament a la geometria de la superfície del material, doncs la dissipació de l'energia només té lloc on la zona fins on penetra l'ona sonora.

Per aquest motiu, el gruix del material no és un factor massa important alhora d'aconseguir un bon coeficient d'absorció. En la gràfica que hi ha a continuació apareixen els diferents graus d'absorció, segons la freqüència, per una fibra de vidre, i quatre gruixos diferents: 30, 40, 50 i 100 mm.



Gràfic 1.5.- Absorció de la fibra de vidre per diferents gruixos (mm).

A partir dels 2048 Hz, s'observa que les gràfiques pràcticament coincideixen, exceptuant en aquest punt el material amb un gruix de 30 mm que no arriba fins el coeficient d'aproximadament 0'84 dels altres. Això significa que, per aquesta fibra de vidre, a partir dels 40 mm de gruix, no augmenta l'absorció per porositat, doncs la penetració de la pertorbació molecular és superior als 30 mm, però no passa dels 40 mm.

Cal esmentar que un agent que redueix considerablement el poder d'absorció d'aquests materials és la humitat. L'aigua omple les microcavitats impedit que exerxeixin la seva funció dissipadora de l'energia sonora. Els absorbents porosos més comuns són:

- El **suro**. És caracteritzat per ser homogeni, flexible, molt porós i lleuger (200 Kg/m^3). El seu poder absorbent es coneix des de l'antiguitat i s'utilitza per recobrir tan terres com parets. Les plaques de suro poden col·locar-se directament sobre els paraments, llistons de fusta o poden estar suspeses del sostre. Generalment aquest material és força resistent a la humitat i als paràsits, i resulta imputrefacte. El major desavantatge que té és el seu alt grau de combustibilitat.
- **Fibres minerals**. S'aconsegueixen amb altes temperatures a partir de la fusió de materials de tipus petri i escòries de llana mineral, llana de roca i fibra de vidre. Amb aquest procés s'aconsegueix una estructura fibrosa en la superfície que li proporciona una gran capacitat absorbent. Presenta molts avantatges respecte al suro, doncs és incombustible, no l'afecta la humitat ni cap tipus d'insecte o paràsit, i és més lleuger (70 kg/m^3). El seu coeficient d'absorció depèn de l'espessor i en alguns casos s'aconsegueixen valor propers a la unitat. L'existència d'un espai o cambra d'aire darrera el material ajuda a incrementar aquest coeficient, doncs no es produeixen reflexions en la part posterior.
- **Llana de fusta**. S'obté mitjançant un procés que no la sotmet a pressions excessivament elevades. És un material molt manejable amb uns coeficients d'absorció molt elevats. Alguns materials d'aquest tipus són el Termotex o el Cushiontone.
- **Porós**. S'obté triturant finament pedres esponjoses o fibroses com la pedra tosca i l'amiant o per hidratació de materials micacis. S'aconsegueixen així àrids que barrejats amb ciment o guix presenta una textura porosa. Pot obtenir-se un grau d'esponjositat molt elevat, i en

conseqüència un alt coeficient d'absorció, si s'afegeixen les quantitats convenients de fibres minerals.

- **Escumes sintètiques.** Es caracteritzen per tenir molts microalvèols, tancats i sense massa comunicació entre ells, per la qual cosa no tenen una estructura capil·lar que els permeti transmetre la humitat. Són molt lleugers, amb una densitat de només uns 20 kg/m³, i químicament neutres, la qual cosa els fa molt resistents als agents químic, a la floridura o bacteries, alhora que són imputrefactes i inatacables pels insectes i rosegadors.
- **Teixits i pintures.** Darrerament s'han desenvolupat materials tèxtils i certs tipus de pintures amb propietats absorbents per la seva confecció porosa i una superfície rugosa i flexible.

Materials elàstics

Tenen la propietat d'absorbir l'energia sonora degut a que l'esmoreïment de les ones sonores és proporcional a l'energia utilitzada en la deformació del material. La incidència d'ones de pressió acústica sobre una gran planxa de fusta, per exemple, produeixen una curvatura apreciable sobre el pla de la superfície. L'absorció d'aquest tipus de panells és molt gran quan la freqüència de l'ona incident coincideix amb la pròpia del material, apareixent en aquest cas el fenomen de la ressonància i en aquest cas l'energia sonora es converteix en oscil·lacions de grau màxim. Teòricament la gràfica del coeficient d'absorció té la següent forma:

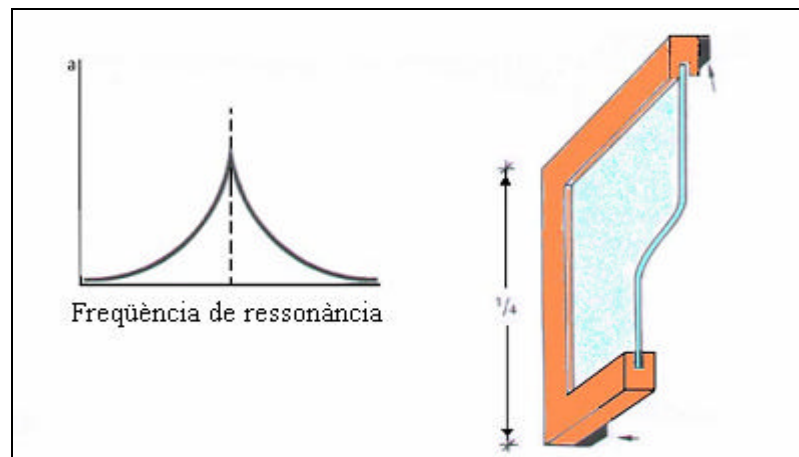


Figura 1.30.- Freqüència de ressonància per a un pànel elàstic i un mètode de fixació.

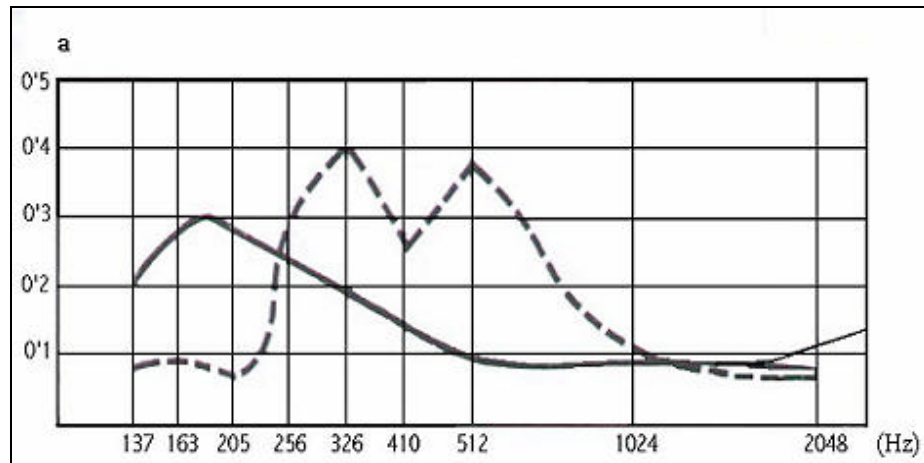
S'observa que és convenient ajustar aquests panells en topes elàstics i que el costat no excedeixi la quarta part de la longitud d'ona que correspon a la pròpia freqüència de ressonància. El càlcul d'aquesta freqüència pot fer-se mitjançant la fórmula de Meyer:

$$F(\text{Hz}) = \frac{600}{\sqrt{P(\text{kg}/\text{m}^2) \cdot e(\text{cm})}}$$

essent P el pes del pànel i e la distància que es col·loca de la paret. Els avantatges que presenten aquest tipus d'absorbents són:

- Gran absorció per les baixes freqüències degut a que davant un mateix estímul les molècules de l'aire seran susceptibles de vibrar amb molta més rapidesa que un pànel, malgrat que sigui molt flexible.

- Són poc selectius. Absorbeixen bastant bé un rang força ampli de freqüències.
- Ofereixen, dins un cert límit, la possibilitat d'ajustar l'absorció màxima a un valor predeterminat.
- Per les freqüències que el pannel no ofereix absorció, la vibració té uns efectes difusors molt desitjables. La cambra d'aire contribueix a proporcionar elasticitat, la qual cosa suposa un augment d'efectivitat i una reducció de material. Aquest fet, s'aprecia en les gràfiques on s'observa que si hi ha una cambra d'aire, malgrat que el gruix del material és menor, el coeficient d'absorció és major en un rang força ampli de freqüències.



Gràfic 1.6.- Absorció de pannels de contraplacat de fusta i fibra de vidre.

Ressonadors

Helmholtz fou el primer que estudià aquests dispositius. Consisteixen en una cavitat que comunica amb l'exterior per un conducte estret i, en el seu extrem, és on incideixen les ones sonores. El conjunt s'assembla a una botella amb dues parts ben diferenciades:

- El coll o conducte que comunica amb la cavitat i es comporta igual que un tub acústic de longitud L .
- La cavitat o recipient de volum V .

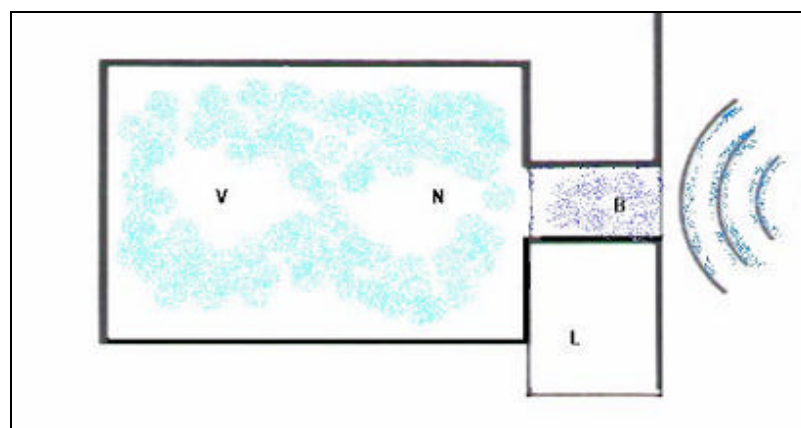


Figura 1.31.-.Esquema d'un ressonador.

L'ona sonora penetra per B i avança pel conducte fins arribar a N, produint-se un soroll en la cavitat i la consegüent reverberació, la qual cosa provoca que una energia pulsativa es propagui a través del punt N cap a B amb una freqüència pròpia característica. Quan aquesta ona secundària rep una nova ona exterior que incideix en B, s'anul·len mútuament, fent que el ressonador faci el paper d'absorbent. L'absorció serà màxima quan la freqüència de l'ona incident coincideixi amb la pròpia del ressonador, produint-se una ressonància d'oposició o anul·lació. En els ressonadors de Helmholtz el càlcul de la freqüència pròpia pot fer-se a partir de la fórmula:

$$F = \frac{v}{2p} \sqrt{\frac{S}{L \cdot V}} \text{ (Hz)}$$

Les variables que intervenen en aquesta expressió són: la velocitat del so, v , la secció del conducte, S , la longitud del conducte, L , i el volum de la cavitat, V . (Aquestes mesures han d'expressar-se en centímetres). Aquesta fórmula pot relacionar-se amb la conductivitat, C , del tub que és una mesura de la facilitat amb la que el so travessa el coll del ressonador.

$$C = \frac{S}{L} \Rightarrow F = 5.400 \sqrt{\frac{C}{V}}$$

el que caracteritza doncs, a un ressonador, és precisament el valor de la seva conductivitat, que depèn fonamentalment de la seva geometria. Llavors, segons la forma, pot fer-se aquesta subdivisió:

1.- Coll circular o quadrat de diàmetre o costat D .

a) Si la longitud del conducte, L , és menyspreable: $C = \frac{S}{0.8D}$

b) Quan la longitud, L , del conducte és apreciable: $C = \frac{S}{L + 0.8D}$

2.- Coll rectangular de secció $a \cdot l$.

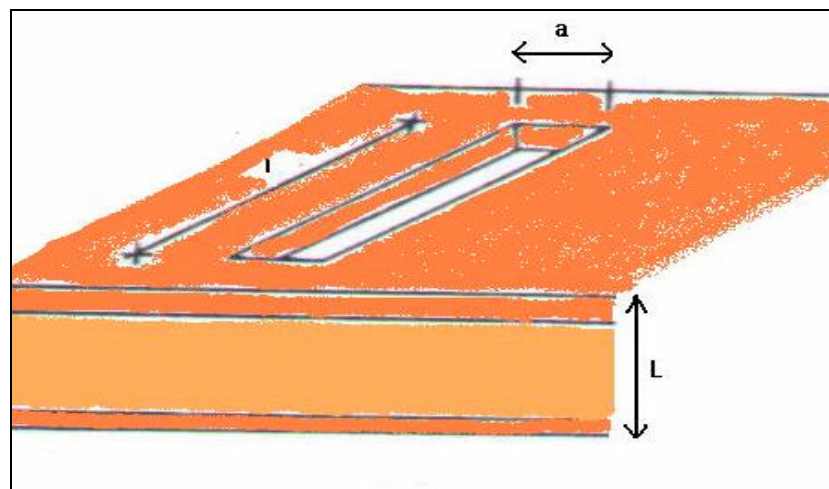


Figura 1.32.- Ressonador amb coll rectangular d'amplitud a .

La conductivitat pot determinar-se a partir de la fórmula de Rayleigh: $C = \frac{S}{L + lk}$

on el factor k depèn de la proporció de les mesures, a i l. El valor d'aquest paràmetre en funció del quocient a/l, s'obté a partir dels anomenats gràfics de Brüel.

3.- Coll rectangular en forma d'esclatxa allargada. És semblant al cas anterior quan la longitud l és molt superior a l'amplada a. En aquest cas la conductivitat es calcula amb la fórmula de Pedersen.

$$C = \frac{1}{l} \cdot \left[\frac{L}{a} + 0,7 + 2 \log \frac{l}{p \cdot a} \right]$$

coneixent el valor de la conductivitat en cada cas, pot trobar-se la freqüència pròpia, F, del ressonador, per la que presenta una absorció màxima, el càlcul teòric de la qual és aproximadament:

$$A = \frac{l^2}{3,5p} \approx \frac{l^2}{11}$$

Probablement aquests dispositius siguin els correctors acústics més antics que s'hagin emprat mai, doncs ja s'utilitzaven inserits en els gruixuts murs de les esglésies de Suècia en el segle XI. Actualment, en moltes sales de concerts, com la de Colston Hall de Bristol per exemple, el control de la reverberació s'aconsegueix incorporant al sostre 750 ressonadors. Una placa perforada col·locada a certa distància d'una superfície rígida és en realitat un conjunt de ressonadors. L'orifici equival al coll del ressonador, mentre que la longitud del tub serà l'espessor de la mateixa placa foradada. Les dimensions de la cavitat d'un ressonador individual seran equivalents al volum d'espai existent entre la placa i la paret, dividit pel nombre de forats. Normalment aquests tipus de pannels acústics consisteixen en làmines rígides de guix perforades, amb una capa de fibra mineral en la part oposada a la que rep el so. L'efecte d'aquesta fibra és equivalent a un augment del volum d'aire dins la cavitat, incrementant així la capacitat d'absorció del dispositiu.

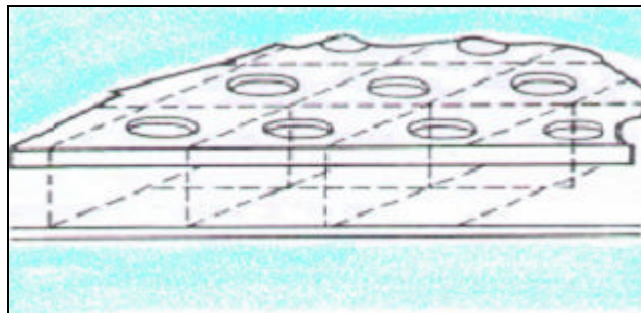


Figura 1.32.- Placa perforada equivalent a un conjunt de ressonadors.

Geometria dels ressonadors

Si una ona sonora incideix sobre una superfície irregular, malgrat que no sigui porosa ni elàstica, experimenta el fenomen de la reflexió difusa quan la seva longitud d'ona és d'un ordre de magnitud comparable amb les dimensions de la irregularitat, possibilitant que la pertorbació sonora penetri en les fissures. En cas contrari, les ones es reflecteixen igual que sobre una superfície regular i contínua, sense produir-se la reflexió difusa

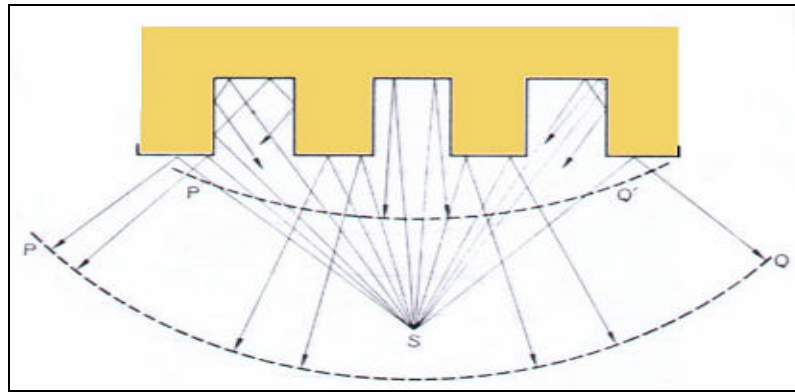


Figura 1.33.- Reflexió difusa del front d'ona.

A més cal considerar que l'acció de l'aire contingut dins les fissures. Al ser excitat per l'energia de l'ona externa emet una sèrie d'ones que s'oposen a les incidents, anul·lant-se mútuament.

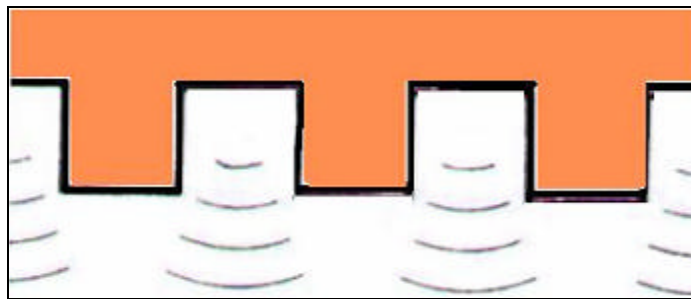


Figura 1.34.- Reflexió difusa quan la longitud d'ona del so és similar a l'amplitud del dentat.

L'aire que es torba en l'interior de les fissures al ser excitat emet una sèrie d'ones (figura 1.34); el fenomen és semblant a l'acció debilitada d'un ressonador, la qual cosa suposa un esmorteïment de l'ona sonora incident quan la seva freqüència coincideix amb aquesta emissió secundària. Un altre tipus d'absorció deguda a la geometria pot estar provocada per l'especial orientació dels plans del sostre. En la il·lustració s'aprecia com la seva inclinació reflexa les ones cap a l'exterior del recinte.

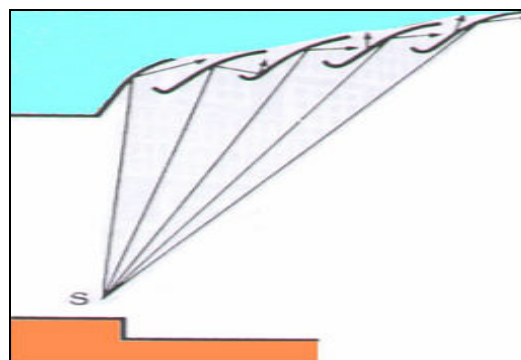


Figura 1.35.- Orientació obliqua dels plans del sostre.

Algunes aplicacions d'aquest principi poden apreciar-se en el sostre del teatre d'Hamburgo o al sòcol de l'auditori Henry i Edsel Ford a Detroit.

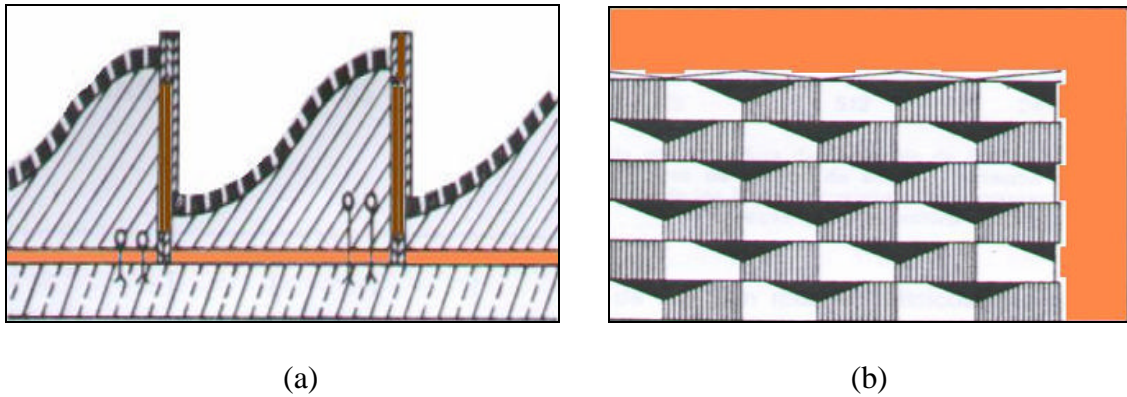


Figura 1.36.- Detall del sostre de l'òpera (a) i del sòcol de l'auditori (b).

El sostre de l'òpera té la propietat que reflexa gairebé tota la gamma de longituds d'ona. Les petites fissures reflecteixen les més petites, mentre que la curvatura de la superfície reflexa apropiadament les ones més llargues. D'altres disposicions geomètriques, com els maons ceràmics foradats o maons lleugers col·locats de costat poden construir-se superfícies molt apropiades per la reflexió difusa per les freqüències properes als 8000 Hz.

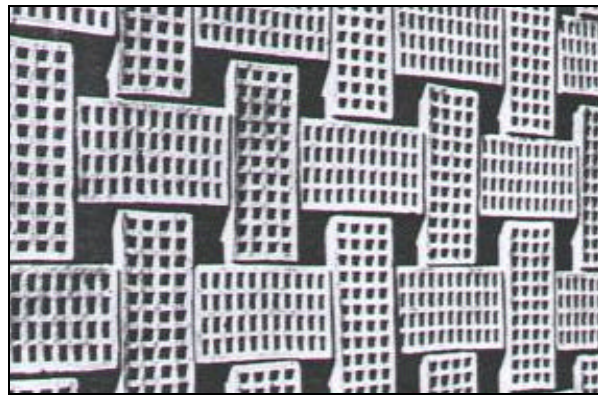


Figura 1.37.- Maons col·locats presentant la cara buida a l'exterior.

Càlcul dels coeficients d'absorció

En la majoria de laboratoris s'empra el següent procediment per esbrinar el coeficient d'absorció d'un local o un material. En primer lloc, cal conèixer el temps de reverberació, T_0 , del local nu i el corresponent coeficient d'absorció, a_0 , de les seves superfícies. Quan es col·loca el nou material absorbent, de superfície S , l'absorció del local augmentarà en $S(a-a_0)$ sabines, la qual cosa correspon a la disminució del temps de reverberació en $T-T_0$ segons. Abans i després de posar els panells absorbents la relació entre aquestes variables és:

$$T_0 = \frac{0'16V}{A_0} \quad \text{i amb els panells: } T = \frac{0'16V}{A}$$

essent V el volum de l'habitació en metres cúbics. Així, l'absorció, A , del local experimenta un augment donat per:

$$A - A_0 = S(a - a_0) = Sa - Sa_0 \Rightarrow a = \frac{A - A_0 + Sa_0}{S}$$

a partir d'aquesta expressió pot calcular-se el nou coeficient d'absorció, a , en funció dels temps de reverberació i el volum de la sala.

$$a = \frac{Sa_0 + \frac{0'16V}{T} - \frac{0'16V}{T_0}}{S} = a_0 + \frac{0'16V(T_0 - T)}{STT_0}$$

En la taula de l'apèndix C es recopilen els coeficients d'absorció de materials, revestiments i elements que poden intervenir en el condicionament de qualsevol local. Cal esmentar l'efecte de l'angle d'incidència de l'ona sobre la superfície. S'ha comprovat experimentalment que si el so incideix obliquament, l'esmoreïment del so és molt més ràpid que si la incidència és axial o tangencial. En la següent gràfica s'aprecia com per temps iguals, l'extinció de l'ona amb incidència obliqua és més ràpida. De fet, l'absorció és màxima quan l'angle d'incidència és aproximadament de 60° .

II SOROLL DEL TRÀNSIT VIARI

2.1.- INDICADORS I PARÀMETRES DE MESURAMENT

2.1.1.-Consideracions generals

Els resultats dels diferents estudis fets sobre el soroll generat pel trànsit reflecteixen que gairebé el 80% del soroll ambiental és provocat per aquest factor. Així esdevé, amb diferència, la font de molèstia més important del medi. En aquest capítol s'exposen els fonaments del mètode desenvolupat pel CETUR, que ha servit de referència per elaborar el model de predicció del soroll que es recull en el quart capítol. Els factors principals que hi intervenen són:

- **L'emissor.** Format per tots els vehicles a motor que circulen per la xarxa viària, els nivells de soroll dels qual depenen d'aspectes diversos com: la potència sonora del motor del vehicle, l'estat del tub d'escapament, la manera de conduir, la velocitat de circulació, el nombre de vehicles que circulen en una via determinada, el tipus de via i de ferm, etc.
- **El camí de propagació.** En aquest punt intervé, fonamentalment, la distància dels vehicles als edificis receptors. Altres aspectes que cal tenir en compte són: la presència d'elements reflectors o d'obstacles, el tipus de superfície que hi ha entre l'emissor i el receptor, etc.
- **El receptor.** Pel que fa als edificis, cal tenir en compte el grau d'aïllament acústic de finestres, balcons i parets, malgrat que, en última instància sempre són les persones, les que reben el soroll.

Existeixen dos mètodes per mesurar el trànsit com una font d'emissió de soroll. Es pot prendre, d'una banda, el conjunt de vehicles que circulen per una via determinada i, d'una altra, els vehicles de manera individual. Pel que fa al conjunt de vehicles (*font en línia*) se'n determina el nivell de soroll mitjançant mesuraments directes, fets amb el sonòmetre, o emprant mesures indirectes, obtingudes amb mètodes de predicció donats per les fórmules de regressió. Si, pel contrari, es vol analitzar la pertorbació acústica provocada per cada vehicle individualment, cal descriure acuradament el mètode de mesura, tot tenint-ne en compte les parts mecàniques i el dispositiu del tub d'escapament. L'objectiu d'aquest treball consisteix en estudiar el soroll generat pel trànsit urbà de Girona d'una manera global, per la qual cosa, s'ha emprat el primer d'aquests mètodes, tot adaptant cadascuna de les fórmules a la particular geometria del carrer o la zona.

2.1.2.- Indicadors de trànsit

El nivell de soroll de trànsit urbà i interurbà ve definit d'acord amb els indicadors següents:

- El nombre de vehicles lleugers que circulen per unitat de temps.
- El nombre de vehicles pesants per unitat de temps.
- La velocitat de circulació.
- El pendent de la via
- El tipus de ferm
- Les reflexions dels edificis a cada banda de la via.

Es consideren vehicles lleugers els turismes principalment, però també s'inclouen dins aquesta categoria les furgonetes, els minibusos, les motocicletes i els ciclomotors, i vehicles pesants, els camions, els autocars, els autobusos i els tractors.

L'indicador que expressa el trànsit d'una via és la *intensitat mitjana diària de vehicles* (IMD) que es calcula a partir del nombre total de vehicles que hi circulen i es pot obtenir mitjançant el seu comptatge o bé a partir de les dades enregistrades per l'administració responsable de la via. En fer aquests enregistraments per obtenir l'IMD cal tenir en compte d'evitar el comptatge en períodes de vacances escolars, el dia anterior i posterior als ponts, festius i en dies amb esdeveniments esportius o culturals importants. Es recomana de comptar els vehicles en dimarts, dimecres o dijous. Perquè les dades siguin utilitzables cal distingir entre els vehicles lleugers i els pesants. Aquest desglossament pot fer-se amb l'aparell de mesura, i en cas que el dispositiu no incorpori aquesta funció sempre es poden comptar separatament. El nombre de vehicles se sol expressar en forma de percentatge sobre l'IMD o sobre el nombre de vehicles per hora, durant el dia i durant la nit.

A partir de l'IMD es poden definir els indicadors sobre el nombre de vehicles lleugers o pesants per hora que circulen durant el dia (Nd), durant la nit (Nn) i en l'hora punta (Hp). Si no es disposa de dades en les grans vies urbanes en projecte, es prendrà una circulació mitjana Nd de 600 vehicles/h i per via de circulació. La velocitat apropiada per fer els càlculs és de 50 km/h i sinó la màxima autoritzada. En les vies urbanes, sempre que no es disposi de dades precises, podem prendre aquests valors de referència:

- Percentatge de vehicles pesants de dia = 10%
- Percentatge de vehicles pesants de nit = 5%

En vies perifèriques i autopistes el percentatge de vehicles pesants és molt superior i oscil·la entre el 15% i el 20% o més. Cal tenir en compte, però, que en situacions singulars és recomanable fer el recompte de vehicles entre 15 i 30 min distingint-los per categories. Alguns d'aquests casos especials es poden donar en:

Circulació nocturna per cinturons de grans ciutats.
Vies d'unió entre poblacions molt grans.
Accessos a aeroports, en hores punta molt definides.
Zones industrials amb itineraris d'elevat trànsit pesant.
Itineraris amb fort trànsit estacional o de cap de setmana, com poden ser zones del litoral o pistes d'esquí a l'hivern.
Vies d'accés a zones universitàries o zones amb grans camps d'esport.

Taula 2.1.- Casos especials on el recompte es desvia dels percentatges habituals.

2.1.3.-Paràmetres i condicions de mesura

El paràmetre bàsic és el nivell de soroll continu equivalent, $L_{Aeq,T}$ en dB(A), on T indica el temps de mesura. Per fer l'estudi de Girona s'han emprat normalment temps de mesura de 10 min, malgrat que en alguns punts s'hagin fet mesures de 24 hores, per aconseguir una descripció més acurada de la situació.

Condicions de mesura

S'ha de procurar fer sempre els mesuraments en el punt més representatiu de l'indret on es mesura. No es recomana, per exemple, fer les mesures del trànsit quan el ferm està mullat, doncs acostuma a haver-hi desviacions respecte als valors que s'obtenen en absència de l'aigua. També, s'ha d'evitar fer mesures si el trànsit és pertorbat per treballs que modifiquen l'estat d'utilització de la via o a prop d'obres on es produeix soroll que pugui influir en la representativitat de la mostra.

2.1.4.-Llocs de mesurament

Els mesuraments s'han de fer, en general, en llocs destinats a l'estada regular i prolongada de persones, en el carrer o a determinada distància d'autopistes o vies interurbanes. En el primer cas, es recomana col·locar el micròfon al mig de les finestres, obertes de bat a bat, i en l'eix de la façana. Aquesta regla s'ha d'aplicar també en el cas de balcons i terrasses. D'aquesta manera s'eviten reflexions de soroll importants de la façana sobre el micròfon.

També es pot mesurar extraient el micròfon a certa distància de la finestra oberta, aproximadament a uns 30 cm vers l'exterior. És important destacar que, sigui quina sigui la situació del micròfon, sempre s'ha de fer constar l'emplaçament. Es recomana fer els mesuraments en zones encara no construïdes però destinades a l'edificació a alçària i en el pla de l'emplaçament de les futures finestres.

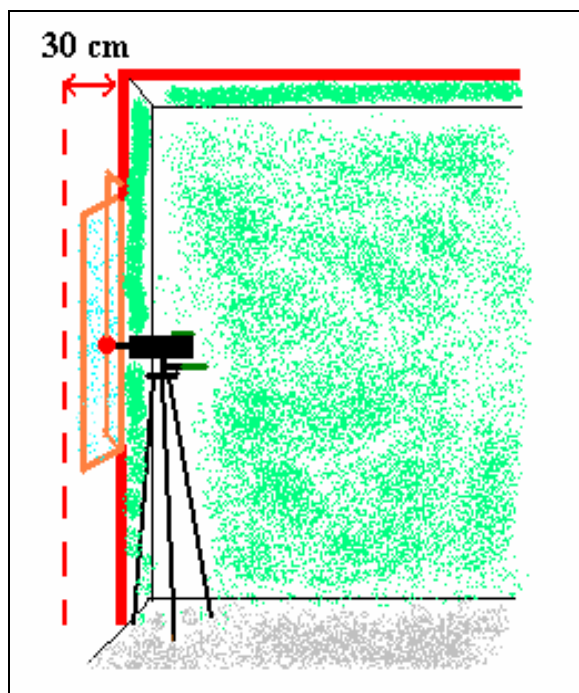


Figura 2.1.- Posició del sonòmetre respecte la finestra.

Durant els enregistraments fets al carrer es recomana situar el micròfon a l'entorn de 80 cm o més de la façana. És important evitar situar-lo arran de la vorada, ja que la proximitat entre el micròfon i els vehicles fa que els nivells de soroll que es mesuren siguin molt més elevats que els que afecten la façana.

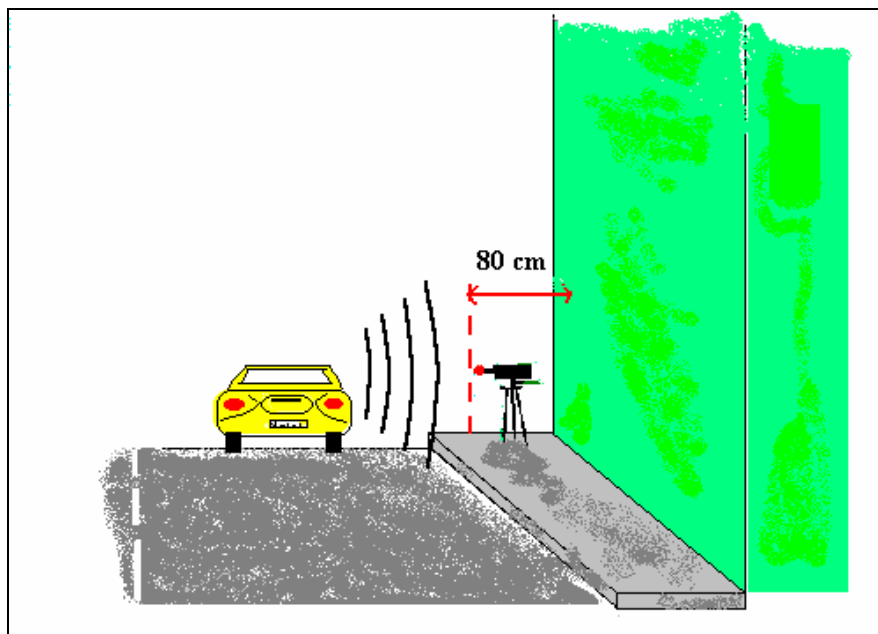


Figura 2.2.- Situació del sonòmetre en el carrer.

Quan s'ha de mesurar el soroll a les zones situades a l'entorn de vies interurbanes o d'autopistes, el sonòmetre s'ha de col·locar com a mínim a 20 o 30 m de distància de les vores, per tal de rebre l'energia sonora des d'un angle el més obert possible quan ho permetin les condicions de contorn. En aquest estudi, el treball de camp s'ha realitzat dins una zona urbana, per la qual cosa respectar aquesta norma no ha estat possible i el sonòmetre s'ha situat a 1 m de distància de la via de trànsit sobre la vorera procurant mantenir la distància, respecte a la paret posterior, que s'indica en la figura (2.2)

2.2.- ESTIMACIÓ I MESURA DEL SOROLL DEL TRÀNSIT

2.2.1.- Introducció

Els nivells de soroll de trànsit es poden obtenir mitjançant mesuraments de durada llarga (24 hores), curta (10 minuts), o aplicant mètodes de predicció, emprant mètodes de predicció (*models lineal, fórmules de regressió ...*). En aquest estudi s'han emprat els tres mètodes de mesura. L'elecció d'un mètode en concret bé donat per la particular situació del punt de mesura.

Pel que fa a les fórmules de predicció matemàtiques s'han emprat els models lineals en les zones interiors de la ciutat, mentre que en les àrees de la perifèria s'han aplicat tècniques de regressió per descriure el soroll del trànsit de les vies interurbanes i l'autopista. Els mesuraments de durada llarga són indicats per estudiar punts especialment conflictius amb un alt nivell de soroll diürn i nocturn, i en la resta de punts s'han enregistrat nivells equivalents de només 10 minuts.

2.2.2.- Mostreig de llarga durada

Es considera de durada llarga el mesurament que recull 24h o més de mostreig. Aquest mesurament permet conèixer l'evolució temporal dels nivells de soroll, és a dir, les variacions

que s'obtenen al llarg del temps. Diferenciar, per períodes horaris o inferiors, el dia de la nit, les hores punta de les hores amb calma, etc. També permet d'expressar l'evolució temporal de forma gràfica, reflectint, de manera molt entenedora, els diferents períodes horaris, com també determinar els valors de L_{Aeq} corresponents a la franja diürna, de les 7h a les 22h, i durant la nit, de les 22h a les 7h. Cal fer aquest tipus de mesures en vies amb un elevat volum de circulació on s'enregistren uns alts nivells sonors.



Figura 2.3.- Vies de circulació on caldria fer una mesura de 24 h.

2.2.3.-Mostreig de curta durada

Es considera de durada curta el mesurament que es fa en un temps inferior als 30 min. Aquests mesuraments permeten extrapolar els nivells de soroll mesurats durant un temps curt a períodes de temps molt superiors i obtenir resultats representatius de soroll global, diürn o nocturn, similars als que s'obtidrien amb mesuraments de durada llarga. Quan s'aplica aquest mètode cal tenir en compte la situació general del trànsit durant tot el dia i evitar, així, prendre la mesura en les hores punta o durant períodes on el flux de trànsit disminueixi notablement. Un avantatge evident és l'estalvi de temps que aquest mètode comporta

Per evitar el risc inherent a aquest tipus de mesurament es poden ponderar els resultats per ajustar-los més a la realitat. Un mètode suís proposa afegir uns termes correctors C_1 i C_2 que relacionen les dades de l'IMD amb els comptes fets durant el mesurament.

$$L_{Aeq, 1h} = L_{Aeq, 10m} + C_{1d,n} + C_{2d,n} \quad (1.1)$$

essent:

- $L_{Aeq, 1h}$ = nivell equivalent ponderat, en 1 hora.
- $L_{Aeq, 10m}$ = nivell equivalent mesurat durant 10 minuts
- El terme $C_{1d,n}$ és el factor corrector relatiu al flux de trànsit de dia o de nit:

$$C_{1d} = 10 \log \frac{Nd(\text{mitjà})}{Th(\text{mesurat})} \quad i \quad C_{1n} = 10 \log \frac{Nn(\text{mitjà})}{Th(\text{mesurat})}$$

on Nd és la mitjana diària de vehicles/h, Nn la mitjana nocturna de vehicles/h i Th els vehicles/h, durant el mesurament.

-El factor $C_{2d,n}$ pondera el volum de vehicles pesants, de dia o de nit, segons:

$$C_{2d} = 0'2 \cdot (P_{md} - P_{cd}) \quad i \quad C_{2n} = 0'2 \cdot (P_{mn} - P_{cn})$$

en aquesta expressió, els termes P_m i P_c representen el percentatge de vehicles pesants de dia o de nit durant el mesurament.

2.2.4.- Mesura del nivell de soroll en carrers

En aquest apartat es presenta la metodologia de la *Guide du Bruit des Transport Terrestres* editada pel Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie de França, sobre el càlcul del nivell de soroll dels carrers en forma d'U. Un carrer té aquesta forma si disposa d'edificis a cada banda de manera quasi contínua.

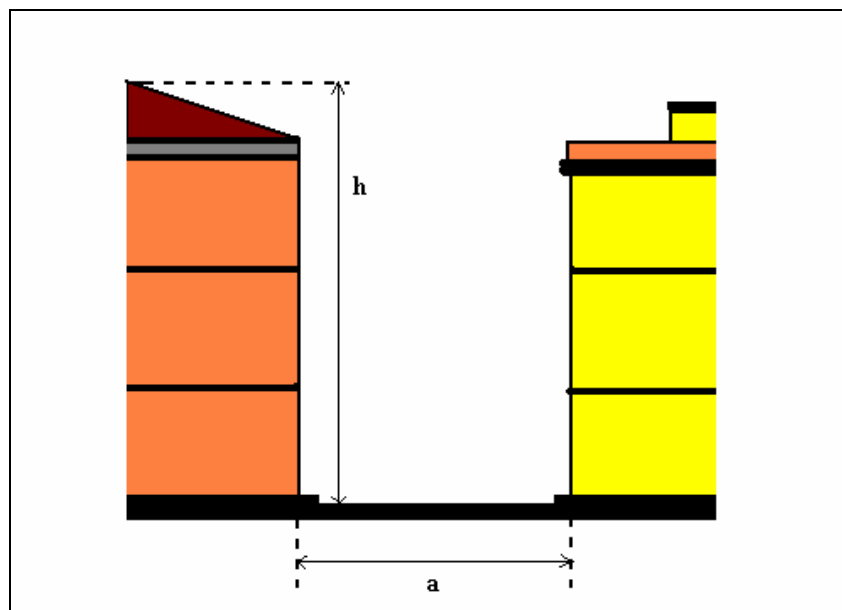


Figura 2.4.- Perfil típic d'un carrer en forma d'U.

L'expressió que dóna el nivell equivalent, L_{Aeq} , en aquest tipus de carrer és:

$$L_{Aeq} = 50 + 10 \log(N_{LL} + E \cdot N_p) - 10 \log a + K_h + K_v \quad (1.2)$$

essent:

- N_{LL} : Nombre de vehicles lleugers/h
- E: Factor d'equivalència acústica entre vehicles lleugers i pesats segons el pendent del carrer (veure taula)
- N_p : Nombre de vehicles pesants/h.
- a: Amplada del carrer en metres.

- h: Alçària mitjana dels edificis.
- K_h : Correcció per alçària: Si ha és inferior a 4 m, K_h val 0; si h és igual o superior a 4 m, K_h pren el valor següent:

$$-\frac{2(h-4)}{a}$$

- K_v : correcció per velocitat: si v és inferior a 60 Km, K_v val 0; per a cada 10 Km/h que s'excedeixi l'anterior velocitat, cal afegir 1 dB(A).

La relació entre el percentatge de la rampa i el factor d'equivalència dels vehicles pesants és:

Rampa	<2%	3%	4%	5%	>6%
Equivalència (E)	10	13	16	18	20

Per poder disposar de la precisió de càlcul suficient per aplicar aquest mètode, cal que la relació entre l'alçària mitjana dels edificis i l'amplada del carrer ha de ser $> 0'2$.

$$\frac{h}{a} > 0'2$$

Pel que fa als carrers que disposen d'edificis només en una de les dues bandes, anomenats carrers en forma d'L, si tenen una amplada inferior es pot obtenir un càlcul força aproximat emprant la següent relació:

$$L_{Aeq} \text{ en } L = L_{Aeq} \text{ en } U \pm 1'5$$

La geometria típica d'un carrer d'aquestes característiques és:

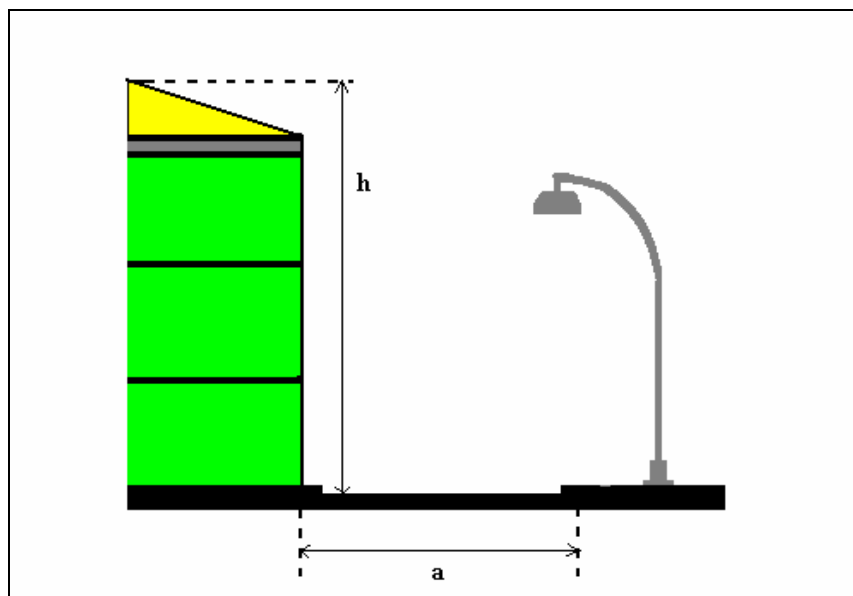


Figura 2.5.- Perfil d'un carrer en forma de L.

2.2.5.- Predicció de nivells acústics en vials de circulació ràpida

El mètode que es descriu a continuació ha estat desenvolupat pel CETUR. Permet estimar i preveure els nivells de soroll dels vials interurbans i de circulació ràpida a la isòfona de

referència, que és la línia fictícia que passa per tots els punts on el nivell L_{Aeq} , és igual al que existiria en un punt situat a 30 m de la via i a 10 m d'altura per sobre el pla de la calçada. Amb aquest procediment és calcula l'emissió sonora d'un vehicle, d'acord amb unes característiques predefinides de circulació, per fer-la extensiva a tot el conjunt de vehicles. Aquest mètode caracteritza la circulació d'acord amb els elements següents:

- **Tipus de vehicles:** Lleugers i pesants (pes total en càrrega superior a 3'5 t)
- **Velocitat:** Recull totes les gammes de velocitat mitjanes compreses entre 20 i 130 Km/h.
- **Tipus de trànsit:**
 - **Fluid continu:** vials urbans propers a la saturació que comporten variacions brusques de trànsit en curts períodes de temps i espai.
 - **Pulsatiu accelerat:** sortida d'un peatge, d'un semàfor, d'un stop.
 - **Pulsatiu desaccelerat:** és l'invers a l'accelerat.

Per calcular els nivells de soroll generats pel tràfic d'una via d'aquestes característiques es segueix el següent procediment.

En primer lloc es determina el nombre de vehicles lleugers, v_{ll} , i el nombre de pesants, v_p , que hi circulen en els següents intervals de temps: dia, hora i hores puntes. Seguidament es calculen els valors d'emissió sonora, E_s , per un únic vehicle mitjançant l'àbac de l'apèndix D. En aquesta gràfica es discrimina entre els vehicles lleugers i pesants, el tipus de trànsit i el pendent del carrer (*horitzontal, pujada i baixada*). Coneixent aquestes dades i la velocitat del vehicle (*eix d'abscisses*) es pot fer una estimació del nivell sonor.

Ara es calcula el nivell sonor equivalent L_{Aeq} , per a Q vehicles, per hora a la isòfona de referència, distingint entre vehicles lleugers, L_{Aeqll} i pesants, L_{Aeqp}

$$L_{Aeq} = E_s + 10 \cdot \log Q \quad (1.3)$$

El nivell assolit a la isòfona de referència a l'hora s'obté mitjançant la suma logarítmica:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right]$$

De la mateixa manera, es poden calcular els nivells en les hores puntes a partir de l'estimació del nombre de vehicles que hi circulen

$$L_{Aeq} = E_s + 10 \cdot \log Q(Hp)$$

Aquests càlculs poden completar-se amb aquests àbacs que donen una idea de l'atenuació sonora a diferents alçades en funció del desnivell i l'amplada de la calçada per on circulen els vehicles.

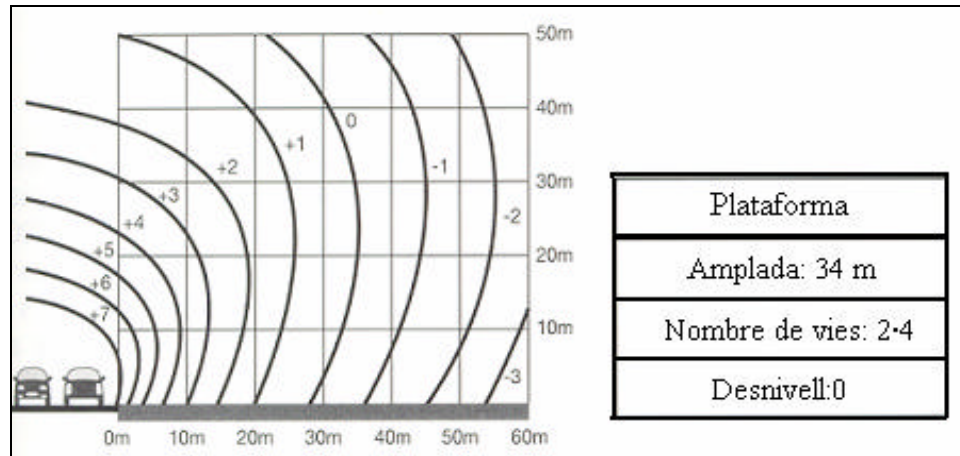


Figura 2.6.- Atenuació sonora sense desnivell.

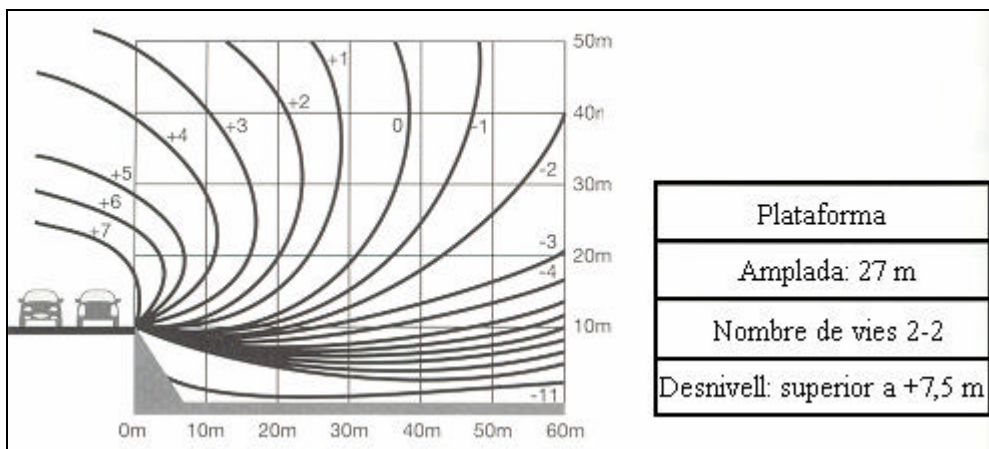


Figura 2.7.- Atenuació sonora amb un terraplè.

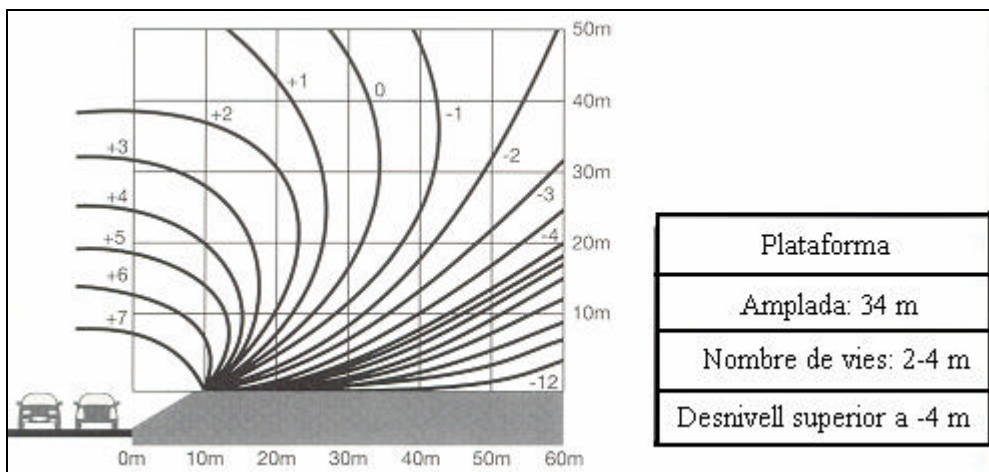


Figura 2.8.- Atenuació sonora en desmunt.

2.3.- CRITERIS D'AVALUACIÓ DEL SOROLL DEL TRÀNSIT

Hi ha diferents criteris i consideracions alhora de posar un límit als nivells de soroll permesos en una zona determinada. Els diferents punts de vista, però, tenen una mateixa finalitat: garantir i preservar el confort acústic de tot el territori.

2.3.1.-Criteris quantitius

La major part d'ordenances municipals vigents consideren el trànsit urbà com a emissor puntual, és a dir, regulen el soroll dels vehicles de manera individual. Hi ha països com Suïssa, però, que contempen el problema del soroll des d'una perspectiva ambiental, més àmplia. Amb aquest mètode, mitjançant enquestes poblacionals i els resultats que es deriven dels estudis acústics, es divideix el territori en tres zones ben diferenciades on els valor d'immissió màxims tolerats es regulen segons:

- **Valors de planejament:** són els que han d'assegurar un ambient futur de qualitat, per la qual cosa són els més restrictius, doncs cal que el percentatge de població molestada sigui molt baix.
- **Valors límits d'immissió:** es fixen unes cotes que no es poden superar sota cap circumstància, aconseguint que sigui relativament baixa la part de la població que experimenten molèsties o angoixa.
- **Valors d'alarma:** són els que si se sobrepassen, obliguen a aplicar mesures correctores.

A més, en l'ordenança Suïssa, un dels països pioners en el desenvolupament i aplicació d'aquestes ordenances ambientals, es diferencien aquests valors en funció del grau de sensibilitat de les zones afectades, el dia i la nit.

	Valors de Planificació $L_{Aeq}(dB)$ Dia / Nit		Valors d' Immissió $L_{Aeq}(dB)$ Dia / Nit		Valors de Sanejament $L_{Aeq}(dB)$ Dia / Nit	
	Z I	50	40	55	45	65	60
Z II	55	45	60	50	70	65
Z III	60	50	65	55	70	65
Z IV	65	55	70	60	75	70

Taula 2.2.- Exemple dels valors permesos per l'ordenança Suïssa de gener de 1986 en cadascuna de les zones.

- **Zona I:** protecció especial.
- **Zona II:** no es permet cap activitat molesta. Usualment són zones d'habitatges i les reservades a institucions públiques.
- **Zona III:** en aquestes àrees s'admeten activitats moderadament molestes, per exemple en les zones agrícoles.
- **Zona IV:** es permeten activitats molt sorolloses, principalment són zones industrials.

2.3.2.- Control de soroll dels vehicles

La directiva europea de referència que fixa els nivells màxims d'emissió sonora dels vehicles a motor per la seva homologació és la 70/157/CEE. Cal dir, però, que han aparegut directives posteriors que introdueixen matisos i esmenes. Totes aquestes directives proposen la següent metodologia: determinar en primer lloc el soroll emès pel tub d'escapament quan el vehicle està aturat per poder dur a terme posteriorment la mesura de control quan està en circulació. El valor que s'enregistra quan està immòbil es pren com a referència i es tolera que els valors emesos pels tubs d'escapament a la via pública siguin sensiblement superiors. Les condicions sota les que s'han de prendre aquestes mesures s'han d'ajustar als següents paràmetres:

- **Entorn de mesura.** Cal que la superfície sigui reflectora (asfalt, formigó ...) i evitar la presència de parets verticals a menys de 3 m dels extrems del vehicle. Així mateix és recomanable que el soroll ambiental sigui com a mínim 10 dB inferior al nivell sonor emès pel vehicle.
- **Equips.** S'ha d'utilitzar un sonòmetre de tipus I o II que mesuri en dBA, amb temps d'integració *fast*, i tingui retenció de nivell màxim. S'ha de calibrar també, abans i després de cada mesurament, emprar una pantalla antivent i disposar d'un tacòmetre digital per llegir les revolucions del motor.
- **Condicions de funcionament.** És molt important que el comandament de la caixa de canvis del vehicle estigui en punt mort. El règim del motor en les motocicletes s'ha d'estabilitzar a 3/4 de la revolució màxima si és inferior o igual a 5.000 rpm i a la meitat si és superior. Els vehicles de més de dues rodes també han d'estabilitzar el règim del motor a 3/4 de la rpm. màxima. El control de les revolucions es fa apropant un tacòmetre digital a menys de 20 cm de la bobina.

Referent a l'emplaçament del micròfon, aquest s'ha de situar a l'alçada del tub d'escapament i en cap cas a menys de 20 cm sobre el nivell del terra, a una distància de 50 cm del tub en un angle de $45^\circ \pm 10^\circ$. Algunes consideracions que cal tenir en compte en el cas que hi hagi dos tubs d'escapament són:

- Si la separació entre dos els tubs és superior als 30 cm, s'ha de mesurar cadascun per separat i el resultat és el del nivell més elevat.
- Mentre que si la distància de separació és inferior a 30 cm el micròfon s'ha d'orientar en direcció a la boca més propera a la part exterior del vehicle o a la més alta sobre el nivell del terra.

Pel que fa a les motocicletes en repòs, per poder fer una mesura acústica amb el sonòmetre cal tenir en compte les indicacions que es detallen en l'apèndix E. Una metodologia similar, tal com s'observa en el gràfic, se segueix amb els vehicles de quatre rodes.

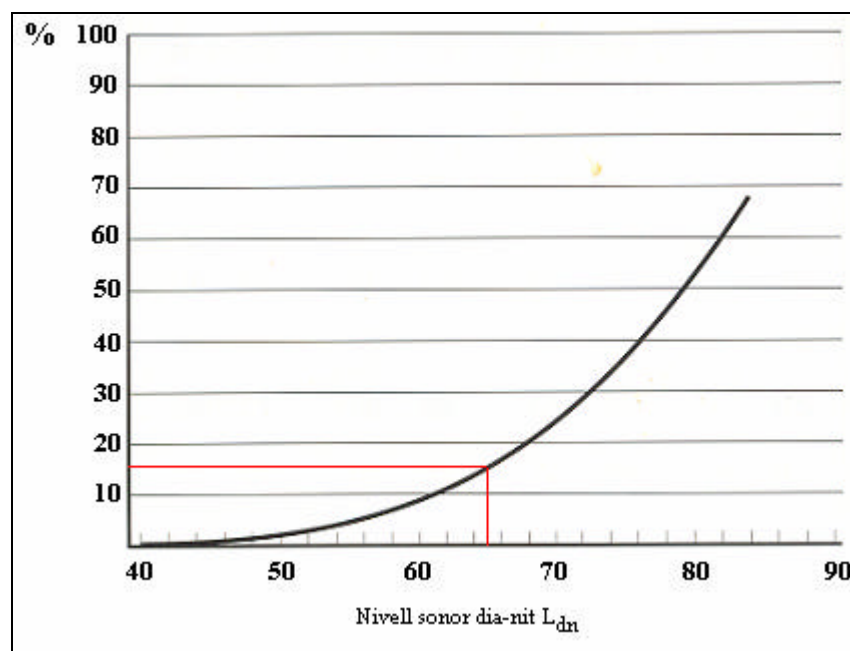
La homologació dels tubs d'escapament de les motocicletes està regulada per la Directiva 78/1015/CEE i han de dur la marca de fàbrica i la d'homologació de la UE. Aquestes marques s'han d'inscriure en un rectangle no inferior als 8 mm amb la lletra "e" seguida de la xifra corresponent al país que el va homologar (9 per a Espanya). Les dimensions d'aquestes xifres, juntament amb el nombre d'homologació, no poden ser inferiors als 4 mm. Aquestes marques han de ser indelebles i clarament llegibles quan el dispositiu ha estat muntat a la motocicleta.

Amb aquestes mesures es pretén disminuir la fressa generada per les motocicletes, doncs cal recordar que els models amb una cilindrada inferior als 50 cm³ i amb tubs d'escapament no homologats són una de les principals causes de l'excés de soroll en les zones urbanes.

Aquests criteris sobre els valors acústics admissibles estan fonamentats en dades quantitatives dels nivells sonors equivalents, L_{Aeq} . Existeixen altres metodologies, però, que basen els seus principis en consideracions més subjectives.

2.3.3.- Criteris qualitius

No estan regulats per dades empíriques i objectives, sinó que obeeixen al grau de molèstia que provoca el soroll sobre la població. Aquests criteris es poden establir a partir de gràfics.



Gràfic 2.1.- Corba que relaciona els nivells de soroll amb el percentatge de població que es considera molt molesta .

En aquesta gràfica, per exemple, s'observa que, on el nivell és superior als 65 dB, es considera molt molestada un 15% de la població, mentre que per nivells propers als 75 dB, gairebé un 40% de la població manifesta estar molt angoixada. Aquests estudis es porten a terme a partir dels resultats enregistrats en qüestionaris que complimenten les persones enquestades i que, en última instància, depenen de la seva opinió personal i subjectiva. Val a dir, però, que quan es publiquen els resultats d'un estudi d'aquestes característiques es contrasten prèviament els resultats entre un ampli ventall de mostres de població.

Hi ha altres criteris qualitius d'avaluació de soroll de trànsit, criteri en horari diürn, que, per exemple, atorguen per nivells agrupats de 3 en 3 dBA diferents graus de molèstia.

Nivell de soroll L_{Aeq}	Grau de molèstia
<56	Molt baix
57 a 59	Baix
60 a 62	Bastant baix
63 a 65	Mitjà
66 a 68	Bastant alt
69 a 71	Alt
72 a 75	Molt alt
>75	Molt més alt

Taula 2.3.- Avaluació de nivells L_{Aeq} de soroll de trànsit.

S'han agafat intervals de 3 dBA perquè responen a l'increment o el decrement de soroll que hi hauria en duplicar o reduir a la meitat el nombre de pas de vehicles en un temps determinat. Cal tenir present que el nivell de soroll resultant de la suma de perturbacions acústiques provocades per diferents fonts sonores no té una resposta lineal, sinó logarítmica. Cal tenir en compte, que el grau de molèstia depèn també de la freqüència, ja que els sons d'altres freqüències generen una sensació d'angoixa superior a d'altres amb la mateixa intensitat, però amb una freqüència inferior. Cal remarcar també que la sensació de molèstia percebuda en una zona rural o residencial és molt superior a la que s'acostuma a experimentar en una àrea urbana per un mateix nivell acústic. Els factors que provoquen aquest fenomen són variats i diversos: les expectatives de les persones, les ones que arriben de diferents direccions, múltiples fenòmens de reflexió, difracció i interferència ...

III ACÚSTICA URBANA

3.1.- L'ACÚSTICA I EL DISSENY URBANÍSTIC

3.1.1.-Acústica urbana i arquitectura

En aquest apartat es descriuen els elements més rellevants i del disseny urbanístic alhora que es descriuen els mètodes més usuals per reduir els nivells de soroll que produeixen.

Disseny d'autopistes

La construcció d'una barrera acústica al costat d'una autopista o el seu enfonsament provoquen una disminució considerable del nivell de soroll que generen els vehicles. En aquests casos, aquesta reducció, deguda bàsicament a fenòmens de difracció, oscil·la al voltant dels 8 dBA si la via no és visible des del punt receptor. Pel contrari, si el carril de l'autopista és visible l'atenuació serà de només uns 3 dBA.

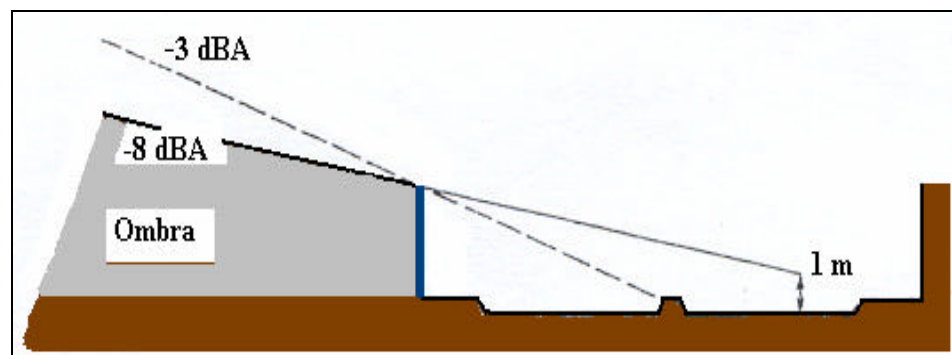


Figura 3.1.- Reducció del soroll per difracció gràcies a una barrera acústica.

En la figura següent s'aprecien els valors de la intensitat acústica que s'enregistren quan es col·loca una barrera de 4 metres d'alçada al costat d'una via amb quatre carrils.

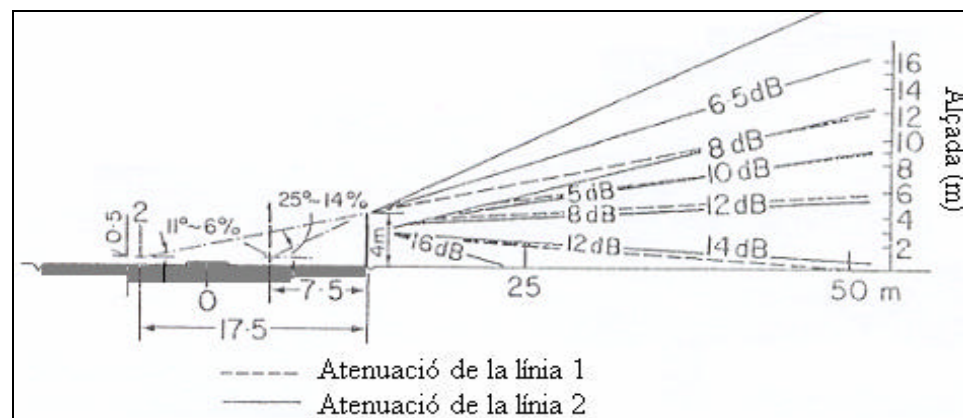


Figura 3.2.- Nivells d'atenuació aconseguits amb una barrera de 4 metres d'alçada.

Tècniques per reduir els nivells de soroll

El cost econòmic derivat d'aquestes obres és, en la majoria dels casos, molt elevat i només és justificable en àrees on hi ha una gran densitat de població on els beneficis siguin prou significatius i apreciats per una gran majoria. Alguns d'aquests mètodes són:

a) Talls, fosses i cobertures

Quan en la configuració orogràfica natural del terreny existeixen fosses o trinxeres envoltades de vegetació s'aconsegueix fàcilment una atenuació considerable (8-15 dBA). Malauradament, si hi ha edificis alts situats al voltant de la carretera, caldria una profunditat excessiva del fossat per reduir la intensitat acústica fins uns nivells acceptables.

La Bundestrasse B.12 prop de Munich proporciona un interessant exemple de diverses possibles solucions. Per protegir els edificis situats al costat de la carretera (principalment edificis de dues plantes) s'han assajat diferents estratègies:

- Baixar el nivell de la carretera i aixecar una paret tapada amb coníferes.
- Cobrir la carretera una longitud de 100 metres.
- Bancs de terra compactes en la part superior dels pendents que voregen la carretera.
- Per protegir els edificis especialment elevats (5 o 6 pisos) s'ha baixat el nivell de la carretera i, simultàniament, s'han col·locat bancs de sorra flanquejats per parets als marges de la via.

b) Pantalles aèries

Aquest mètode consisteix fonamentalment en col·locar barreres acústiques al costat d'una via enfonsada, tal com s'aprecia en la il·lustració.

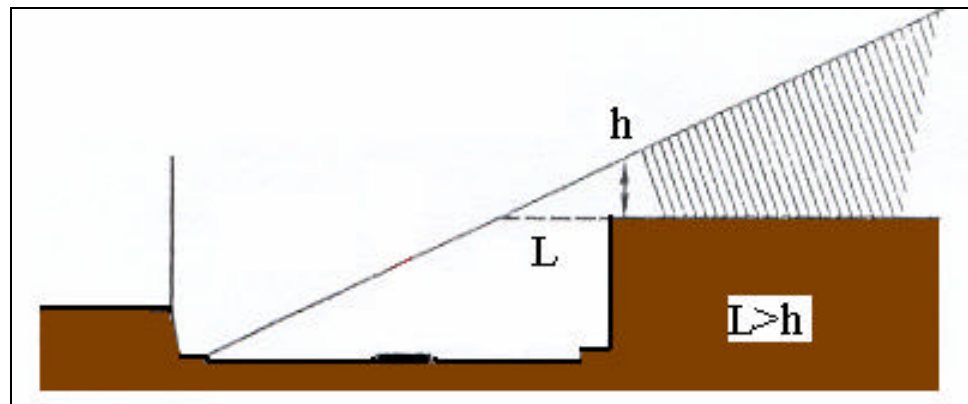


Figura 3.3.- Pantalla aèria en una autovia.

Aquesta solució és més costosa que una paret vertical, però sovint dona més bons resultats. Tanmateix, però, cal aplicar un tractament acústic a les parets interiors per reduir la reverberació, doncs dins l'espai de la cavitat es genera un nivell de soroll massa alt degut a les múltiples reflexions, especialment per freqüències sota els 500 Hz. S'aconsegueix la màxima eficiència si al mig de la via s'aixeca un pannel absorbent.

Recobriments total de la via

Aquest mètode és, sens dubte, el més radical. Els experiments fets per Rucker i Gluck amb pantalles corbades al costat de la carretera foren força decebedors, ja que només s'apreciaven reduccions de soroll significatives en el rang de freqüències superiors als 2000 Hz. Moltes obres posteriors han demostrat que els millors resultats s'obtenen quan es recobreixen totalment tots els carrils, sense deixar cap espai obert.

En les ciutats, on hi ha molts encreuaments, les vies enfonsades o soterrànies són sovint una bona solució ja que eliminen l'excés de fressa provocat per les parades i els arrencaments dels vehicles. Cal tenir en compte, però, que moltes vies d'aquest tipus poden ser molt sorolloses, doncs sovint, el pendent de la carretera encoratja als conductors a augmentar la velocitat i, d'altra banda, els vehicles pesats tenen que canviar a una marxa més curta en les pujades, amb el consegüent increment del nivell acústic.

Barreres acústiques verticals

La construcció d'una obra d'aquest tipus és força costosa, malgrat que, en la majoria de casos, representa la millor solució. L'atenuació teòrica en la zona d'ombra és de 8-10 dB, però múltiples reflexions en els edificis circumdants o un petit canvi en l'admitància acústica del terreny poden reduir-ne significativament l'eficiència. Donada la quantia, gens menyspreable, que es deriva d'aquestes obres és molt aconsellable fer prèviament estudis de simulació per ordinador, com els que es recullen en l'apèndix Z.

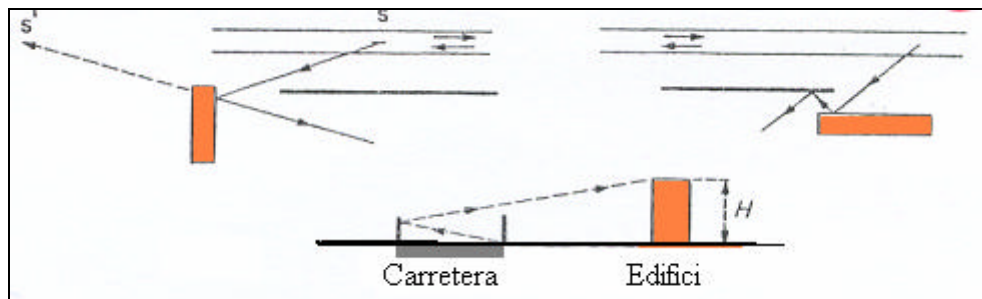
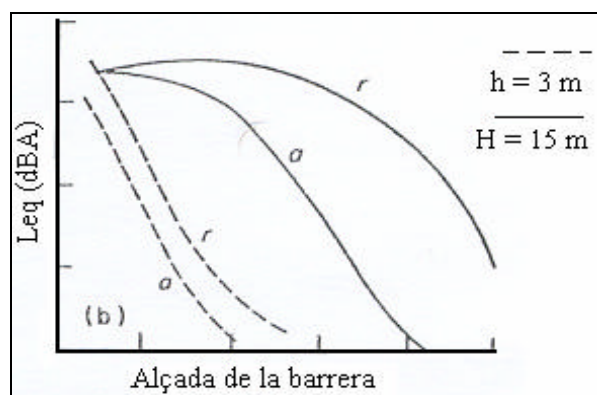


Figura 3.4.- Exemples de reflexions de soroll desfavorables.

Els nivells de reducció de soroll, en una escala que pot variar en funció de la qualitat del material des dels 2 dBA fins els 5 dBA, que es poden obtenir amb panys de paret absorbents (a) o reflectors (r) són del següent ordre:



Gràfic 3.1.- Reducció de nivell de soroll degut a una barreres absorbents i reflectores.

L'energia acústica que passa a través de la barrera sense reflectir-se o difractar-se depèn de la seva densitat de massa. Normalment, a partir dels 3 m d'alçada i una densitat de 15 kg/m^2 , s'obté una reducció acústica apreciable.

Quan la superfície és horitzontal, s'obté la màxima eficiència quan la barrera està prop de la font o el punt de recepció. En les carreteres on hi hagi una barrera de seguretat, els apantallaments s'acostumen a col·locar a una distància de 1'5 m a 2 m darrera la protecció per minimitzar l'impacte en cas d'accident. Els resultats obtinguts en l'autopista 401 a Ontario, emprant aquesta metodologia, són força satisfactoris.

L'alçada de la barrera és de 3 m i el nivell d'atenuació aconseguït en la façana de les cases a 1'2 m d'alçada oscil·la entre 2 i 6 dB. També s'han aconseguït bons resultats col·locant l'apantallament al mig de la via, entre els carrils tal com s'indica en la figura 3.5 (a). Quan la via circula a un nivell superior del terreny del voltant s'aconsegueixen nivells d'atenuació molt elevats si es col·loca una barrera acústica, tal com s'aprecia en la il·lustració 3.5 (b).

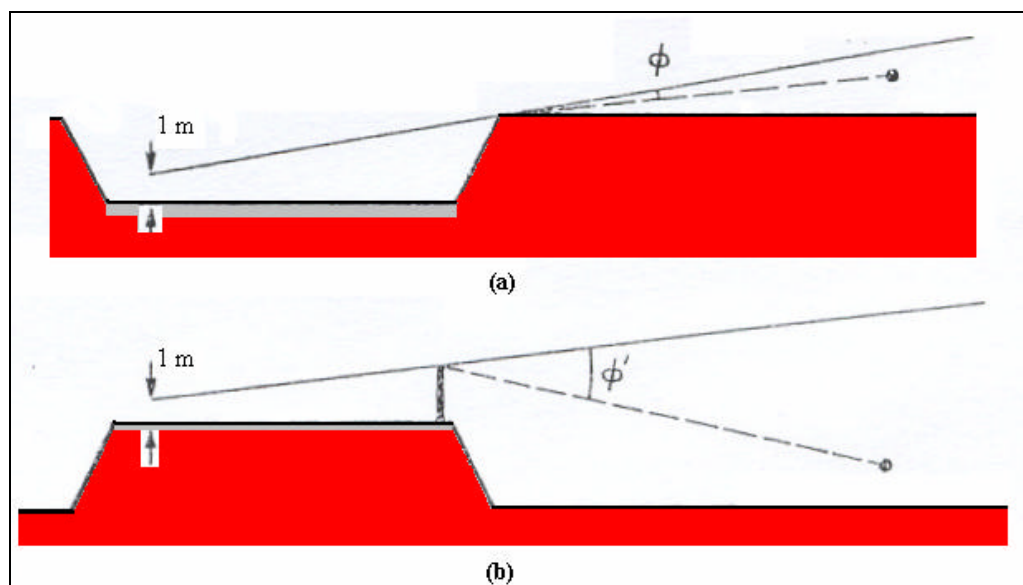


Figura 3.5.- Angle sota el que s'estén la zona d'ombra acústica.

Respecte al seu disseny, les que resulten més econòmiques i visualment acceptables són els munts de terra revestits de vegetació. A efectes pràctics els principals factors a considerar són les seves propietats de reflexió o absorció acústiques, la densitat superficial i la resistència als agents atmosfèrics (pluja, neu, vent ...). Cal que es puguin netejar fàcilment i que disposin de accessos de seguretat que permetin una ràpida evacuació en cas d'ocórrer un accident. Així, les barreres construïdes amb seccions desmuntables són més manejables i fàcils de reparar. Els panells de fusta de 3 m d'alçada i 4'8 m de longitud han donat un bon resultat a Sacramento (USA).

Les barreres perforades també ofereixen una bona solució als problemes acústics. Bàsicament es distingeixen tres tipus de perforacions que són:

- Forats o cavitats. Contribueixen a disminuir l'impacte visual i són imprescindibles quan els apantallaments es col·loquen en l'interior de túnels o cavitats.
- Barreres que s'aixequen 10 o 20 cm per sobre el nivell del terra. Estudis fets per la CSTB mostren, no obstant, una pèrdua d'eficiència que pot arribar fins els 9 dB.

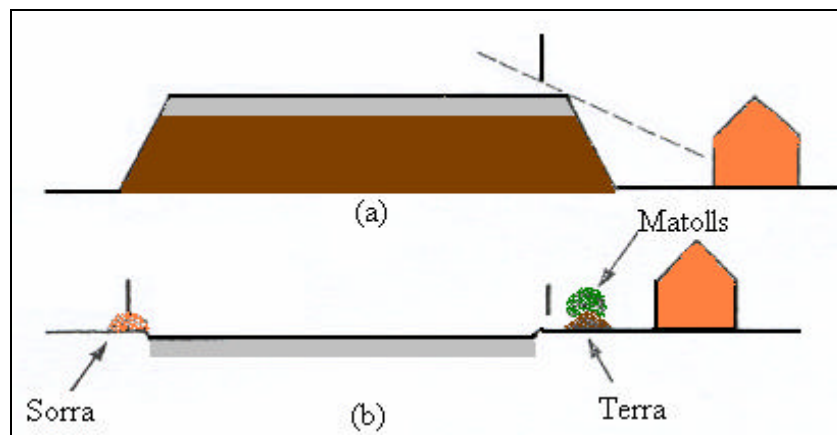


Figura 3.6.- Barreres perforades per la part inferior.

- Els panells amb estries verticals contribueixen a crear un efecte visual de transparència. L'atenuació acústica s'aconsegueix gràcies a que els múltiples prismes verticals funcionen com ressonadors de Helmholtz. La màxima atenuació assolida amb aquest sistema és de 10 dB, obtinguda per una freqüència d'uns 800 Hz.

Planificació urbanística del soroll

L'objectiu de qualsevol pla urbanístic, pel que fa a la qüestió acústica, és crear grans zones habitables on els nivells sonors mitjans i de pic siguin baixos. Els aspectes generals a considerar sobre la distribució global de la ciutat són bàsicament:

- La ciutat lineal.** Amb aquest model es pretén crear àrees amb activitats pròpies ben diferenciades. L'exemple més característic, que de manera natural es dona en molts nuclis urbans, consisteix en trobar vivendes a un costat, mentre que en l'altre només hi ha oficines i indústries. El principal inconvenient que planteja aquesta distribució consisteix en que la ciutat queda dividida en dues zones amb activitats ben diferenciades, la qual cosa comporta un increment del volum de trànsit i el conseqüent impacte ambiental.
- Estructura radial.** Aquest tipus de ciutat s'aixequen al voltant d'un edifici central, generalment l'ajuntament o un centre comercial, formant anells d'edificis de natura industrial, comercial, habitatges... Els principals inconvenients que presenta aquesta disposició són que les distàncies al centre són grans per tots els punts situats en el perímetre exterior on també els camions interfereixen amb el tràfic lleuger. Sovint, els vehicles particulars han de ser desviats a través de les àrees residencials. Tots aquests factors fan que aquest model urbà sigui força acceptable en ciutats de gran tamany que disposin d'una eficaç xarxa de transport públic. Alguns exemples són les ciutats sueques de Västerås, Göteborg i Lund on, fins i tot, s'ha prohibit l'accés al trànsit al centre, cosa que ha reduït considerablement els nivells de contaminació acústica i ambiental.
- Xarxa urbana.** Està formada per carrers paral·lels que es tallen en angle recte. En principi, no existeixen zones per un ús específic i es crea un flux de tràfic difús de natura no homogènia que pot provocar nivells de soroll innecessàriament elevats en zones residencials. Aquests models, però, poden ser viables si s'eliminen interseccions mitjançant ponts aeris o vies soterrànies i es construeixen suficients carreteres secundàries i vies de circumval·lació. Alguns exemples són les ciutats de Le Vaudreuil a França i Chandigarh al Pakistan.

- d) **Àrees industrials.** Són necessàries i estan presents, en major o menor mesura, en qualsevol nucli urbà. Les grans àrees industrials amb les pròpies ciutats dormitori estan desapareixent, doncs molta gent troba preferible viure fora d'aquests nuclis, als que accedeix mitjançant vehicles públics preferentment (ferrocarrils, autobusos ...)
- e) **Espais oberts.** Cal que tos els nuclis urbans en puguin gaudir. És desitjable que en almenys 10 ha de la ciutat es gaudeixi d'un nivell acústic igual o inferior als 50 dBA, envoltant llacs i fonts.
- f) **Jerarquia d'àrees d'activitat.** Qualsevol ciutat minimitza el seu nivell general de soroll si les empreses comercials o de serveis es localitzen en el centre de l'àrea urbana. El repartiment dels productes i les mercaderies pot fer-se a partir d'un anell de distribució concèntric amb terminals de càrrega. Donant suport a aquesta filosofia, la Tri-State Transportation Commission ha fet un estudi sobre la distribució de mercaderies a Manhattan i ha estimat que el 15% dels viatges que realitzen els repartidors de mercaderies es podrien eliminar si es disposés de terminals de càrrega estratègicament col·locades. En aquest informe, també es destaca que, en aquesta zona, la capacitat de càrrega de la majoria de vehicles varia entre les 8 i 10 tones, mentre que la càrrega que transporten diàriament rarament sobrepassa les 2 tones.
- g) **Carrils urbans.** Aquestes vies es destinen únicament al transport públic, que disposant de carrils propis són molt menys sorollosos. Actualment, s'està desenvolupant aquesta tendència, doncs en la majoria de situacions és preferible a l'alternativa que suposen les vies amb prioritat de pas. Paral·lelament a aquesta consideració i tenint en compte que l'energia acústica emesa per un mòbil és proporcional al quadrat de la seva velocitat, és altament recomanable limitar, sempre dins un límit raonable, la velocitat en les vies urbanes.
- h) **Àrees de vianants i carrils per bicicletes.** Aquestes àrees, malgrat que són desitjables, gairebé no contribueixen a disminuir el nivell de soroll global de la ciutat. Així, en carrers ressonants amb edificis alts i cantonades la pertorbació acústica produïda per les petjades i algun motor és intensament reverberada podent arribar a nivells propers als 70 dB. Hi ha àrees, però, on es minimitza la contaminació acústica, doncs el transport públic utilitza motors de gas o elèctrics, (el Steyrbus amb gas de Vienna) o bé es limita el pas a qualsevol tipus de mitjà de transport, excepte les bicicletes.

Tècniques per millorar l'acústica d'un sector urbà

Les principals directrius que es segueixen quan es vol millorar el "confort" acústic d'una zona urbana són:

- 1.- La major part del flux de vehicles es desvia per vies alternatives.
- 2.- Es reorganitzen els trajectes i els horaris del transport públic, especialment els autobusos. Si es disposa de capital, sempre es aconsellable adquirir models nous menys sorollosos.
- 3.- Es construeixen grans zones d'aparcament al costat de les principals vies d'accés a aquesta zona.
- 4.- Es restringeix l'accés dels vehicles a alguns carrers reservats només als vianants, vehicles de transport públic especials i a les bicicletes. Cal destacar, que en línies generals, si el soroll emès pels autobusos està dins els marges tolerables, l'ambient acústic global es pot qualificar de tolerable.

Aquestes mesures cal prendre-les “*a posteriori*” i sovint són cares, difícils i feixugues. Sense cap mena de dubte és molt millor tenir-les en compte en la fase de disseny previ de la zona. Així, quan s’organitza una nova àrea urbana, cal tenir cura de derivar el major flux de trànsit possible per variants o vies alternatives, el trajecte de les quals passi per terrenys perifèrics alhora que delimitar prèviament les àrees restringides als vehicles particulars.

Un altre factor molt important consisteix en eliminar els encreuaments, perquè es precisament en les acceleracions quan els vehicles produeixen els nivells de soroll més elevats. Les vies soterrànies o una eficaç combinació de semàfors poden ajudar a reduir considerablement el soroll ambient.

Limitar la velocitat dels vehicles lleugers i pesats pot ajudar a reduir els nivells de soroll. En la taula (3.1) es mostra la reducció mitjana del nivell equivalent, L_{eq} , per un mateix flux de tràfic en funció de la variació del límit de velocitat, suposant que la situació inicial correspon a un flux lliure de trànsit on els cotxes tenen una velocitat mitjana de 120 km/h, mentre que la dels camions és de 80 km/h.

Límit de velocitat	Només cotxes	10% camions	30% camions	100% camions
90 km/h pels cotxes 80 km/h pels camions	-4	-2'5	-1'3	0
90 km/h pels cotxes 60 km/h pels camions	-4	-4	-3	-2'4
60 km/h pels cotxes i camions	-9	-7	-5	-4

Taula 3.1.- Reducció del nivell equivalent, L_{eq} , per diferents variacions del límit de velocitat.

Els vehicles pesats constitueixen, sense cap mena de dubte, la principal font de pertorbació sonora de qualsevol via. La millor solució per tractar aquest problema sembla ser restringir el seu pas a les vies amb major capacitat, (*autopistes o autovies*) preferentment pels trajectes més allunyats dels nuclis urbans.

Arquitectura urbana

Els arquitectes juguen un paper fonamental per aconseguir un bon ambient acústic quan dissenyen els plans d’urbanisme. Solucions elementals consisteixen en desviar el tràfic lluny dels edificis, alhora que les zones d’aparcament. Pel que fa a la construcció de les edificacions, sembla que col·locar l’estructura perpendicularment al carrer provoca un increment de gairebé 3 dB en el nivell de soroll generat pel trànsit, doncs quan les ones sonores incideixen obliquament sobre la superfície de les finestres penetren més fàcilment que quan hi ha incidència normal. Aquest fet suggereix que es millor construir els habitatges amb la façana que presenta una major superfície paral·lela a la carretera.

S’ha determinat experimentalment que per enregistrar nivells acústics al voltant dels 60 dBA en la part alta de les façanes s’han de situar almenys a 200 m de distància de la línia de tràfic per un flux de trànsit d’uns 2.000 vehicles / hora amb un 20% de vehicles pesats. Davant d’aquests alts nivells de soroll, la solució més eficaç consisteix en col·locar apantallaments. Abans d’edificar aquestes zones, però, es poden emprar estratègies per reduir aquests elevats nivells d’emissió.

Una de les més efectives consisteix en construir llargues fileres d'edificis paral·lelament a la carretera, els quals permeten l'aparició d'àrees poc sorolloses en la part posterior on es poden construir altres habitatges que gaudiran d'un confort acústic acceptable. Així mateix es poden construir parcs, jardins, zones esportives ...

Els tipus d'edificis que poden fer la funció d'apantallament poden tenir usos diferents als propis de l'habitatge (garatges, magatzems ...). D'aquesta manera s'aconsegueix el mateix efecte esmorteïdor amb un mínim perjudici per part dels propietaris. Altres consideracions a tenir en compte consisteixen en intentar evitar que la façana on hi ha una major incidència de les ones sonores estigui situada en el costat nord de la carretera, ja que les façanes assolellades són les més sorolloses i, a més, l'ús de l'aire condicionat esdevé gairebé imprescindible.

En el disseny urbanístic, cal tenir també en compte que les múltiples reflexions en les parets puguin generar nivells sonors anormalment elevats en determinades zones. Sempre que es disposi de terreny, és convenient construir carrer i vies amples, perquè a mesura que es doble l'alçada de la via, el soroll generat pel trànsit es redueix en aproximadament 3 dB per un mateix flux de vehicles.

En última instància, cal considerar la distribució dels interiors dels habitatges. S'han de situar les parts més sensibles, dormitoris i sales d'estar, en les zones més protegides del soroll, alhora que les escales de veïns, cuines, banys ... s'han d'emplaçar en les àrees més exposades.

3.1.2.-Anàlisi de façana: model numèric

L'impacte de les ones sonores sobre la façana dels edificis és, sens dubte, d'especial interès en el camp de l'acústica urbanística. Així, doncs, en aquest apartat s'estudia el modelatge numèric del camp acústic en un edifici amb balcons, segons els resultats obtinguts per D.C. Hothersall, K.V. Horoshenkov i S.E. Mercy, publicats al *Journal of Sound and Vibration* el 1996.

Una estructura arquitectònica que es repeteix en totes les ciutats d'arreu del món consisteix, sens dubte, en alts edificis amb balcons. Per aquest fet, resulta molt interessant conèixer el comportament de la propagació de les ones sonores sobre les façanes. Els nivells de pressió sonora en els balcons són especialment interessants, doncs estan directament relacionats amb el soroll que arriba a l'interior de les habitacions adjacents.

Model numèric

El sistema s'ha modelat en dues dimensions i té la configuració de la figura (3.7). Estan representat quatre balcons de 0'9 m de profunditat i una alçada de 2'9 m mesurada des del terra del balcó fins al sostre. El gruix del terra i la paret dels balcons és de 0'1 m, així la diferència d'alçades entre els pisos és de 3'0 m. En les pàgines següents es mostren les gràfiques i els càlcul obtinguts en aquest anàlisi.

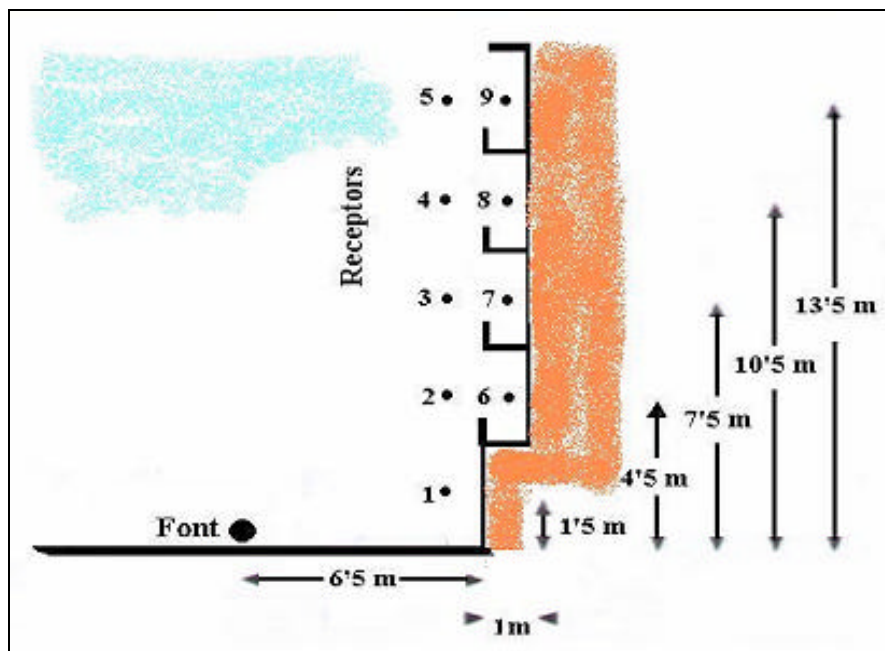


Figura 3.7.- Mesures de la secció transversal de la façana d'edificis i la carretera.

La font sonora (*flux de vehicles*) es troba a una distància de 6'5 m de l'edifici i a 0'5 m d'alçada sobre la superfície de la carretera. Els punts rodons amb els nombres de l'1 al 9 indiquen la posició dels receptors sobre la façana. S'han estudiat els efectes que tenen les diferents disposicions de material absorbent sobre la superfície del balcó que es mostren en la figura.

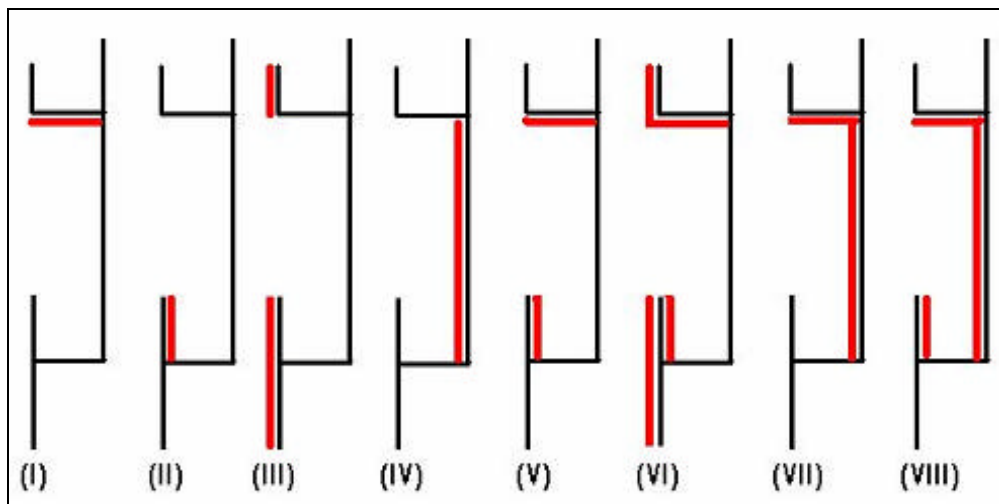
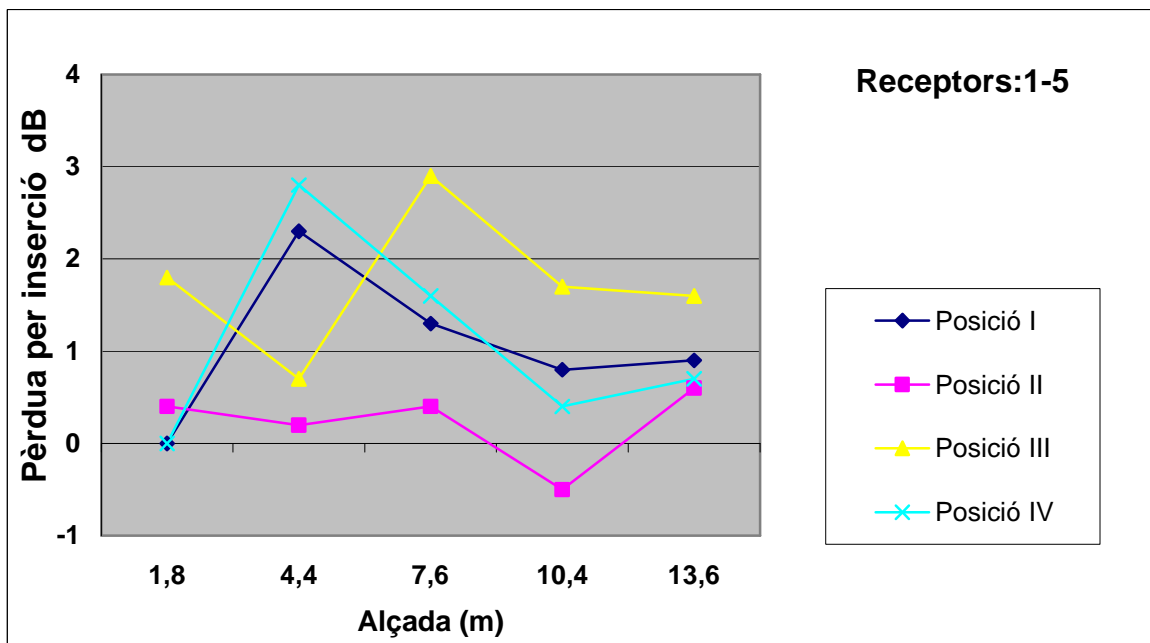


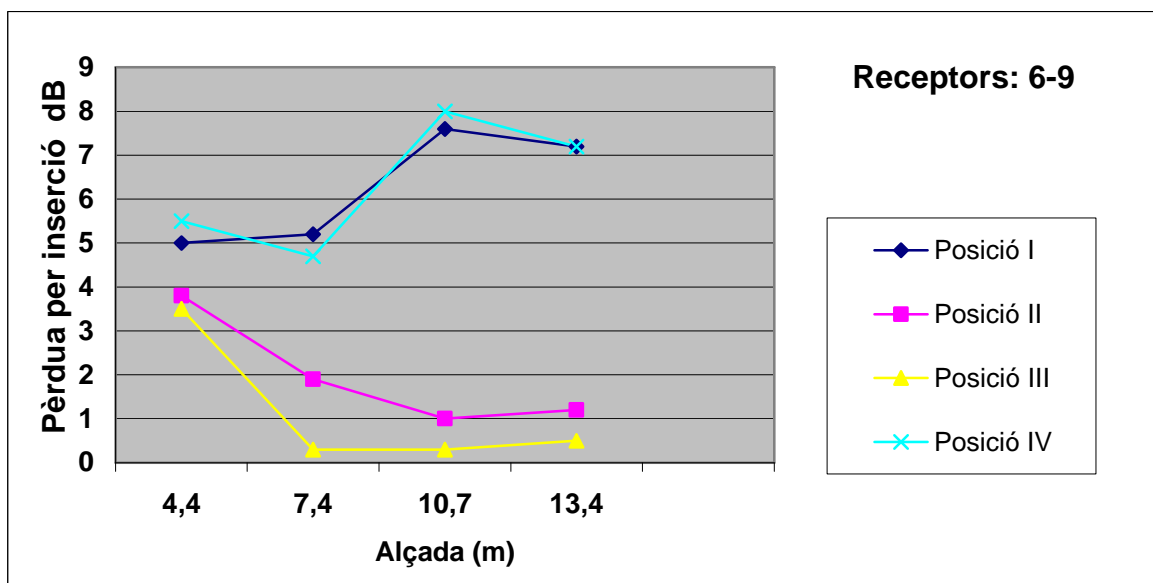
Figura 3.8.- Diferents distribucions de material absorbent sobre els balcons.

Per estudiar la propagació de les ones sonores sobre aquestes superfícies s'ha emprat la integral de la funció de Helmholtz amb les respectives condicions de contorn. Els càlculs s'han realitzat amb 1/9 octaves de banda en el rang dels 58 Hz fins als 3415 Hz en cadascun dels punts receptors. Les següents gràfiques mostren la disminució de nivells de pressió sonora enregistrat en els diferents punts com a resultat de la diferent col·locació dels panells absorbents.



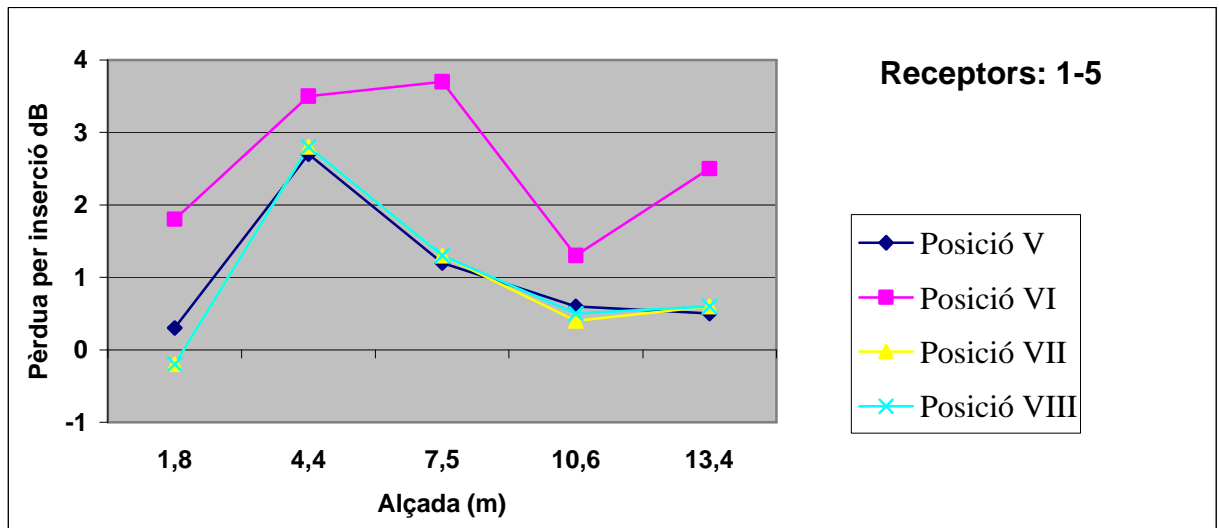
Gràfic 3.2.- Pèrdues de nivell de soroll enregistrada pels receptors 1-5.

Amb aquesta gràfica es representa la disminució del nivell de soroll segons s'apliqui un material absorbent segons la disposició indicada en la figura (3.8). Aquest gràfic correspon a la col·locació del material en les posicions I, II, III i IV.

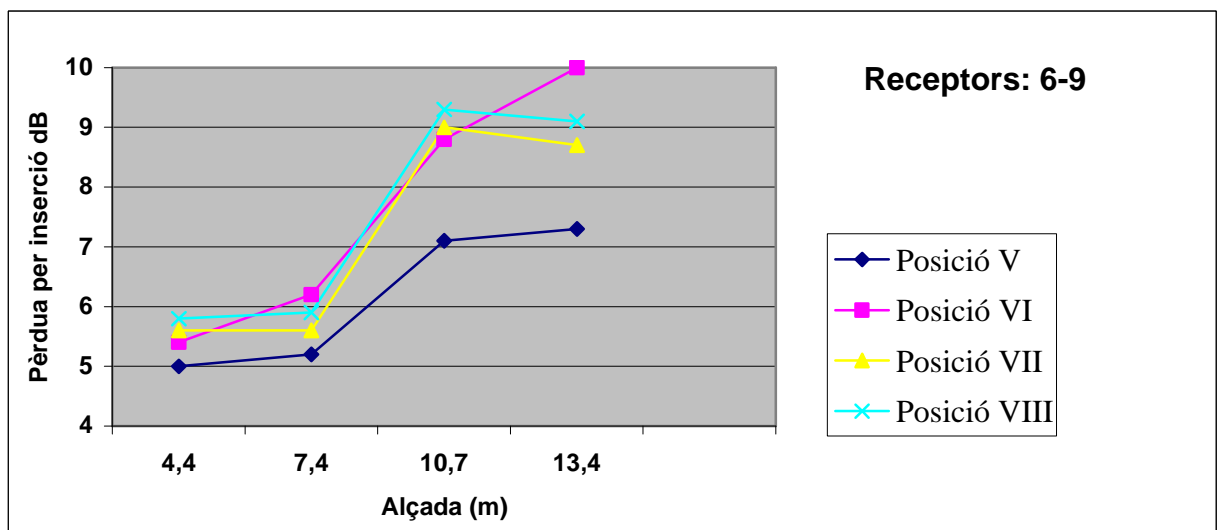


Gràfica 3.3.- Pèrdues de nivell de soroll enregistrada pels receptors 6-9.

Aquesta gràfica també fa referència a les pèrdues de nivell enregistrades quan es col·loca un material absorbent en aquestes posicions. Les dues il·lustracions que hi ha a continuació indiquen la pèrdua de soroll en els receptors quan el material absorbent es troba en les situacions V, VI, VII i VIII, tal com s'exposa en la figura (3.8).



Gràfica 3.4.- Pèrdues de nivell de soroll enregistrada pels receptors 1-5.



Gràfica 3.5.- Pèrdues de nivell de soroll enregistrada pels receptors 6-9.

En general, s'aprecia que la major disminució d'energia sonora s'enregistra al voltant dels 8 metres d'alçada.

Resultats i conclusions

Tenint en compte la suma d'energies sonores reflectides pel terra i la façana de l'edifici cal esperar una reducció de nivell proper als 6 dB. De fet, s'observen variacions de l'ordre de $\pm 1,5$ dB degut als múltiples efectes d'interferència, difracció i reflexió difusa. A partir d'aquests resultats, enregistrats a diferent alçada, s'observa que els balcons no constitueixen realment una barrera acústica important degut a l'efecte de les fortes reflexions que tenen lloc en els sostres i en la paret interior. Les màximes reduccions de soroll, que s'obtenen col·locant panells absorbents i són de l'ordre dels 7 o 8 dB, s'aprecien a partir de la tercera planta. Davant d'aquests resultats, on s'obtenen reduccions de soroll força significatives, fora bo que els arquitectes i constructors fossin més sensibles a aquesta problemàtica, tot fent-ho palès en els plànols dels seus nous projectes i construccions.

3.2.- NIVELLS SONORS DEL FERROCARRIL DE GIRONA

3.2.1.-Descripció del soroll del tren a Girona (J. Ruiz)

Mesura del soroll dels trens

Per analitzar els efectes del soroll produït pel pas dels ferrocarrils dins la ciutat de Girona, s'han dividit els trens en dues grans categories: baixa intensitat (poc soroll) i alta intensitat (molt soroll). Amb les dades preses s'han elaborat unes fórmules matemàtiques, en coordenades polars, que descriuen la pertorbació sonora produïda en funció de la distància a la via, r , i l'elevació del punt receptor de l'ona sonora, θ . Per aconseguir-ho s'han pres mesures a diferent alçada de la via tal com s'il·lustra en aquest gràfic.

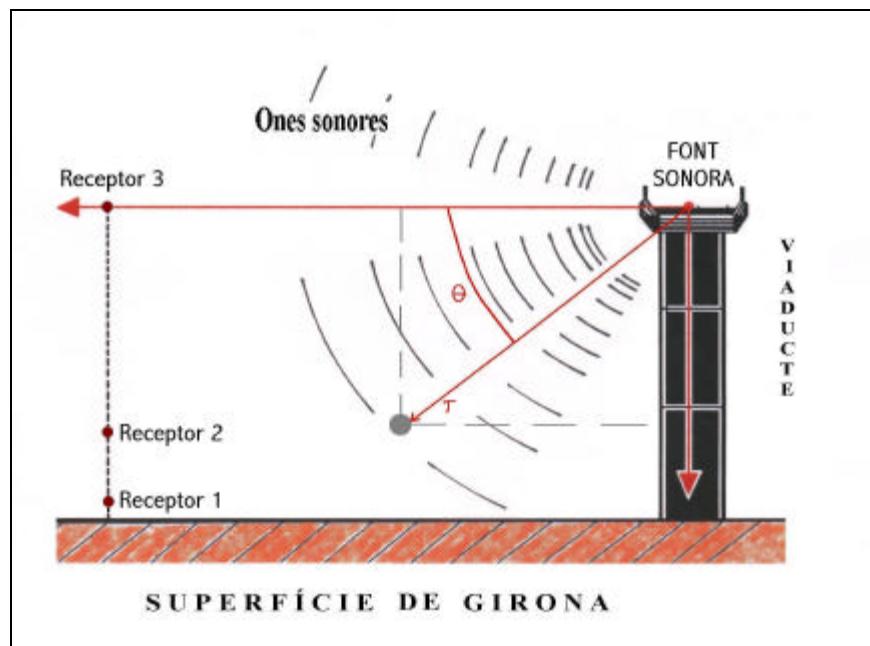


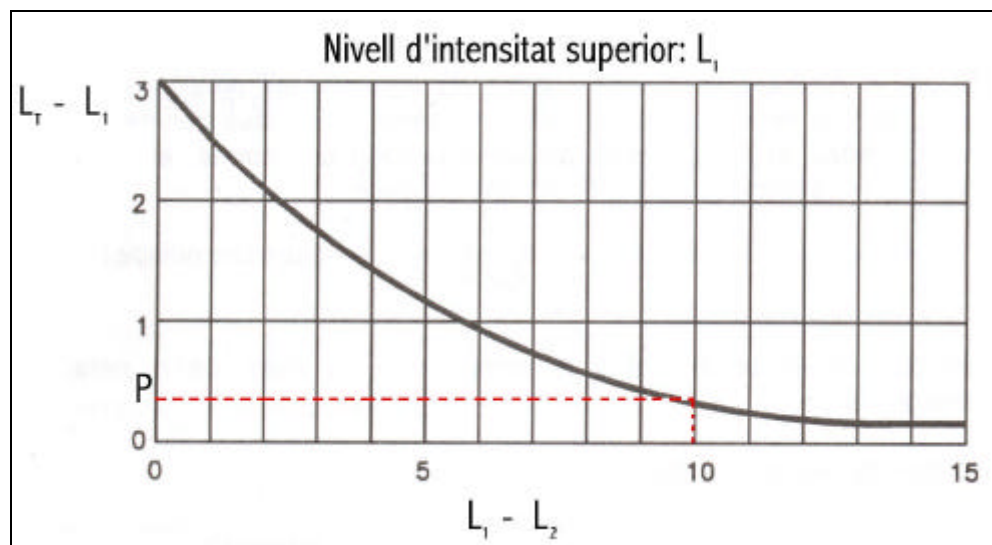
Figura 3.9.- Font sonora i receptors.

Aquesta il·lustració representa un tall transversal del viaducte per on passa el ferrocarril. Les mesures s'han enregistrat amb el següent objectiu: amidar únicament el soroll del tren amb una reflexió principal que incideix sobre el receptor. Després s'introdueixen les dades, en condicions similars a la realitat, en un programa acústic de simulació (SoundPLAN), la qual cosa permet estudiar el millor mètode per disminuir l'efecte de la fressa provocada pel ferrocarril. Els resultats obtinguts en la zona del carrer Bernat Tomàs Mieres es recullen en l'apèndix AC.

Cal tenir present que la coherència d'aquest mètode de treball es fonamenta en que les "mesures reals", enregistrades sobre el terreny, es facin en les mateixes condicions que les "mesures virtuals" calculades mitjançant una fórmula i que s'introdueixen posteriorment en el programa. Per aconseguir-ho s'han tingut en compte les següents consideracions:

- Les mesures corresponents a l'angle de 0° , que situa el receptor a la mateixa alçada que el carril del tren s'han pres en camp obert, per evitar la interferència d'altres fonts acústiques pròpies de la ciutat (vehicles, indústries, vianants ...), tenint cura però, que hi hagi una única reflexió predominant: la posterior, per la qual cosa sempre s'han pres les mesures amb un obstacle, generalment una paret, darrera

- Les dades obtingudes dins Girona, s'han calculat en llocs on l'ona sonora hi incideix directament i hi ha una paret darrera que la reflexa. Les mesures s'han enregistrat emprant nivells equivalents de 10 segons, $L_{Aeq, 10s}$. S'ha escollit aquest mètode de treball perquè el que es pretén, consisteix precisament, en calcular el nivell d'aquest soroll sobre la façana dels edificis. Així, s'aconsegueix registrar la màxima intensitat acústica, doncs el nivell de soroll augmenta quan el tren s'apropa i disminueix quan s'allunya.
- Aquestes mesures enregistrades dins la ciutat, corresponents a les alçades de 20 cm i 2'20 m (angles de 60° i 30°), també estan contaminades del soroll ambient. Per evitar aquesta dificultat s'han corregit les dades amb una corba de **composició de nivells**. Serveix per determinar el nivell total, L_T , quan interfereixen dos nivells de soroll diferents. Es calcula la diferència entre el nivell més alt, L_1 , i el més baix, L_2 . El valor de $L_1 - L_2$ es situa en l'eix d'abscisses del gràfic de la figura 2.2.3 al que li correspon el punt P de l'eix d'ordenades mitjançant la corba de composició.



Gràfic 3.6.- Corba de composició de nivells (dB).

El nivell d'intensitat total s'obté a partir de la relació: $L_T = L_1 + P$. En la ciutat de Girona i en les immediacions del viaducte del ferrocarril, el soroll ambient mig acostuma a ser d'uns 65 dB. Si amb el sonòmetre es mesura un nivell equivalent de 75 dB quan passa un tren i sense que interfereixin altres fonts sonores, llavors la diferència de nivells, $L_1 - L_2$ és de 10 dB. En la gràfica s'observa que a aquesta mesura li correspon un increment d'únicament uns 0,4 dB i el nivell total seria doncs de 75,4 dB. L'ordre de magnitud d'aquestes dades s'ha tingut en consideració per arrodonir els resultats de les mesures en les zones de la ciutat més sorolloses. Mitjançant aquesta gràfica s'obtenen els mateixos resultats que amb la fórmula de composició de nivells.

$$L_T = 10 \log \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} = 10 \log \left[10^{\frac{75}{10}} + 10^{\frac{65}{10}} \right] = 75,4 \text{ dB}$$

Una estimació de l'error absolut pot fer-se a partir de la màxima variabilitat que ens dona la gràfica: 3 dB. Aquesta desviació màxima correspondria a l'increment de soroll que cal afegir a un soroll de 65 dB si a l'ambient hi ha un nivell acústic de la mateixa intensitat. Així la cota màxima de l'error absolut associada al soroll ambient és: $\Delta A = 3 \text{ dB}$. Aquesta dada també es pot obtenir a partir de

$$L_T = 10 \log \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} = 10 \log \left[10^{\frac{65}{10}} + 10^{\frac{65}{10}} \right] = 65 + 3 \text{ dB} = 68 \text{ dB}$$

- Per calcular els angles, mitjançant la funció *arctangent*, s'ha pres com alçada mitjana de la via el valor de 6'5 metres. El corresponent càlcul d'errors mostrarà que l'error atribuïble a aquesta xifra és negligible a efectes pràctics. D'altra banda, l'error absolut associat a les variacions de la temperatura ambient s'ha determinat en el primer capítol

Càlcul de la pertorbació sonora

En aquest apartat es determinaran dues funcions matemàtiques que donen el valor de la pressió acústica produïda pel pas de diferents trens, en qualsevol punt de l'espai, diferenciant-los segons el valor de la pertorbació sonora: poc sorollosos (baixa intensitat) i molt sorollosos (alta intensitat). Per localitzar un punt en el pla s'utilitzen coordenades polars, on r és la distància radial i θ l'angle polar. L'origen de coordenades es situa en el carril del tren, l'eix horitzontal és paral·lel al pla del terreny i l'eix vertical és perpendicular al pla de terra. La pertorbació acústica es descriu mitjançant una funció del tipus:

$$F_{so}(r, \theta) = A + Br + C\theta \text{ (dB)}$$

Els coeficients A, B i C es determinaran a partir dels corresponents càlculs de regressió de les mesures d'intensitat enregistrades amb el sonòmetre. Tal com s'aprecia en la següent il·lustració les distàncies, r_i , són les longituds que separen la font sonora dels receptors, mentre que els angles, θ_i , representen els corresponents angles d'elevació.

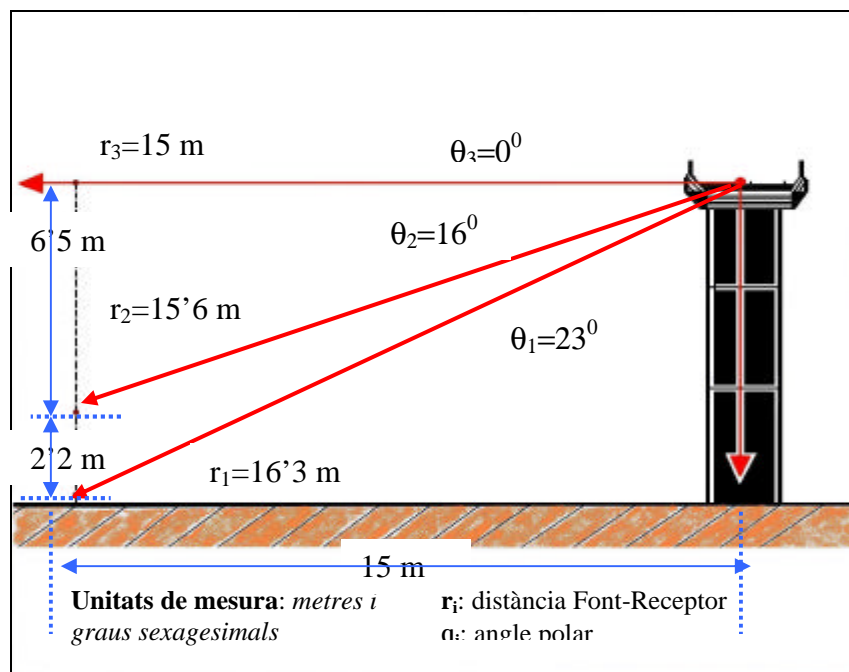


Figura 3.10.- Coordenades i mesures sobre el viaducte.

Els corresponents angles d'elevació per sota el pla horitzontal de la via (*mesurats en graus sexagesimals*) s'han calculat prenent les corresponents tangents, considerades com la raó entre la distància a la vertical de la via i l'altura del punt de mesura on es col·loca el sonòmetre. Els angles, doncs, poden calcular-se a partir de la funció inversa d'aquesta relació.

$$q = \arctg \left[\frac{\text{Distància a la via}}{\text{Altura de la via} - \text{Alçada del sonometre}} \right]$$

En aquesta figura s’observa també que la distància (metres) que hi ha entre el focus de soroll i el punt de mesura on es situa el sonòmetre és la hipotenusa del triangle rectangle que té per catets la distància entre les verticals a la via i l’aparell de mesura, i les respectives diferències d’alçada.

$$r = \sqrt{(\text{distància a la via})^2 + (\text{Altura de la via} - \text{alçada del sonometre})^2}$$

Mitjançant el paquet estadístic (SPSS) s’ha calculat la corba de regressió que millor s’ajusta a aquestes dades. Seguidament es detallen els fonaments matemàtics que possibiliten l’ajust d’una funció a unes dades experimentals pel mètode dels mínims quadrats.

Mètode dels mínims quadrats

A partir d’unes dades experimentals, y_i , ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) es construeix una funció matemàtica de la forma: $\Psi(x_i, a, b, c, \dots) = a + bx_1 + cx_2 + \dots$, de manera que hi ha una correspondència entre les dades x_i i els valors, y_i , obtinguts experimentalment. Llavors es considera la suma dels quadrats de les diferències entre aquests valors i la funció:

$$S(a, b, c, \dots) = \sum_{i=1}^n [y_i - \Psi(x_i, a, b, c, \dots)]^2$$

S’escull els paràmetres a, b, c, \dots de manera que aquesta suma tingui un valor mínim. En virtut del teorema matemàtic que ens diu que existeix un extrem d’una funció quan s’anul·la el valor de la derivada, els mínims d’aquesta funció s’obtinran resolent el sistema d’equacions format per les derivades parcials respecte a cadascun dels paràmetres.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial c} = 0 \\ \dots \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n [y_i - \Psi(x_i, a, b, c, \dots)] \frac{\partial \Psi(x_i, a, b, c, \dots)}{\partial a} = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - \Psi(x_i, a, b, c, \dots)] \frac{\partial \Psi(x_i, a, b, c, \dots)}{\partial b} = 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - \Psi(x_i, a, b, c, \dots)] \frac{\partial \Psi(x_i, a, b, c, \dots)}{\partial c} = 0 \\ \dots \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

En aquest cas la pertorbació sonora es descriu mitjançant una funció de dues variables: r i θ , com:

$$\Psi(r, \theta) = A + Br + C\theta$$

Així, cal resoldre un sistema similar al descrit en l’equació (3.1) respecte a cadascun dels paràmetres; A, B, C . Aquest mètode s’emprarà amb dades diferents dues vegades, doncs els trens es divideixen en dos grans grups atenent a la pertorbació acústica: baixa intensitat (poc sorollosos) i alta intensitat (molt sorollosos). Els ferrocarrils que s’inclouen en cadascuna d’aquestes categories, però, tenen un rang de valors similars pel que fa al soroll que generen i

s'han tractat conjuntament. En l'apèndix F hi ha una relació del nombre i tipus de trens que passen per Girona durant un dia.

Trens de baixa intensitat sonora

Concretament aquestes mesures s'han pres sobre un tren tipus REGIONAL, malgrat que són representatives d'altres tipus com el DELTA, els TALGO (*Catalán i mare nostrum*) i els ARCO (Apèndix F). Els valors obtinguts s'il·lustren en la següent figura.

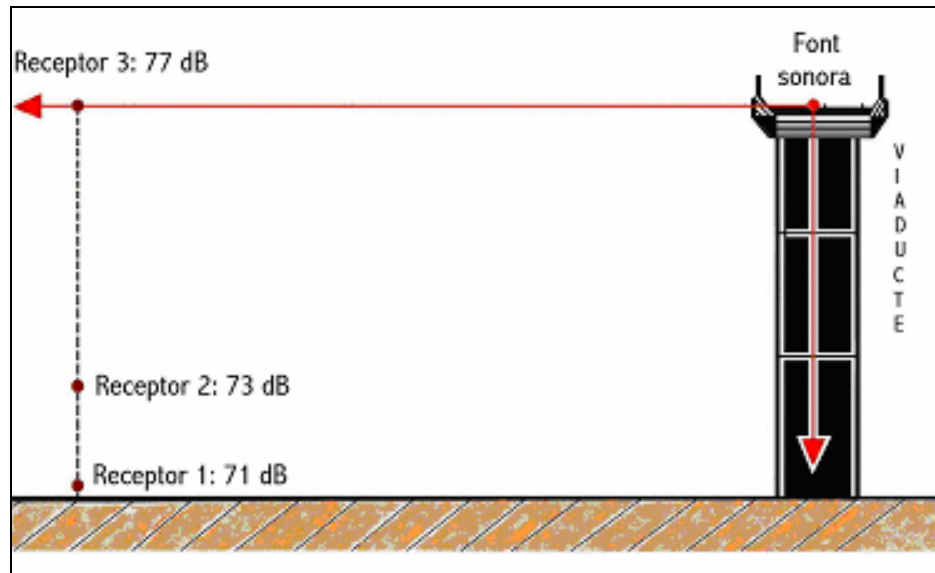


Figura 3.11.- Nivells d'intensitat enregistrats en cada posició.

A partir de les relacions trigonomètriques descrites abans poden calcular-se les respectives distàncies i els corresponents angles d'elevació. Els resultats obtinguts es reflecteixen en la següent taula:

dB (decibelis)	r (metres)	q (graus sexagesimals)
71 dB	$r_1 = 16'3 \text{ m}$	$\theta_1 = 23^\circ$
73 dB	$r_2 = 15'6 \text{ m}$	$\theta_2 = 16^\circ$
77 dB	$r_3 = 15 \text{ m}$	$\theta_3 = 0^\circ$

Taula 3.2.- Nivells de soroll mesurats a diferent distància i angle d'elevació.

Ara, emprant el programa estadístic, pot calcular-se la corba que millor s'ajusta a aquestes dades, obtenint una funció de soroll, que ens dona la mesura de la pressió acústica (dB) en funció de la distància, r, i l'angle d'elevació, θ . El càlcul d'aquest polinomi interpolador es realitza a partir dels valors mitjos del soroll (10 mesures en cada punt).

$$f_{sol}(r, q) = 85'571 - 0'571r - 0'229q$$

S'observa que els gradients de pressió acústica en funció de la distància, r, i l'angle d'elevació, θ , són:

$$\frac{\ln f_{so}}{\ln r} = -0'571$$

$$\frac{\ln f_{so}}{\ln q} = -0'229$$

Els signes negatius d'aquests coeficients ens indiquen que la intensitat de l'ona disminueix a mesura que ens allunyem del focus de soroll. Això és degut a la pèrdua d'energia i als diferents fenòmens de refracció que experimenten les ones sonores amb el terra, vent, altres ones sonores... També s'observa que la intensitat és menor a mesura que ens apropem al terra i ens allunyem del pla de la via, perquè el formigó del pont provoca un efecte d'apantallament que esmorteix les ones sonores tal com s'il·lustra en aquest dibuix.

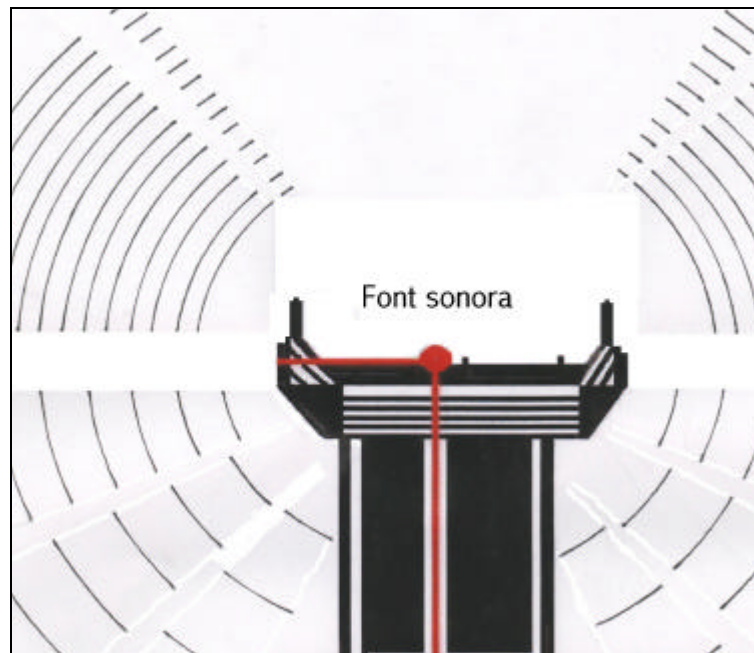


Figura.- 3.12.- Esmorteïment d'ones sonores en l'estructura del viaducte.

L'atenuació del formigó és força elevada, doncs la seva densitat és d'uns 2600 Kg/m³ i la velocitat de fase de les ones dins aquest material és de 3100 m/s. Així, la seva impedància acústica és de l'ordre de 8·10⁶ rayls i el coeficient de transmissió, α_t , és gairebé nul, la qual cosa significa que es transmet només una petita fracció de l'energia. Experimentalment, s'ha comprovat que aquesta funció de so descriu força bé el soroll produït per aquest tipus de trens a distàncies properes a la via (fins 25 m). Si el punt de mesura es col·loca més lluny, llavors, és millor emprar una altra fórmula obtinguda a partir de noves dades.

dB (decibelis)	r (metres)
65 dB	50 m
60 dB	70 m

Taula 3.3.- Nivells acústics mesurats a llargues distàncies.

Aquí, la variació del so azimuthal deguda a l'elevació és negligible en el nostre rang de valors. En aquest cas, doncs, la funció de so només depèn de la distància, r, i emprant la tècnica de regressió lineal a partir d'aquestes dades s'obté:

$$f_{so2}(r) = 77'5 - 0'25r$$

Ara, agrupant les dues funcions: f_{so1} i f_{so2} , podem construir una funció bivaluada, $f_{so}(r, \theta)$, que descriu el soroll produït per aquests tipus de trens.

$$f_{so}(r, \mathbf{q}) = \begin{cases} 85'571 - 0'571r - 0'229\mathbf{q} & r < 25'1m ; 0 \leq \mathbf{q} \leq 90^\circ \\ 77'5 - 0'25r & r \geq 25'1m \end{cases} \quad (3.2)$$

Aquestes “mesures virtuals” calculades mitjançant la fórmula es poden aplicar al model, si i només si, s’introdueixen en punts l’entorn dels quals té unes condicions similars a les que hi havia quan s’han pres les “mesures reals”.

Càlcul d’errors

Aquesta fórmula s’ha obtingut a partir de tres mesures experimentals: dues directes (*la pressió sonora i la distància*) i una indirecta (*la mesura angular*). Pel que fa al càlcul de la intensitat, mesurada directament amb el sondòmetre, s’ha estimat que la influència de les condicions ambientals (temperatura principalment) pot provocar una desviació de $\pm 0'22$ dB. A aquest error experimental, però, cal afegir-hi l’error comès en el càlcul de la funció de so, $f_{so}(r, \theta)$.

Quan una funció, $f(x, y, \dots, z)$, depèn de diverses variables, i es sap l’error absolut de cadascuna: $\Delta x, \Delta y, \dots, \Delta z$, es pot conèixer també l’error fet en el càlcul d’aquesta funció, doncs si aquests increments són petits, emprant les propietats del càlcul infinitesimal i la definició de diferencial total d’una funció podem expressar l’error absolut com:

$$\Delta f = f(x + \Delta x, y + \Delta y, \dots, z + \Delta z) - f(x, y, \dots, z) \approx \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \dots + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z$$

Es considera que l’error associat a la mesura de la distància és: $\Delta r = \pm 1$ m. Aquesta estimació és força gran, doncs amb els mitjans tècnics que es disposaven (*cinta mètrica i transportador d’angles*), ha resultat difícil determinar amb precisió les distàncies i alçades dins els carrers de la ciutat.

L’angle d’elevació, però, s’ha calculat a partir d’una relació trigonomètrica entre dues distàncies: l’alçada del receptor, h , i la distància, d , entre les verticals a la via i el mateix receptor. Així podem saber l’error absolut, $\Delta \theta$, associat a aquesta mesura emprant la regla de derivació d’una funció composta.

$$\begin{aligned} \text{Si } f(\mathbf{q}) = \arctg\left[\frac{h}{d}\right] &\Rightarrow \Delta \mathbf{q} = \left| \frac{\partial f}{\partial h} \right| |\Delta h| + \left| \frac{\partial f}{\partial d} \right| |\Delta d| = \\ \left| \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2} \right| \left| \frac{\partial}{\partial h} \left[\frac{h}{d} \right] \right| |\Delta h| + \left| \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2} \right| \left| \frac{\partial}{\partial d} \left[\frac{h}{d} \right] \right| |\Delta d| &= \left| \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2} \right| \left| \left[\frac{1}{d} \right] \right| |\Delta h| + \left| \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{d}\right)^2} \right| \left| \left[-\frac{h}{d^2} \right] \right| |\Delta d| \end{aligned}$$

Les barres verticals, $| |$, simbolitzen el valor absolut.

La distància, d , té un valor fix: 15 m, mentre que l’alçada dels receptors és variable. L’elecció d’aquesta dada, però, gairebé no afecta a l’ordre de magnitud dels càlculs, així doncs, hom pot escollir com a valor representatiu l’alçada del segon receptor, $h = 2'2$ m, sense pèrdua de generalitat. L’error associat a la mesura de les longituds és: $\Delta d = \Delta h = 1$ m, llavors substituint

aquestes dades en l'anterior desenvolupament resulta que l'error absolut de la mesura angular és aproximadament:

$$\Delta q = \left| \frac{1}{1 + \left(\frac{2'2}{15}\right)^2} \left| \left[\frac{1}{15} \right] \cdot 1 \right| + \frac{1}{1 + \left(\frac{2'2}{15}\right)^2} \left| \left[+ \frac{2'2}{15^2} \right] \cdot 1 \right| \right| \approx \pm 0'07^\circ$$

Així, coneguts els errors de cadascuna d'aquestes variables pot determinar-se l'error associat a

$$f_{so}(r, q) = 85'571 - 0'571r - 0'229q$$

emprant el desenvolupament del diferencial total a partir de les derivades parcials d'aquesta funció:

$$\Delta f_{so} = \left| \frac{f_{so}}{r} \right| |\Delta r| + \left| \frac{f_{so}}{q} \right| |\Delta q| = (+0'571) \cdot 1 + (+0'229) \cdot 0'07 \approx 0'6 \text{ dB}$$

Ara s'està en condicions de calcular l'error absolut total, Δe , a partir de la suma dels respectius errors absoluts: canvis de temperatura, ΔT , el soroll ambient generat principalment pel trànsit, ΔA , i la incertesa associada al càlcul de la funció de soroll, Δf_{so} .

$$\Delta e = \Delta T + \Delta A + \Delta f_{so} \approx \pm 3'9 \text{ dB}$$

aquest marge d'error és vàlid també pels trens més sorollosos, l'explicació dels quals es detalla seguidament.

Trens d'alta intensitat sonora

Amb un estudi similar a l'anterior podem trobar una funció de so que descriu el soroll fet per trens més ràpids i pesats com el CATALUNYA EXPRES. Altres tipus de ferrocarrils que es poden incloure dins aquesta categoria són el COSTA BRAVA i els MERCADERIES. Les dades obtingudes ara són:

dB (decibelis)	r (metres)	q (graus sexagesimals)
81 dB	$r_1 = 16'3 \text{ m}$	$\theta_1 = 23^\circ$
82 dB	$r_2 = 15'6 \text{ m}$	$\theta_2 = 16^\circ$
84 dB	$r_3 = 15 \text{ m}$	$\theta_3 = 0^\circ$

Taula 3.4.- Nivells acústics corresponents als trens més sorollosos.

on s'aprecia que, lògicament, el rang de valors dels decibels és major. Aplicant les tècniques de regressió descrites abans, s'obté que la funció de so per aquests tipus de ferrocarrils és ara:

$$F_{so}(r, q) = 88'286 - 0'286r - 0'114q \tag{3.3}$$

S'ha comprovat experimentalment que aquesta fórmula descriu força bé el soroll a qualsevol distància, r , i angle d'elevació, θ . Això és degut a que els gradients respecte a les variables dependents són menors i la funció té un comportament més "suau", que li permet ajustar-se

millor a les dades experimentals obtingudes. Tal com s'aprecia en la fórmula els valors d'aquests gradients són:

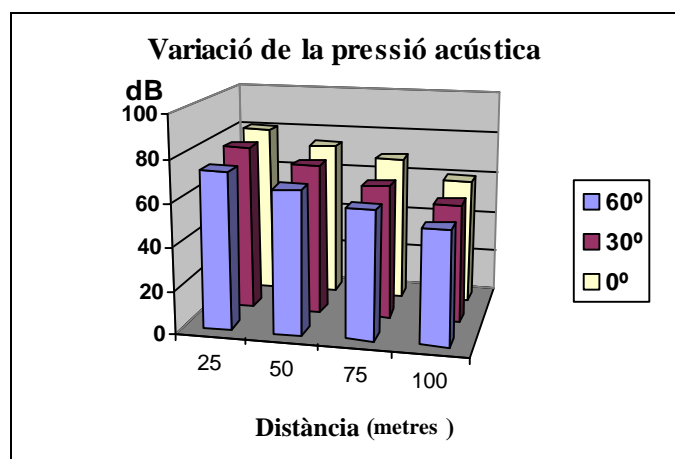
$$\frac{\partial F_{so}}{\partial r} = -0'286$$

$$\frac{\partial F_{so}}{\partial q} = -0'114$$

Les conclusions generals de l'impacte de la pertorbació sonora provocada pel pas del ferrocarril són:

- Màxima al nivell de la via: 0°, doncs no hi ha l'efecte d'apantallament provocat per les parets del viaducte.
- Aquest nivell màxim es manté fins, aproximadament, un angle de 60° per sobre el pla de la via. S'ha comprovat experimentalment que el valor de la intensitat disminueix per angles superiors, doncs la font sonora està situada en les rodes i la mateixa estructura del tren les esmorteix quan es propaguen en direccions properes a la vertical.
- Disminueix a mesura que ens situem sota el pla de la via, doncs el material del pont per on passa el tren atenua la intensitat de l'ona sonora.

Aquesta funció, F_{so} , descriu el soroll produït pels trens més sorollosos quan passen per la ciutat. En la gràfica que s'exposa a continuació s'observa el seu comportament, per cadascun dels tres angles, quan ens allunyem del focus de la pertorbació. S'aprecia que els màxims valors s'enregistren quan la direcció de propagació és horitzontal, mentre que disminueixen a mesura que l'angle augmenta degut a la resistència que hi oposa el formigó.



Gràfic 3.7.- Gràfica dels nivells sonors corresponents a la funció sonora $F_{so}(r, \theta)$.

Els valors que s'agafen s'indiquen en l'anterior gràfica on l'origen correspon al focus de la pertorbació acústica (*via del tren*) i l'abast de la funció a una distància de 82 metres corresponent a una pressió acústica de 65 dB, que és el nivell d'intensitat acústica recomanat per l'OMS en una ciutat. Posteriorment es realitzarà un anàlisi conjunt de la pertorbació acústica provocada pel ferrocarril i el trànsit viari conjuntament. Aquests resultats coincideixen amb els enregistrats per Xavier Riera, en l'estudi "Caracterització acústica de trens".

3.2.2.-Soroll en un ferrocarril urbà

Aquest apartat és un resum de l'article escrit per B.M. Fitzgerald a la revista *Journal of Sound and Vibration* l'any 1996.

Mesures de control de soroll en ferrocarrils urbans

Les mesures de control i prevenció del soroll han estat desenvolupades per la companyia *Docklands Light Railway* (DLR) i aplicades als ferrocarrils que recorren la zona de London Docklands des del 1987. Aquests trens estan formats per vagons articulats amb una capacitat màxima de 400 passatgers i circulen a una velocitat mitjana de 80 km/h. La xarxa del ferrocarril està controlada per un sistema automàtic d'ordinadors mitjançant una matriu de blocs fixes. Tot seguit, es comenten les diferents zones on s'han pres mesures correctores i els resultats que s'han obtingut.

Trajecte des de Limehouse Cut Bridge fins Teviot Estate

Malgrat que aquests vehicles no són especialment sorollosos, el seu trajecte passa a través d'edificis alts i prop de les façanes, fet que genera nivells d'intensitat acústica i vibracions molt elevats. En els llocs on el soroll sobrepasa els nivells de la taula (3.2), la companyia DLR s'ha vist obligada a instal·lar, en els habitatges afectats, finestres amb doble vidre i sistemes mecànics de ventilació.

	PERÍODES		CAMP LLIURE L_{EQ} DB(A)
	Àrees residencials	Dia	07:00-19:00	60
Tarda		19:00-23:00	55
Nit		23:00-17:00	50
Àrees comercials Escoles	Dia	07:00-19:00	60
	Dia	07:00-19:00	60

Taula 3.5.- Nivells de soroll màxims tolerats pel ferrocarril *DLR*.

Després d'eliminar d'altres opcions es va optar per aixecar panells absorbents sustentats per bigues d'acer en ambdós costats de la via en les àrees més afectades. La longitud total d'aquesta obra fou de 200 m amb una alçada que oscil·la entre els 2'5 i els 3'5 metres. Mesures posteriors han demostrat que, en terme mig, s'aprecia una reducció del nivell de soroll de 16'7 dBA

Ruta de l'oest

Aquesta línia, que passa per les estacions de Westferry, és força diferent que l'anterior. Es caracteritza per haver-hi força arcs construïts amb maons així com ponts sustentats per bigues paral·leles. El veïnat és eminentment residencial amb edificis de cinc i sis plantes construïts al costat de la via fèrria. En alguns casos crítics es troben a només 5 metres de distància de la via, en llocs on la velocitat del tren pot arribar fins els 65 km/h. Els estudis fets en els simuladors acústics van mostrar que s'obtidrien resultats òptims si es col·locaven 260 metres de barrera acústica de forma discontinua i una alçada màxima de 2'5 metres. El material utilitzat fou un revestiment de metall pintat amb tonalitats de grisos per minimitzar l'impacte ambiental. A

l'igual que en l'altre zona aquestes barreres foren construïdes amb mòduls completament desmuntables per facilitar la construcció de vies d'accés i evacuació.

En aquest sentit, també s'han construït plataformes elevades al costat de la via. L'eficiència d'aquests panells, però, ha resultat ser sensiblement inferior als de l'altra zona, ja que en les mesures enregistrades només s'aprecia una reducció mitjana del nivell acústic de 11'5 dBA.

Conclusions

El soroll que generen els ferrocarrils ha passat a ser un dels majors problemes al que s'enfronten les companyies ferroviàries. A partir d'aquestes obres, i els resultats obtinguts, sembla ser que la construcció de barreres acústiques absorbents en les immediacions de la via fèrria constitueix la millor opció per a disminuir la intensitat del soroll que generen els ferrocarrils. De les enquestes fetes posteriorment es desprèn que el grau de satisfacció experimentat pels veïns afectats és força elevat.

3.2.3.-Principis d'una política acústica pels ferrocarrils de l'UE

Les directrius i recomanacions que es recullen en aquest apartat han estat publicades per C. Gore a la revista *Journal of Sound and Vibration* l'any 1996.

Soroll del ferrocarril: Principis rectors per la política de la Unió Europea

El principi sobre el que la Community of European Railways (CER) vol fonamentar la política acústica dels ferrocarrils consisteixen bàsicament en que cal fer una distinció clara entre la font generadora de soroll i els receptors.

Pel que fa als receptors, les potencials fonts de soroll que poden generar molèsties i angoixes són diverses i de natura molt diferent: lladrucs de gossos, nens cridant, trets, trons, motocicletes accelerant, sirenes, ... la llista esdevé infinita. Possiblement, la conseqüència més significativa d'aquesta gran varietat de fonts sonores sigui que, fins ara, les polítiques han estat orientades a suprimir focus de soroll específics més que a proveir garanties per evitar que cap persona pugui estar exposada a intensitats que sobrepassin un determinat nivell màxim (aquesta observació no és aplicable al soroll generat en els llocs de treball, subjectes a particulars regulacions de salut i seguretat). Aquest nou punt de vista per mitigar l'angoixa generada pels nivells excessivament alts de soroll presenta unes característiques força particulars en situacions concretes, algunes són:

- L'excessiu soroll, que pogués generar una comunitat de veïns o un determinat grup de persones, cal que es reculli en la corresponent normativa de la legislació local.
- Els altíssims nivells acústics que es generen en les immediacions dels aeroports.
- El fortíssim soroll que prové d'una carretera o autopista amb un elevat flux de trànsit.

Malgrat que aquests focus sonors són el resultat de la suma de diverses fonts individuals, que aïlladament no representarien una molèstia molt important, l'efecte simultani de totes aquestes ones, sumant les respectives intensitats, provoquen nivells totals molt alts que, fins i tot, poden sobrepassar el llindar de dolor humà (uns 123 dB) en els casos més extrems. Així, aquests pertorbacions acústiques s'estudien mitjançant els nivells equivalents, L_{Aeq} , que està relacionat

amb l'energia que transporta l'ona i es calcula a partir de l'arrel quadrada de la mitjana temporal de la pressió sonora instantània, p_{inst} , elevada al quadrat.

$$L_{Aeq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p_{inst}^2(t) dt}$$

Sovint, les persones o edificis afectats per nivells acústics massa alts es veuen obligats a prendre mesures protectores per reduir aquest soroll que, habitualment, es concreten en la construcció de barreres acústiques que reflecteixen o absorbeixen les ones sonores. Hi ha cops, que degut a l'elevat tràfic de vehicles, aquestes mesures són insuficients, per la qual cosa cal començar a pensar en la creació i aplicació d'una legislació que reguli els nivells d'emissió dels diferents mitjans de transport. No hi ha dubte que una línia d'actuació orientada en aquest sentit, fora molt més eficaç globalment que la situació actual, on cal resoldre el problema puntualment i sovint amb un cost elevat.

Un corol·lari important a aquest principi general s'esdevé de la distinció que cal fer entre la normativa aplicable a les noves infraestructures i la que regula les construccions ja existents. Quan els estudis medioambientals mostren que els nivells de soroll generats per una nova carretera, un aeroport o una via fèrria, superen els nivells tolerables en una determinada zona, cal considerar les obres necessàries per reduir els nivells d'emissió dins els límits admissibles i el material addicional que se'n derivi com part del cost total del projecte.

Pel que fa a obres ja existents, la solució de les quals no és viable a curt termini, i el soroll que generen que afecta una àmplia àrea amb habitatges o zones de vianants, fóra desitjable que la comunitat es fes càrrec del cost que suposaria la construcció de mesures preventives per mitigar-ne els seus efectes i que cap veí, per pròpia iniciativa, hagués de suportar el cost que suposaria la implantació d'una barrera protectora exclusiva per la seva propietat.

Actualment hi ha un nombre considerable d'estudis empírics que reflecteixen amb claredat que la sensació de molèstia generada pel soroll del ferrocarril, per un nivell equivalent de L_{Aeq} , és menor que la corresponent al tràfic rodat. Aquesta variació en la percepció sembla estar relacionada amb el caràcter intermitent del soroll del ferrocarril, degut al llarg període temporal que acostuma a haver-hi entre el pas de dos trens successius, en contraposició a la fressa contínua característica d'una carretera. Aquest fet es comprova en base a que molts estudis realitzats demostren que la sensació de molèstia que provoca una carretera i una via fèrria estan en un nivell similar quan el L_{Aeq} que correspon al soroll del tren és 5 dB(A) superior que el soroll de la carretera.

Qualsevol política referent a la percepció del soroll, cal que estigui fonamentada en consideracions relatives als nivells d'angoixa que es consideren inacceptables. En aquest context és primordial reconèixer les variacions dels estils de vida i les preferències socials entre els diferents estats membres de la UE. Aquestes diferències poden ser considerables; per exemple, qualsevol definició dels nivells de soroll nocturn permesos en els països del nord d'Europa serien excessius en les àrees urbanes d'Espanya, això és un reflex del diferent ritme de vida que els espanyols porten durant el dia. Cal tenir present que aquest principi de subsidiària és la principal clau per desenvolupar polítiques efectives relatives a la recepció del soroll. L'aplicació d'aquest principi cal que estigui subjecte als següents punts comuns:

- Considerar tots els mitjans de transport com una potencial font d'alts nivells de soroll i, conseqüentment, de molèstia i preocupació.

- Mètodes comuns de mesura en tots els països. Actualment, però, sembla que s'ha generalitzat l'ús dels nivells equivalents, L_{Aeq} .
- Tenir consciència que per un mateix nivell de soroll equivalent, L_{Aeq} , la sensació de molèstia que provoca el ferrocarril és superior a la que prové de les carreteres, degut a la natura intermitent de la pertorbació acústica pròpia d'un tram de via fèrria.

Quan es mesuren els nivells equivalents, cal tenir en compte que els valors mitjos que s'obtenen de la intensitat acústica depenen de varis factors associats amb la recepció de l'ona sonora entre els quals destaquen la distància a la font sonora, el nivell de la via en comparació al terreny circumdant, la presència de barreres acústiques i la posició de l'aparell de mesura (sonòmetre). Paral·lelament, hi ha una sèrie de paràmetres associats a la creació del soroll, entre els que s'inclouen el nombre de trens, la velocitat, les particulars característiques del soroll que generen i l'estat de la via fèrria.

La creació del soroll

Malgrat que reduir el nivell del so que es rep és el principal objectiu de qualsevol política acústica, incidir sobre la legislació que regula els "estàndards" sobre els que es basa el disseny i la construcció dels diferents mitjans de transport, té, sens dubte, un paper transcendental. Aquesta perspectiva focalitzada en la subsidència, mitjançant la qual es vol incidir sobre els focus generadors del soroll no és contrària, en absolut, a aquelles polítiques orientades a reduir els nivells en els punts receptors. Són dues visions perfectament complementàries que, sovint, cal aplicar conjuntament. En obres de gran envergadura, com aeroports o autopistes amb un trànsit importat, és fa difícil, a curt termini, incidir sobre els focus de soroll degut a la gran despesa econòmica que això suposaria i també per les nostres limitacions tecnològiques. En aquests casos extrems, és imprescindible la construcció de barreres i pantalles acústiques que n'esmorteeixin la intensitat. Cal potenciar, però, el desenvolupament i la construcció de mitjans de transport, menys sorollosos, que en un futur proper facin innecessàries la construcció de mesures protectores, sempre costoses.

Per escollir uns "estàndards" aplicables a tot el territori de la Unió Europea, cal que l'eix vertebrador dels criteris que s'adoptin es fonamenti en els nivells d'energia permesos. Els mètodes de mesura vàlids per enregistrar aquesta variable són el nivell equivalent, L_{Aeq} , i el nivell màxim, L_{Amax} , mesurats durant l'interval de temps que el tren passa per davant la vertical de l'aparell de mesura respecte la via.

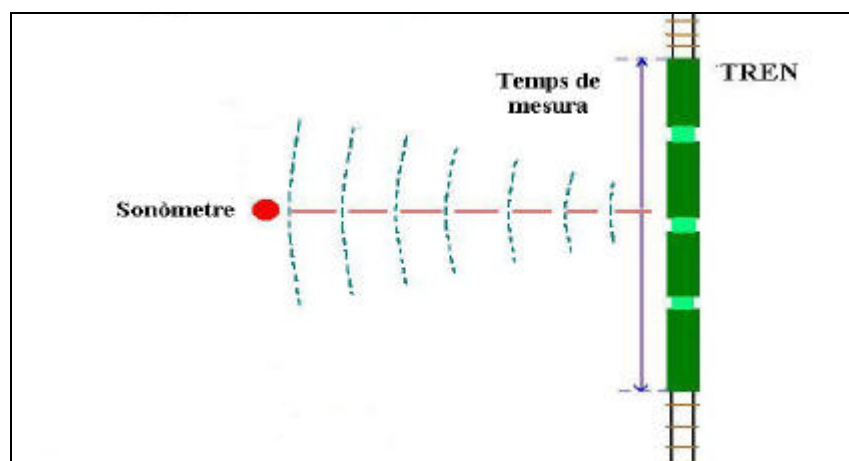


Figura 3.12.- Posició i interval de mesura del sonòmetre

Quan s'estableixi el límit del nivell màxim permisible, L_{Amax} , cal tenir present que el soroll és generat per un sistema que consta de dues parts: els vehicles i les infraestructures de la via. Així, per homologar els vehicles, esdevé essencial definir i acotar els paràmetres als que s'han d'ajustar aquestes infraestructures, doncs l'ona sonora generada en trams de via que no compleixin les especificacions prèvies pot resultar presentar unes característiques i una intensitat força diferent.

Reconstruir i adaptar a la nova reglamentació les màquines i instal·lacions ja existents que s'ajustin als nous requeriments pot representar una despesa massa gran, per aquest motiu és recomanable que els nous "estàndards" només s'apliquin a les locomotores i els vagons de nova construcció. Les investigacions que es realitzen en aquest camp, tindran, sens dubte, un paper fonamental en la concreció d'aquestes fites. La construcció de motors menys sorollosos, la recerca de noves fonts d'energia i el desenvolupament de nous materials tindran sens dubte un paper fonamental en aquest camp.

3.2.4.-Instruments legals i econòmics per prevenir el soroll dels trens

L'impacte del soroll sobre la població es un dels majors problemes ambientals als que s'enfronten els ferrocarrils de la Unió Europea. Solucions tècniques són possibles a un cost acceptable. Tanmateix, però, les companyies fèrries europees rarament empren aquestes solucions. Per la ràpida introducció de vagons i màquines que generin uns baixos nivells de soroll s'han de poder emprar i aplicar instruments legals i econòmics que facin possible la seva implantació. En aquest sentit, sens dubte, una de les polítiques més efectives fora la implantació efectiva d'un ambiciós projecte de la UE: fixar cotes màximes als límits d'emissió dels vehicles. Evidentment, aquestes mesures correctores han d'estar recolzades per multes o sancions econòmiques de caire preventiu que en recolzin el seu compliment. Algunes de les solucions innovadores i motivades per aquestes noves polítiques ambientals són:

- La "Look 2000" és la locomotora més silenciosa del mercat, amb una reducció de potència sonora respecte a les màquines convencionals que oscil·la entre els 7 i els 14 dB (A).
- El nou model de tren, "S", construït a Copenhagen, amb el que s'aconsegueix una reducció d'uns 7 dB(A).
- L'ús de vagons amb uns baixos nivells d'emissió sonora. Això s'aconsegueix substituint peces formades per grans blocs de metall (fins a 9 dB(A)) o emprant discs frakes de frenada, amb la qual cosa es poden aconseguir reducció dels nivells acústics de fins a 20 dB(A).

És important esmentar que la majoria de vehicles utilitzats actualment generen uns nivells d'emissió força alts i la seva llarga vida mitja en dificulta la substitució. És precisament en aquesta línia on han d'incidir les polítiques legals i econòmiques, bé implantant forts impostos pels infractors, bé subvencionant als països i les empreses respectuoses amb aquesta política. En un marc global, i concretament en la UE, cal que la construcció de vehicles amb baixos nivells d'emissió acústica es faci viable i real en tot el territori. Degut al caràcter internacional dels transport, segur que aquestes polítiques preventives són molt més efectives que d'altres on es contemplin únicament mesures de caire corrector o coercitiu.

Així, les mesures orientades a disminuir la intensitat del soroll generat per la font sonora són les que han de guiar als governs i als fabricants per aconseguir una producció, amb un cost raonable, de mitjans de transport respectuosos amb el confort acústic i ambiental dels països. D'acord amb aquesta política, l'any 1970 es va crear a la UE la primera legislació que regulava els nivells d'emissió acústics generats pel tràfic rodat. Des d'aquesta data, i d'una manera

progressiva, s'han estat reduint els nivells d'emissió permesos fins a uns 11 dB(A) des d'aleshores. Pel que fa al ferrocarril, la primera proposta seriosa de la Unió Europea per limitar-ne el soroll generat fou proposada el 1983. En un principi es va senyalar l'absència d'efectivitat d'aquesta proposta per la seva manca de validesa en els països fora de la UE, però amb la progressiva adhesió de més països aquest argument ha anat perdent força.

Per aquestes raons sembla clar que els reglaments que regulen els límits d'emissió de soroll són el millor camí per aconseguir fites significatives. Així ho han entès els Ministres Europeus de Medi ambient i Transport, qui en la conferència de Viena del 1997, recollen en el *Paper Verd de la Comissió Europea sobre la Futura Política de Soroll* una sèrie de propostes i iniciatives per adoptar uns "estàndards" internacionals que regulin el soroll i també l'emissió de gasos contaminants. La resolució d'aquesta proposta va tenir lloc el maig del mateix any en la conferència de La Haya, on s'establia que si no es comprometien a treballar amb uns baixos límits d'emissió sonora, no es permetria a cap organització invertir en tecnologies silencioses.

L'any 1998 va tenir lloc una altra conferència de la Comissió Europea sobre la Futura Política de Soroll. Contràriament al programa original, el soroll generat pel ferrocarril no fou un tòpic d'aquesta conferència, la qual cosa fou molt criticada. Per solucionar aquesta manca, darrerament, s'han creat Grups de Treball per establir una regulació vàlida i coherent amb la major rapidesa possible. És clar que l'enduriment de les lleis que regulen els límits d'emissió han d'estar acompanyades per incentius que premiïn l'ús de vehicles silenciosos, doncs cal que facin suport a la fabricació de mitjans de transport més silenciosos, abans que es facin vigents les noves regulacions. També poden estimular a les companyies de fora la UE a implementar mètodes de reducció de soroll pels vehicles que s'introdueixin dins el territori. Així mateix, poden esdevenir un lligam important entre les companyies d'infraestructures i transports ja que, per exemple, les dues poden estar interessades en promoure l'ús de vehicles amb baixes emissions de soroll per evitar despeses en finestres insonoritzades i d'altres tipus de barreres acústiques.

Cal dir, però, que l'incentiu més important amb diferència consisteix en reduir els impostos als vehicles que circulin respectant els límits establerts pels nous nivells d'emissió. En aquest sentit, una combinació apropiada de regulacions i incentius poden ser efectiva per aconseguir una reducció dels nivells de soroll emesos pels ferrocarrils. El fort impacte acústic que produeix sobre la població aquest mitjà de transport juntament amb el tràfic rodat dels vehicles pesats acceleren la ràpida implantació d'aquestes mesures correctores per part de les institucions governamentals.

3.3.- EFECTES DEL SOROLL

3.3.1.- Els efectes del soroll

Introducció

Avui en dia, es un fet ben establert que el soroll és una greu font d'efectes físics i psíquics perjudicials pels éssers humans. Avaluar-los d'una manera clara i objectiva és, sens dubte, una tasca difícil i potser gairebé impossible, doncs cal tenir en compte que aquests efectes depenen en última instància de l'estat fisiològic i psicològic del subjecte. Es poden establir, però, criteris generals aplicables a la gran majoria i que han estat comprovats i validats en infinitat d'ocasions. Davant la gravetat que planteja aquest problema cada cinc anys es celebra un Congrés Internacional sobre el Soroll com a "*problema per a la salut pública*". El primer d'aquests congressos es va fer a Washington en 1968, i van seguir els de Dubrovnik en 1973,

Friburg en 1978, Torí en 1983 En aquestes reunions es debat i s'intenta trobar solucions a qualsevol mena de problema relacionat amb el soroll com la pèrdua d'audició, efectes fisiològics no auditius, la influència del soroll sobre el comportament i la realització de tasques, la pertorbació del son i la combinació del soroll i uns altres agents, en són alguns exemples.

Entre els efectes fisiològics més importants tenim que, en línies generals, per damunt els 120 dBA el soroll pot produir un dolor intens, inflamació de l'orella interna, pèrdues considerables d'audició i fins i tot la sordesa permanent. Si una persona se sotmet a nivells molt elevats (*més de 135 dB*) és probable que es produeixi una trauma acústic com la ruptura del timpà. Així mateix, l'exposició continuada a sorolls amb uns nivells iguals o superiors als 90 dBA, pot provocar greus trastorns psicològics així com una pèrdua d'audició permanent. Cal no confondre, però, aquesta pèrdua d'audició amb la presbiacusia natural (pèrdua de la sensibilitat auditiva amb l'edat), sinó que es pot presentar superposada. Seguidament es recullen els efectes més destacats experimentats per moltes persones que viuen en les proximitats de zones sotmeses a nivells de soroll anormalment alts (aeroports, indústria pesada i zones urbanes):

- **Trastorns del son:** Els efectes més fàcilment visibles són el retard a dormir-se i l'acte de despertar-se involuntàriament d'una manera repetida i reiterada. Estudis més acurats mostren que el soroll afecta a les fases del son (*fases R.E.M*), alterant els bioritmes naturals de l'organisme.
- **Pressió arterial.** Moltes persones, especialment infants, afectades per nivells de soroll anormalment alts experimenten fortes contraccions dels vasos sanguinis i un augment del ritme cardíac i de l'activitat elèctrica muscular, entre altres efectes.
- **Alteracions del sistema nerviós.** S'ha demostrat que els individus exposats als alts nivells de soroll de les zones urbanes experimenten alteracions i desequilibris del sistema nerviós amb una freqüència tres vegades superiors que els habitants de les zones rurals o poc sorolloses. El nivell d'incidència de la hipertensió es 1'5 vegades major en un cas que en l'altre. S'ha arribat a afirmar que els efectes del soroll a llarg termini podrien reduir les expectatives de la vida humana de 8 a 12 anys.

Aquestes consideracions, i moltes d'altres que s'hi podrien afegir, dels efectes del soroll ambiental sobre la salut i el benestar de l'home, justifiquen que avui en dia es parli de "*confort acústic*" en contraposició a una contaminació acústica que a través dels mitjans de transport i les zones urbanes es va expandint perillosa i inexorablement pel planeta.

Efectes sobre l'audició

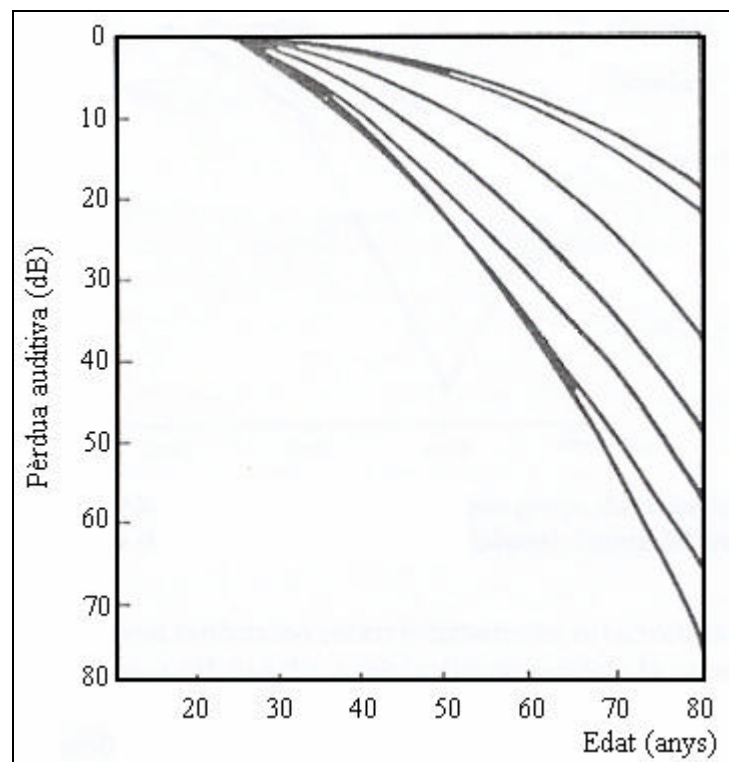
En l'orella humana es distingeixen tres parts fonamentals: l'externa, la mitjana i l'interna. Les ones de pressió sonores penetren pel pavelló auditiu (*orella externa*) i arriben fins el timpà que actua com un tel microfònic i envia vibracions amortides que es transmeten per l'orella mitjana a través de la cadena d'ossets on són amplificades. Finalment, ja dins l'orella interna, aquests estímuls mecànics són recollits en la membrana basilar que els transforma en diferències de potencial bioelèctriques i són enviades, mitjançant els nervis transmissor, al cervell convertint-se amb el que s'anomena sensació sonora (*un estudi més detallat de l'orella es farà en un capítol posterior*)

Una persona normal perd capacitat auditiva amb els anys. A efectes pràctics es considera que una persona presenta deficiències auditives significatives quan el seu nivell d'audició respecte una persona normal ha disminuït 25 dB per terme mitjà per les freqüències de 500, 1000 i 2000 Hz. (*anomenades freqüències de conversació*) .D'altra banda, es parla de sordesa total quan la

pèrdua auditiva mitjana que experimenta és de 90 dB per a aquestes mateixes freqüències. Les persones “dures d’orella” tenen pèrdues auditives compreses entre aquests dos valors. En termes generals les alteracions de l’audició es classifiquen en dos grans tipus:

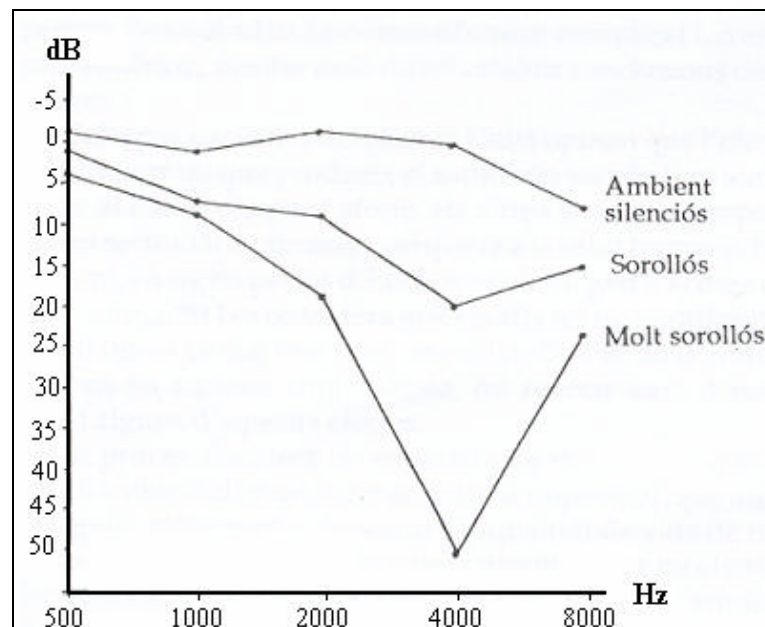
- La **sordesa de conducció** relacionada amb alteracions de l’orella externa i mitjana, per on es transmeten les ones de pressió i les vibracions.
- La **sordesa neurosensorial** localitzada en l’orella interna (*òrgan de Corti o nervi auditiu*) o en el còrtex cerebral. Una forma particularment important d’aquest tipus de sordesa és la presbiacúcia que consisteix en un envelliment biològic natural de les nostres facultats auditives.

En la gràfica (3.8) es representa la disminució mitjana de la capacitat auditiva per a diferents freqüències amb l’edat. Les corbes es corresponen amb un increment creixent de la freqüència (començant per la línia inferior). En aquest sentit s’aprecia que amb l’edat s’accentua la pèrdua auditiva sobretot per les freqüències de la banda alta de l’espectre.



Gràfic 3.8.- Pèrdua de la capacitat auditiva amb l’edat per diferents freqüències.

S’ha observat que la presbiacúcia és més acusada per als homes que per a les dones i que, en general, és més important per les freqüències elevades (*en el rang dels 2.000 Hz als 6.000 Hz*) essent particularment important al voltant dels 4.000 Hz. S’ha pogut constatar que les persones exposades a nivells de soroll superiors als 90 dB al llarg de tota la jornada laboral experimenten cada any una pèrdua auditiva d’aproximadament 6 dB. S’han fet estudis d’ambients laborals, centrats en la franja dels 95-105 dB, que mostren que després d’un any entre el 10% i el 12% dels treballadors exposats patiran lesions greus d’orella; després de 5 anys aquest percentatge superarà el 75%.



Gràfic 3.9.- Nivells d'audició típics de tres grups de treballadors.

En la gràfica s'enregistren els nivells d'audició normals de treballadors exposats a diferents nivells de soroll laboral, durant llargs períodes de temps. En aquestes circumstàncies la sordesa esdevé irreversible. Abans, però, es pateix una sordesa temporal associada a la disminució de la capacitat auditiva que es produeix subsegüentment a una exposició a un soroll intens i que desapareix després d'un cert temps. La disminució de la capacitat auditiva és proporcional al logaritme del temps d'exposició i al nivells de soroll considerat.

$$\Delta dB = -K \left[\text{Log}(T_{\text{exposició}}) + \text{Log } P \right]$$

Efectes de tipus no específic

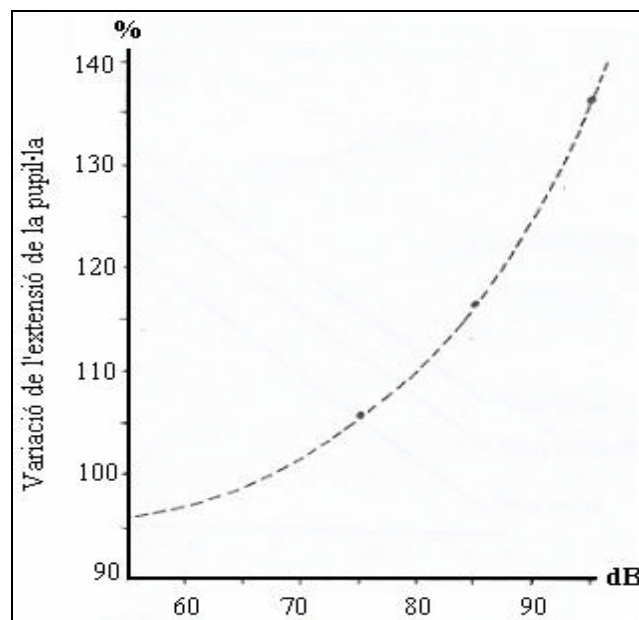
A més dels anomenats efectes específics (sistema auditiu) el soroll té importants conseqüències psicològiques (sensació de molèstia, angoixa, temor, efectes sobre l'activitat mental o manual ...) o fisiològiques (pertorbacions del son, alteracions de la visió, estrès, pressió sanguínia, tensió muscular ...).

Molts d'aquests efectes tenen components subjectives, difícils d'avaluar. Malgrat aquest fet, la majoria d'especialistes coincideixen en afirmar que el soroll ambiental és un *factor de molèstia* important que afecta significativament al benestar i la qualitat de vida, la qual cosa ha propiciat que tingui especial importància l'anomenat "*confort acústic*" o absència de sorolls intensos i no desitjats.

Diferents enquestes realitzades en les grans ciutats mostren que la font de molèstia acústica més important és el trànsit rodant. Tothom sap que el soroll interfereix amb el son. Anys d'estudi han permès descobrir que el procés de dormir té varies etapes diferenciades i que totes les persones passen d'una a l'altra al llarg de la nit. La sensibilitat d'una persona dormida que escolta un soroll extern depèn de la fase en que es trobi. Per exemple, en l'anomenada fase REM (Moviment ràpid dels ulls, caracteritzada pel fet que s'hi produeixen la major part dels somnis) la persona no es troba profundament adormida, però paradoxalment, en aquest estat resulta relativament insensible als estímuls sonors. La majoria d'investigadors opina que existeix un lligam estret entre la pertorbació del son i la salut, malgrat que la quantificació d'aquesta afirmació en forma de llei presenta moltes dificultats, però es fonamenta en el fet que gairebé la

totalitat de les persones entrevistades arreu del món associen els sorolls externs com el principal motiu pertorbador de la son, el descans i el propi benestar. La manifestació més clara dels efectes del soroll sobre l'ésser humà, possiblement sigui la capacitat de provocar un estat de tensió i angoixa (*estrès*) que pot afectar negativament a la salut en general. Aquesta relació queda clarament palesa en els treballadors de moltes indústries pesades o en persones exposades a nivells de soroll particularment alts durant períodes de temps prolongats. Una clara prova d'aquesta relació és el fet que l'exposició a un soroll continu amb intensitats entre 85 i 95 dB produeix en molts subjectes una sensació desagradable d'angoixa i afavoreix la presència d'alteracions en els corresponents electrocardiogrames. Paral·lelament, s'ha observat que si el soroll es discontinu es produeix una acceleració del ritme cardíac i un petit augment de la pressió arterial. En una investigació duta a terme a la Unió Soviètica sobre dos grups anàlegs de treballadors en ambients de treball sorollosos i tranquils respectivament, es va constatar un major percentatge de lesions cardíacques i infarts en els treballadors pertanyents al primer d'aquests grups. S'han detectat també efectes menors, com les alteracions en la circulació de la sang produïdes per la vasoconstricció dels vasos sanguinis perifèrics i, en conseqüència, l'augment en el flux de la sang al cervell (ja que en aquest òrgan no es produeix la vasoconstricció), els canvis en la resistència elèctrica de la pell o les variacions en la tensió muscular.

Fa més de mig segle es va constatar que els coloms exposats a sorolls intensos de baixa freqüència perdien el sentit de l'orientació. Actualment està plenament demostrat que el soroll afecta considerablement al *sentit de l'equilibri* de les persones a més de produir efectes col·laterals relacionats amb ell (*vertigen, moviments involuntaris dels ulls ...*). Aquests efectes, però, es manifesten únicament en individus sotmesos a nivells anormalment elevats (*més de 120 dB*). Diversos resultats experimentals mostren que el soroll interfereix en la *funció visual*, afectant de manera particular a la visió estereoscòpica, el reconeixement dels colors, la visió crepuscular i nocturna i l'agudesesa visual. S'ha observat també que el soroll produeix un augment de la superfície pupil·lar, la qual cosa perjudica la funció visual, alterant el poder d'acomodació de les distàncies focals, la percepció del relleu i la valoració de la distància que separa dos cossos en moviment.



Gràfic 3.10.- Relació entre la grandària de la pupil·la (percentatge) i el nivell de pressió sonora.

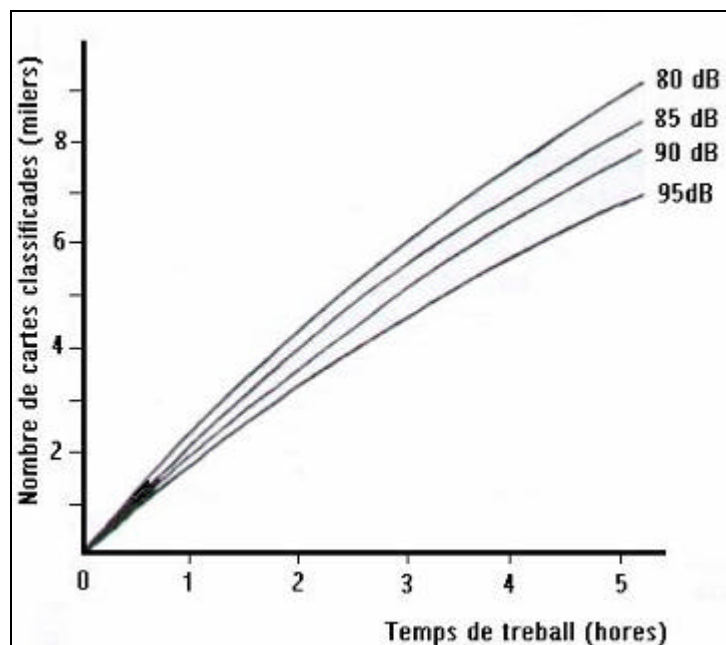
En aquest sentit, estudis més acurats assenyalen que sota l'acció d'estímuls sonors intensos (100-120 dB) es produeix una disminució del camp visual, que és particularment acusada en el roig.

La interferència del soroll també té importants efectes sobre la *transmissió i comprensió de la paraula*, doncs fins i tot un soroll de la mateixa intensitat que la veu de la persona que parla és prou important com per provocar efectes d'emascament i interferències significants que facin intel·ligible la comprensió del missatge per l'oient. El nivell normal de la veu d'una persona sol estar comprès entre els 40 i els 65 dB, mentre que l'espectre de freqüències pot variar des dels 100 fins als 10.000 Hz, encara que la zona més comuna oscil·la entre els 200 i els 5.000 Hz.

D'altra banda el nivell d'intel·ligibilitat de les síl·labes, les paraules o les frases en ambients sorollosos no depèn únicament de la diferència entre el nivell acústic del senyal i el soroll, sinó també d'uns altres factors no acústics, especialment el contingut semàntic del missatge. Per exemple, el nivell d'intel·ligibilitat de paraules aïllades per a relacions senyal/soroll de +6 dB, 0 dB, -6 dB, -12 dB, -18 dB és del 100%, 100%, 95%, 60% i 15% respectivament. Pel que fa al primer d'aquests supòsits, on el nivell de la senyal acústica és 6 dB superior al soroll de fons, el nivell d'intel·ligibilitat de les paraules aïllades és del 100%, el de les frases completes el 90% i el de les síl·labes aïllades el 56%.

En base a aquestes dades no és sorprenent constatar que la presència del soroll té un paper significatiu en el *procés d'aprenentatge* en general. En investigacions realitzades en escoles situades en les proximitats d'aeroports, amb pics de, fins i tot 95 dB, es va observar que la falta d'atenció dels alumnes era molt superior que en d'altres centres docents més tranquils.

En general, les activitats mentals o físiques que no necessiten de cap estímul auditiu i es realitzen en un entorn de treball sorollosos es veuen afectades. En la gràfica que es mostra seguidament s'aprecia com el nombre de cartes classificades pels treballadors de l'oficina de correus disminueix a mesura que augmenta el nivell de soroll.



Gràfic 3.11.- Efecte del soroll sobre l'eficiència dels treballadors.

De tots aquests treballs de camp se'n poden extreure les següents conclusions generals sobre els efectes del soroll en els treballadors:

- El soroll continu no interfereix en la realització d'activitats si no supera els 90 dBA.
- Els sorolls intermitents interfereixen més que els continus.

- Els sorolls de freqüències elevades (més de 2.000 Hz) molesten més que els de baixes freqüències.
- El soroll afecta al nombre d'errors comesos més que a la qualitat del treball.
- Les tasques complexes en resulten més afectades que les senzilles.

La teoria més acceptada per explicar la variació de l'eficiència laboral a causa del soroll és la coneguda amb el nom de "*teoria de l'estimulació*", que parteix de la següent hipòtesi: per realitzar un treball amb una certa eficiència cal una certa estimulació o interès cap a ell. En aquest sentit un excés d'estimulació produeix una disminució de l'eficiència i una estimulació baixa produeix també un rendiment baix.

Així, una persona endormiscada tindrà una baixa eficiència, que un soroll moderat podria augmentar, ja que ajudaria a despertar-la. Tanmateix si aquesta persona està totalment desperta i amb un estat d'estimulació suficient originat pel treball que està realitzant, el soroll podria augmentar aquesta estimulació fins a un nivell tal que l'eficiència disminuiria.

3.3.2.-Mesures de soroll i vibracions

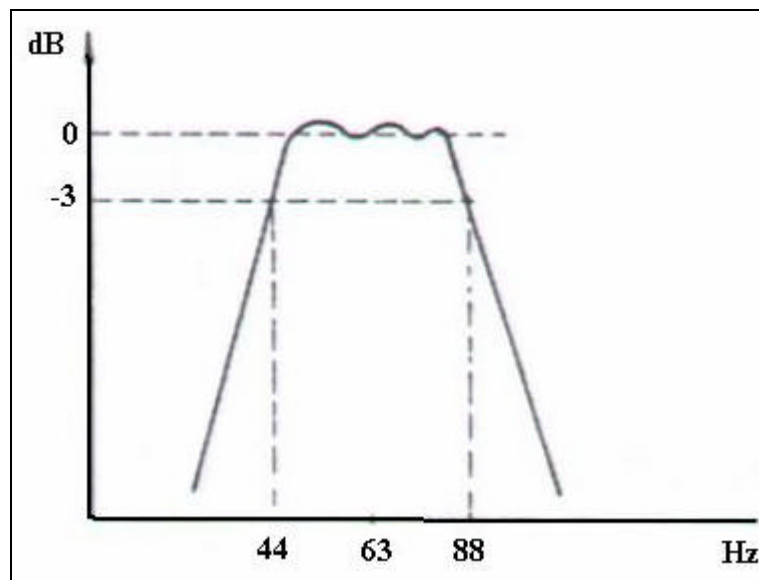
El tipus d'anàlisi o mesures depenen fonamentalment de l'objectiu del tipus d'estudi. Fonamentalment es distingeixen tres tipus d'anàlisi de soroll:

- Anàlisi espectral del so.
- Anàlisi i valoració del soroll ambiental.
- Anàlisi i valoració del soroll en l'àmbit laboral

Anàlisis espectral del so

Amb aquest estudi es determina el contingut energètic d'una ona sonora en funció de les diferents freqüències. Els aparells electrònics i els paràmetres bàsics que intervenen en aquests anàlisis són:

- **Filtre:** format per circuits electrònics que discriminen les diferents oscil·lacions en funció de la freqüència.
- **Freqüències nominals de Tall Superior i Inferior:** són les freqüències que estan per sobre i per sota la de màxima resposta d'un filtre (centre de banda) i que alhora la senyal sinusoidal és de 3 dB inferior per sota aquesta resposta màxima. En la gràfica es veu que aquesta freqüència central és de 63 Hz, mentre que les freqüències nominals de tall superior i inferior són de 88 i 44 Hz respectivament.



Gràfic 3.12.- Filtre acústic de banda d'octava: f_c : 63 Hz.

- **Banda Passant:** s'anomena així al marge de freqüències comprès entre les freqüències de tall superior i inferior.
- **Filtre Passabanda:** és un filtre, la banda passant del qual, s'estén des d'una freqüència de tall inferior a una altra de superior.
- **Amplitud de Banda Nominal:** és un percentatge que expressa la relació entre l'ample de banda, Δf , i la freqüència central, f_c .

$$\text{Amplitud (\%)}: \frac{\Delta f}{f_c} \cdot 100$$

- **Amplitud de Banda Proporcional:** és proporcional a la freqüència. Les més emprades són:

Banda d'octava: es prenen els intervals de freqüència de manera que l'extrem superior, f_2 , és doble que l'inferior, f_1 .

$$\frac{f_2}{f_1} = 2$$

i es caracteritzen perquè la freqüència central és la mitja geomètrica.

$$f_c = \sqrt{f_2 \cdot f_1}$$

Terç d'octava: són els tres intervals en que es divideixen les bandes d'octava. La freqüència central es defineix anàlogament, mentre que les freqüències de tall superior i inferior estan relacionades per:

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2} \quad i \quad f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$$

aquest darrer anàlisi espectral s'utilitza quan es requereix una major precisió, doncs si l'amplitud de banda és més estret es tindrà una major informació sobre la distribució energètica de l'ona sonora. Les freqüències centrals i de tall en les respectives bandes es

recullen en l'apèndix G. En aquests estudis es poden emprar els dos tipus de banda alhora i cal definir l'amplitud de banda constant, en base a la qual l'aparell integrarà les mesures segons la fórmula:

$$L(dB) = 10 \log \int_f^{f+\Delta f} 10^{\frac{L(f)}{10}} df$$

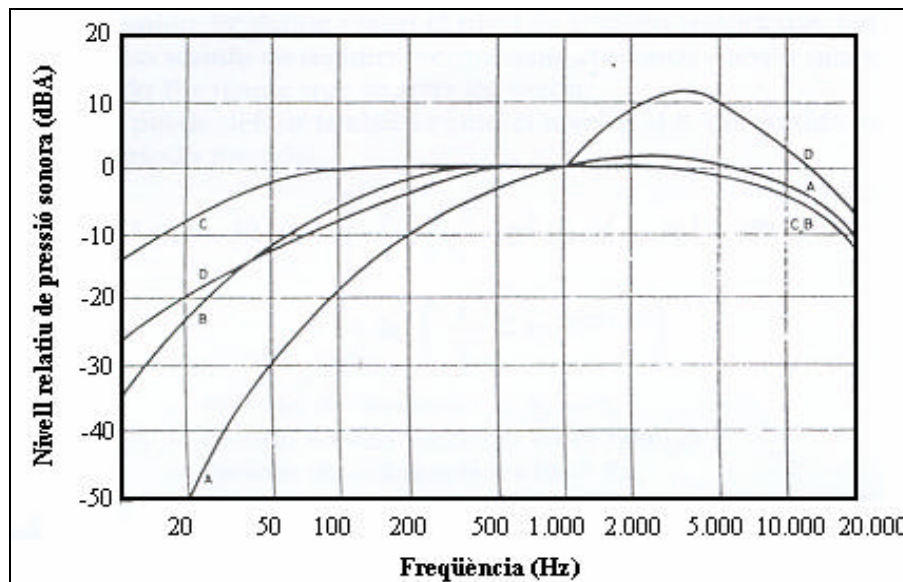
la suma integral s'estén dins cadascun dels intervals en que s'hagi definit la banda. Així, a una major amplitud de banda li corresponen valors dels nivells de pressió sonora lleugerament majors i es perd definició. En la gràfica que s'il·lustra a continuació s'aprecia aquest fet. S'han fet tres anàlisis espectrals d'un mateix so on els valors superiors de la pressió sonora corresponen a la banda de major amplitud (*banda d'octava*), mentre que els inferiors corresponen a la banda amb menor amplitud dels intervals (*banda baixa*).

Mesura i anàlisis del soroll ambiental

Per tenir un coneixement acurat del soroll ambiental, cal fer diferents tipus de mesures donada la seva aleatorietat en el temps i diferent natura. Alguns dels paràmetres més emprats són:

a) La sonoritat

Mitjançant aquesta variable es pretén quantificar els nivells de pressió sonora (SPL) d'una ona sonora i es poden representar de manera objectiva o subjectiva. En el primer cas es representa el seu valor en dB amb una transformació d'escala logarítmica. D'altra banda les mesures subjectives representen valors dels SPL corregits mitjançant filtres de freqüència que pretenen simular les particulars condicions de resposta de l'oïda. Aquests filtres de freqüència normalitzats són circuits electrònics que actuen sobre l'espectre de soroll disminuint o amplificant els nivells de soroll segons la freqüència. Els filtres més usuals són els anomenats A, B, C i D. Les seves corbes de resposta estan representades en la següent gràfica:



Gràfic 3.13.- Corbes de resposta dels filtres normalitzats.

Aquestes línies són indicatives de la resposta relativa i atenuació o augment (dB) que cal aplicar a una mesura de so. Així, per exemple a una ona de pressió amb una freqüència de 2000

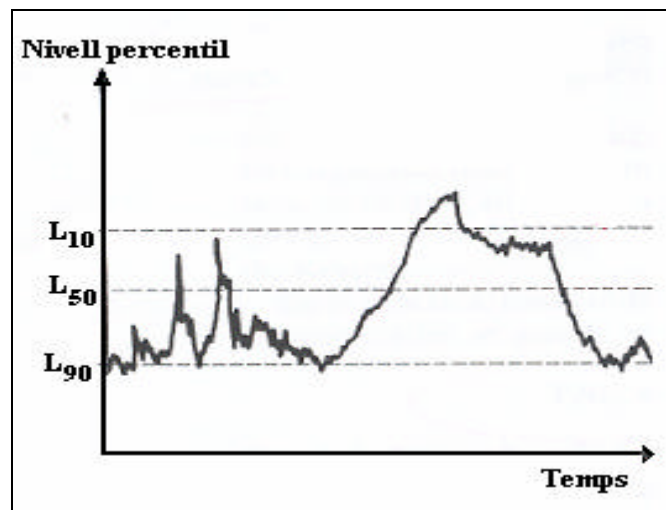
Hz cal aplicar-hi unes correccions de +1,2, -0,1, -0,2 o +9 dB segons s'utilitzi la corba A, B, C o D respectivament.

b) Anàlisi estadístic de la variació temporal del soroll

Aquests índexs són molt utilitzat perquè hi ha grans fluctuacions de soroll en el temps. Són molt emprats per descriure el soroll produït pel trànsit o les diferents activitats laborals i es fonamenten en la suposició que els valors d'aquestes ones de pressió segueix una distribució gaussiana. Basant-se en aquesta suposició, àmpliament contrastada, s'utilitzen els Nivells Percentuals, L_N , que indiquen els SPL que han estat igualats o sobrepassats el N% del temps. Els més usuals són:

- L_{10} : Nivell de soroll igualat o sobrepassat el 10% del temps.
- L_{50} : Nivell de soroll igualat o sobrepassat el 50% del temps.
- L_{90} : Nivell de soroll igualat o sobrepassat el 90% del temps.

En la gràfica s'aprecia el significat d'aquests nivells percentuals per uns valors donats i la seva evolució temporal.



Gràfic 3.14.- Evolució temporal dels nivells percentuals.

c) Paràmetres descriptors dels soroll

S'han desenvolupat molts paràmetres que tracten de valorar el soroll ambiental en diferents ambients i diferents circumstàncies. Els més utilitzats comunament són:

- **Nivell de contaminació pel soroll (LPN)**: serveix per valorar el soroll ambiental tenint en compte les molèsties produïdes per les variacions al voltant del valor mig. Es defineix com:

$$L_{NP} = L_{eq} + 2,56s \quad \text{on} \quad s = \sqrt{\sum_i \frac{n_i}{N} (L_i - L)^2}$$

L_{eq} és el nivell equivalent del soroll mig i σ la desviació estàndard d'aquest valor principal.

- **Nivell mig sonor corregit dia-nit (LDN):** és un nivell equivalent de 24 hores (07-22 diürnes i 22-07 nocturnes) que afegeix 10 dB a la franja nocturna, tot considerant que hi ha un increment de la sensació de molèstia. Es valora mitjançant la següent expressió:

$$L_{DN} = 10 \log \frac{1}{24} \left[15 \cdot 10^{\frac{L_{eqd}}{10}} + 9 \cdot 10^{\frac{L_{eqn+10}}{10}} \right]$$

en aquesta expressió L_{eqd} i L_{eqn} representen els nivells equivalents continus enregistrats durant el dia i la nit respectivament.

- **Índex de soroll de tràfic (TNI).** Intenta valorar la resposta de les reaccions humanes al soroll originat pel tràfic urbà, basant-se en els valors L_N i la dispersió.

$$T_{NI} = 4 \cdot (L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30$$

- **Nivell de soroll que es percep (PNL).** És un dels índexs més emprats per mesurar o valorar el soroll produït per aeronaus. S'obté mitjançant càlculs complexes a partir de l'anàlisi de les freqüències de les corbes d'igual sonoritat, però per sorolls de banda ampla, sense tonalitats massa pronunciades, es pot aproximar segons:

$$P_{NL} = SPL (dBA) + 13$$

Sonòmetre

Permet la mesura directa del nivell de pressió sonora global. Normalment expressa el resultat amb decibels i permet escollir l'escala de ponderació. Els fabricants utilitzen com a referència les normes IEC 651, relativa a la precisió, i la IEC-804, específica per a sonòmetres integradors, mentre que d'altres normes o directives posteriors només afegeixen petites variacions. La constitució interna d'aquests aparells segueix el següent esquema general:

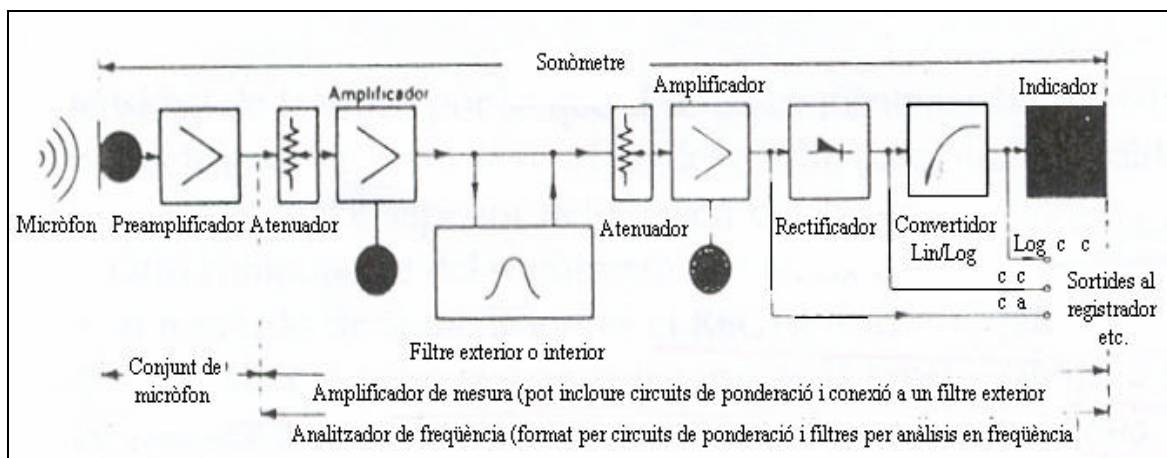


Figura 3.13.- Diagrama de blocs d'un sonòmetre.

Cadascun dels components té la següent funció:

El micròfon converteix les variacions de pressió de l'ona sonora en una variació de tensió (diferència de potencial) proporcional. Aquests corrents generats, però, tenen una impedància massa elevada, que el preamplificador s'encarrega de reduir. Posteriorment la senyal passa per l'amplificador i es rectificadora mitjançant un dels filtres de freqüència (A, B, C o D) o d'anàlisi

espectral. Un cop filtrada, el rectificador la converteix en un senyal continu proporcional als valors eficaços o pics segons la constant de temps que s'hagi seleccionat. Posteriorment pot passar-se a un commutador Lin/log, segons es desitgi una resposta lineal o logarítmica i finalment es mostra en la pantalla el valor de la mesura, bé sigui de forma analògica o digital.

Els paràmetres que defineixen les característiques d'un d'aquests aparells alhora que la seva qualitat són fonamentalment:

- La **sensibilitat** és el factor de conversió entre el valor eficaç de la pressió sonora i el de la tensió del corrent elèctric que s'origina en el micròfon a una freqüència determinada.
- La **resposta en freqüència** reflexa la importància del valor de la freqüència de l'ona sonora sobre la sensibilitat del micròfon. Per garantir un correcte valor de la mesura, cal que la sensibilitat no varii amb la freqüència.
- La **direcció**. Aquest paràmetre representa la variació de la sensibilitat amb l'angle d'incidència del front d'ona sobre el diafragma del micròfon i no presenta variacions sempre que les dimensions de l'aparell siguin petites siguin menyspreables en comparació a la longitud de l'ona sonora. Així, la sensibilitat varia en funció de la direcció de l'ona incident per a altes freqüències, malgrat que fora desitjable que no hi haguessin variacions per aquest factor.
- Els **nivells màxim i mínim** que poden ser mesurats per l'aparell són limitats per la distorsió i el soroll de fons. La distorsió és deguda a la manca de linealitat entre la senyal de sortida del micròfon i l'ona incident. Degut a aquest motiu apareixen nous harmònics que canvien lleugerament la forma de l'ona. D'altra banda, el soroll de fons és la senyal de sortida que existeix en el micròfon quan no hi incideix cap ona sonora, limita el nivell inferior a partir del qual la senyal de sortida es pot identificar com a tal i no es confongui per un soroll de fons.
- El **rectificador** realitza la mitjana temporal de la senyal d'entrada mitjançant un circuit RC i obté una senyal proporcional al seu valor quadràtic. L'interval de temps, sobre el que es realitza la integració, s'escull ajustant la constant de temps. A mesura que augmenti el seu valor, les variacions de la senyal tenen menys influència sobre la mitjana, atès que l'increment d'energia es reparteix sobre un interval major. Els valors més utilitzats són:

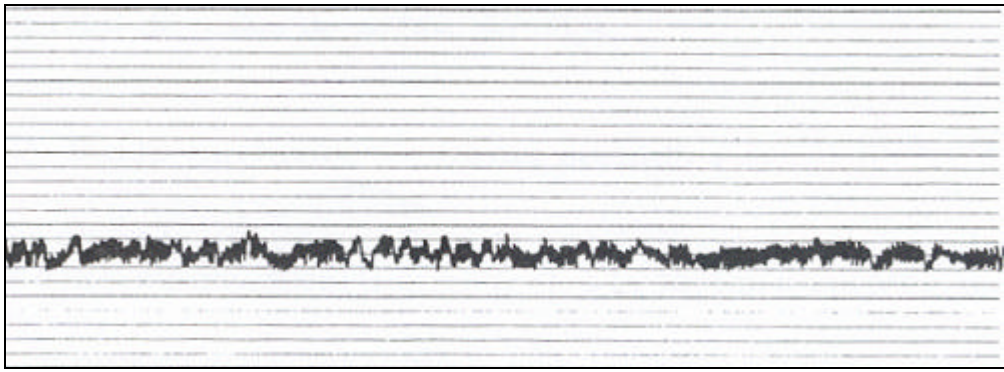
SLOW	1 s
FAST	0'125 s
IMPULSE	0'035 s
PEAK	$0'05 \cdot 10^{-3}$ s

Taula 3.6.- Intervals de temps relatius al temps d'integració.

Tipus de sorolls

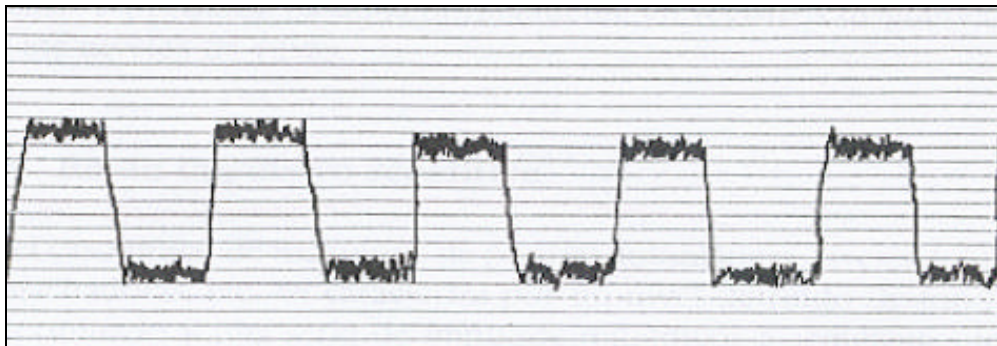
Els sorolls ambientals es caracteritzen per provenir de diferents fons i tenen una natura molt diversa. Presenten, però, alguna característica comuna que permet agrupar-los segons:

- Soroll **quasi-continu**: només tenen petites variacions dels nivells de pressió sonora en el temps. Seria el cas de la majoria dels motors elèctrics o d'una bomba d'aigua.



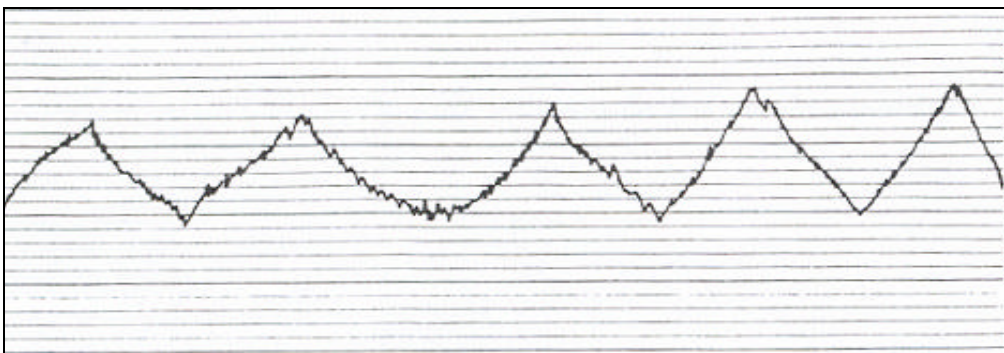
Gràfic 3.15- Soroll de bomba.

- Soroll *intermitent*: es caracteritza per tenir un nivell de soroll variable durant un cert interval de temps. És el propi dels compressors durant el període de càrrega o de certs equips automàtics amb diferents cicles evolutius.



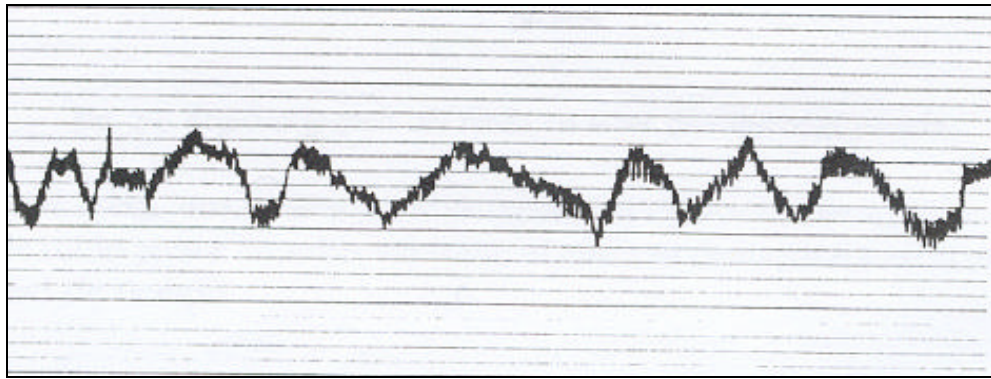
Gràfic 3.16.- Nivells de soroll de compressors.

- Sorolls *fluctuants de forma periòdica*. Són típics de les operacions de granallat de les superfícies i casos similars on en cada cicle es repeteix la mateixa cadència.



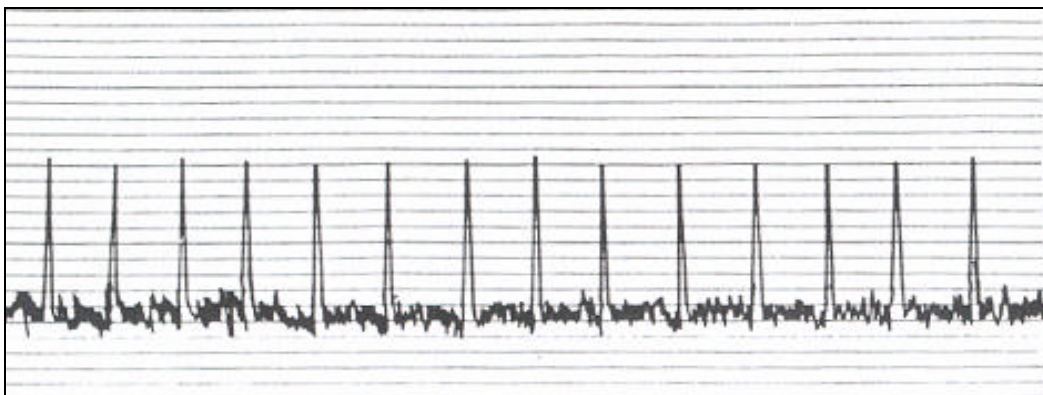
Gràfic 3.17.- Registre gràfic de la fressa produïda per operacions de granallat.

- Sorolls *fluctuants no periòdics*. Són propis dels tallers o les indústries mecanitzades on no hi ha una variació regular de la fressa. En nombroses ocasions el soroll propi del trànsit es correspon a aquest model. S'acostuma a avaluar emprant els índexs L_N , TNI, LNP... durant llargs períodes de temps per disposar de valors prou representatius.



Gràfic 3.18.- Enregistrament dels nivells de soroll produïts en un taller d'automòbils.

- Sorolls amb *impulsos repetitius*. Acostumen a tenir un soroll de fons important sobre el que destaquen impulsos repetits a intervals regulars.



Gràfic 3.19.- Representació gràfica del soroll produït per una premsa automàtica.

Vibracions

L'anàlisi de vibracions és comú en l'estudi i la pràctica de l'arquitectura i l'enginyeria. Pot ser interessant per conèixer la transmissió de les ones de vibració des d'una carretera fins als edificis propers, per avaluar l'impacte d'un terratrèmol o per mesurar l'impacte del pas del ferrocarril sobre les edificacions circumdants (*tal com succeeix a Girona*). També és útil en el disseny o el manteniment preventiu de grans maquinàries i estructures sotmeses a grans tensions o esforços.

Per mesurar la vibració es pot analitzar qualsevol d'aquests tres paràmetres: desplaçament, velocitat i acceleració. En els primers intents s'utilitzaven aparells òptics que mesuraven el desplaçament de l'element vibrador, però els mancava resolució i precisió. Posteriorment es van utilitzar traductors de velocitat, amb parts mòbils molt delicades sotmeses a accions de fricció o desgast i limitats a una reduïda banda de freqüències. Finalment, en els nostres dies, els dispositius més emprats són els acceleròmetres, fabricats amb dispositius piezoelèctrics, sense parts mòbils sotmeses al desgast, que mesuren les acceleracions. En aquests dispositius és possible incorporar circuits integradors que donin directament els valors del desplaçament i la velocitat. Un equip per mesurar vibracions té un diagrama de blocs bàsicament similar a:

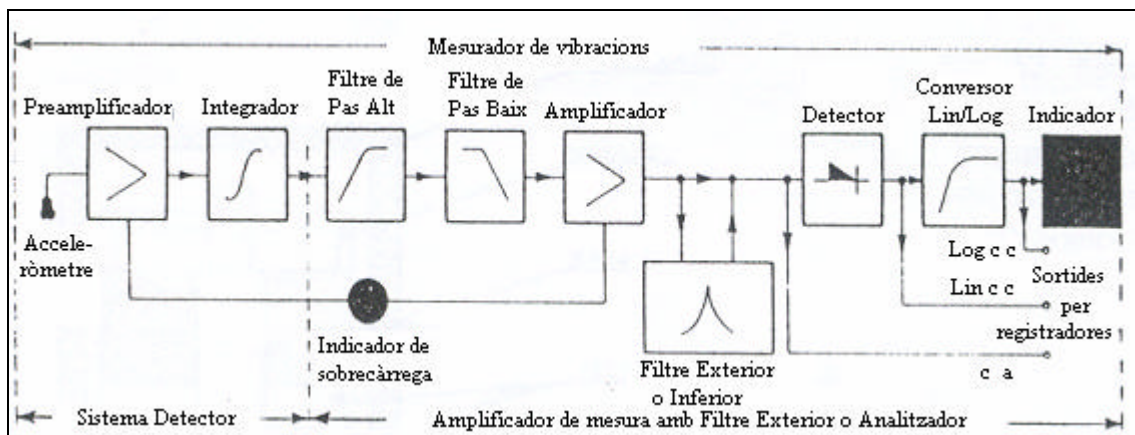


Figura 3.14.- Esquema d'un equip bàsic de mesura de vibracions.

L'acceleròmetre és semblant al micròfon del sonòmetre. La seva funció consisteix en transformar l'acceleració del cos que es mesura en una tensió elèctrica proporcional. El preamplificador redueix la impedància fins uns valors admissibles per l'integrador que, a més, permet calcular la velocitat i el desplaçament. Els sistemes de filtrat (Filtre Pas Alt i Baix) redueixen els sorolls d'alta i baixa freqüència, així com la ressonància del acceleròmetre. Un cop el senyal ha estat amplificat, passa pels corresponents convertidors analògics i digitals. Finalment, un indicador senyala la mesura. L'equip més simple de mesura està format per un acceleròmetre i un sonòmetre amb anàlisi espectral en terç d'octava com el que es representa en aquesta figura.

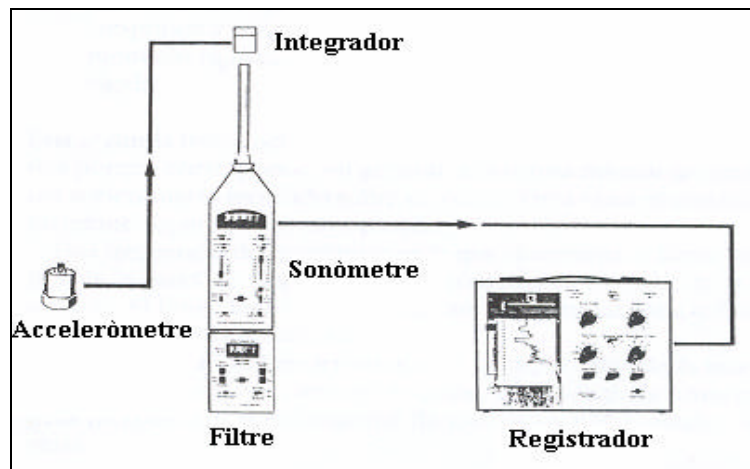


Figura 3.15.- Equip simple de mesura de vibracions.

Per estudis més complexos cal disposar d'analitzadors de vibracions i freqüències, així com d'ordinadors per enregistrar i representar les dades.

3.3.3.- Efectes del soroll i la vibració del ferrocarril

Un dels factors principals productors de *estrès* en les societats urbanes i industrialitzades és el soroll. Les fonts que el produeixen i els seus efectes sobre les persones són varis i difereixen considerablement segons la freqüència i el grau d'intensitat. Algunes de les fonts de soroll típiques que es poden trobar en les immediacions d'una àrea urbana són: trànsit viari, tràfic aeri, indústria, fressa del veïnat i instal·lacions esportives. En la taula (3.7) es relaciona cadascuna d'aquestes fonts amb el grau de molèstia que experimenten els habitants de ciutats de diferent grandària.

Font de soroll	Grau d'angoixa	Total (%)	NOMBRE D'HABITANTS			
			<5.000	<20.000	<100.000	>100.000
Trànsit rodat	Molt alt	21	16	19	25	22
	Alt	51	48	52	48	57
Tràfic aeri	Molt alt	14	14	16	14	11
	Alt	41	44	42	38	38
Ferrocarril	Molt alt	3	2	3	6	3
	Alt	19	14	25	16	21
Indústria	Molt alt	4	3	4	3	4
	Alt	17	11	18	22	17
Soroll veïnal	Molt alt	4	3	5	4	4
	Alt	17	10	17	18	22
Instal·lacions esportives	Molt alt	1	1	1	1	1
	Alt	6	5	7	5	6

Taula 3.7.- Grau de molèstia experimentat per la població.

Aquestes dades han estat obtingudes a partir d'enquestes realitzades en poblacions de l'antiga República Federal d'Alemanya. Una font de soroll prou important, que no es recull en l'anterior relació, és sens dubte el ferrocarril. Seguidament es detallen algunes investigacions sobre els efectes del soroll que produeixen els trens i la vibració que se'n deriva simultàniament.

Investigacions sobre el soroll produït pel ferrocarril

Si es compara amb altres índexs de mesura acústica (Nivells de pic, L_{AE} , L_{DN} ...) el nivell equivalent mesurat amb la corba de ponderació A, L_{Aeq} , ha resultat ser el paràmetre més eficaç per predir el grau d'angoixa general experimentat per la població afectada. Malgrat que no s'han obtingut conclusions sobre la capacitat d'adaptació de les persones a aquest tipus de fressa, d'aquests mateixos estudis es desprèn que, amb el mateix nivell d'intensitat mitjana, el soroll generat pel ferrocarril sembla ser menys angoixant que el produït pel trànsit rodat. Molt possiblement, aquesta diferència és deguda al caràcter intermitent del pas del tren, ben diferent del brogit continu generat pels cotxes i camions.

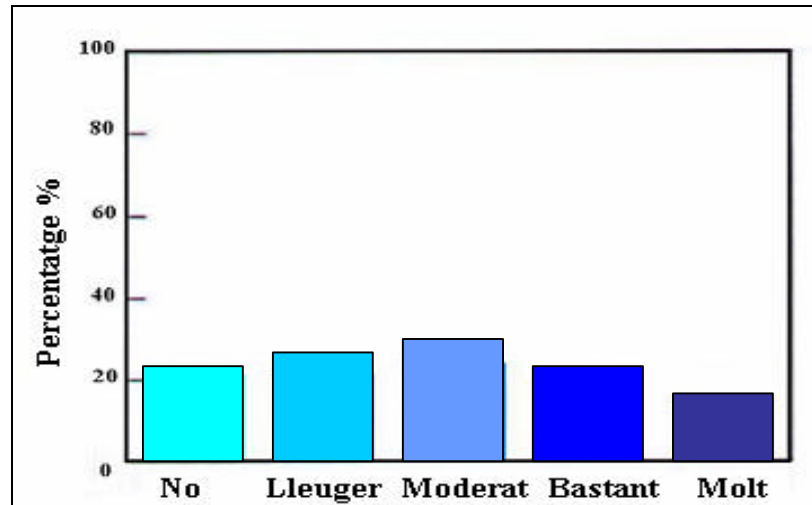
Vibració del ferrocarril

Les investigacions realitzades a Escòcia l'any 1987 per Woodroof and Griffin són força representatives del que passa arreu del món. En aquests estudis es constata que només el 1'4% de la població adulta afectada per la vibració manifestava angoixa, per la qual cosa es va concloure que "la vibració deguda al ferrocarril es considera un dels aspectes menys angoixants en el veïnat". Aquestes conclusions es van obtenir analitzant els resultats de 1056 enquestes, fetes en 565 habitatges, on hi constaven els següents grups de preguntes:

- Reaccions davant la vibració i el grau d'interferència en les activitats quotidianes en general, tot distingint entre el dia i la nit.
- Reaccions davant el soroll on també cal precisar el grau d'interferència en les activitats normals i diferenciar els períodes diürns dels nocturns.
- Qüestions orientades a comparar els efectes del soroll i la vibració.

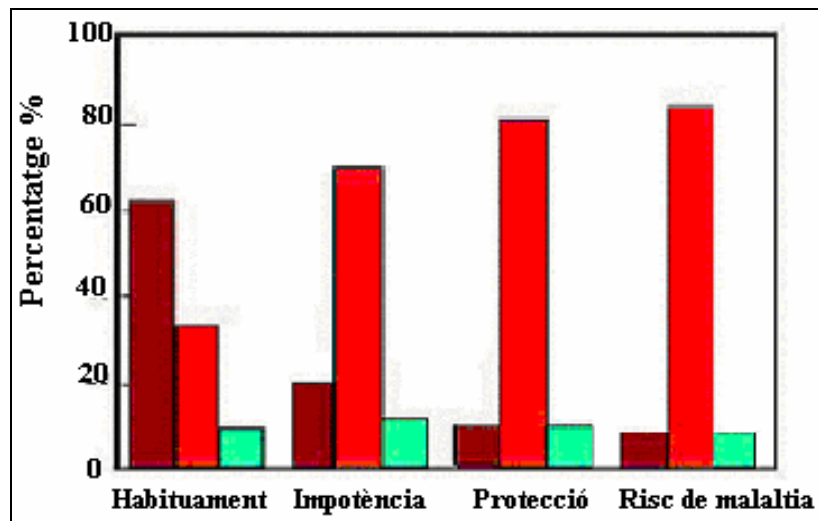
- d) Preguntes sobre la pèrdua de valor de la propietat en relació a possibles danys materials i ambientals.
- e) Qüestions relacionades amb aspectes emocionals com l'angoixa, els nervis, l'estrès...
- f) Estadístiques sociodemogràfiques i informació general de la zona i l'habitatge.

En el gràfic (3.20) es mostren els resultats que es van obtenir. El 57% de les persones entrevistades manifesten estar “molt”, “força” i “bastant” afectades, mentre que només el 21% no experimenta cap tipus de molèstia. El 22% dels entrevistats considera que el nivell de perturbació és “considerable” i el 14% restant el qualifica d’“inacceptable”.



Gràfica 3.20.- Percentatge de persones afectades per la vibració.

En aquest sentit cal esmentar que el 86% d'aquestes persones consideraven que ells mateixos podien protegir-se dels efectes de la vibració. Aquest percentatge és molt elevat si es compara amb el 14% de persones que es veien capaces de resguardar-se del soroll. En el següent gràfic es comparen els percentatges relatius a algunes reaccions individuals de les persones enfront als efectes provocats per nivells similars del soroll, la vibració i una combinació indefinible d'ambdós.



Gràfic 3.21.- Comparació entre el soroll i la vibració.

S'observa que la facilitat d'habituaçió a la vibració respecte el soroll contrasta amb la poca o escassa sensació de protecció impotència alhora d'evitar aquestes efectes que hom experimenta. D'altra banda, en la tríade d'histogrames de l'extrem dret s'aprecia com el risc de malalties auditives (sordesa i pèrdues d'audició principalment) és altament considerat per la població. En

aquest mateix context, el 40% dels veïns relacionaven directament els danys existents en la seva propietat amb la vibració que es transmet a través del terreny quan passa el tren.

Efectes simultanis del soroll i la vibració

En aquest capítol es recullen alguns resultats obtinguts per E. Öhrstrom en treballs de camp, publicats al *Journal of Sound and Vibration*, sobre l'efecte de l'exposició al soroll i a la vibració produïda pel ferrocarril i el tràfic de vehicles. Mitjançant qüestionaris s'han avaluat diverses molèsties ocasionades a les persones que viuen en àrees properes a les vies fèrries; angoixa, pertorbació del son, efectes psicològics perjudicials ... Aquests estudis cobreixen àrees amb diferent nombre de trens cada 24 hores i on la forta vibració supera els 2 mm/s. Per poder comparar els efectes produïts en zones on hi ha una pertorbació mecànica de menor intensitat, també s'han estudiat àrees amb nivells de només 1 mm/s o menys. En aquest estudi han participat 2833 persones amb edats que oscil·len entre els 18 i els 75 anys. La majoria d'estudis fets fins ara, indiquen que el soroll acústic, generat pel ferrocarril, és, generalment, una font de molèstia menor que el produït pel tràfic de vehicles. Això és degut, principalment, a que hi ha un nombre major de persones exposades a aquest últim tipus de soroll. Només a Suècia, per exemple, hi ha al voltant de 350.000 persones exposades a nivells de soroll de tren que superen els 55 dB(A), mentre que 1.600.000 individus estan exposats a un nivell de soroll similar degut al tràfic rodat. Cal tenir en compte que aquestes dades corresponen a estudis realitzats l'any 1997, però són força representatives i indicatives de l'ordre de magnitud.

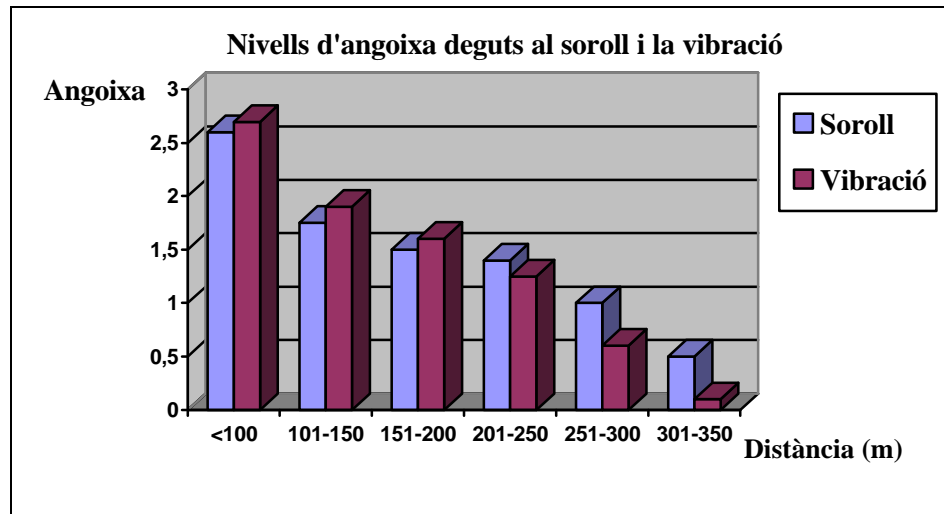
El problema que es presenta quan s'estudia la pertorbació acústica produïda pels trens és que sovint va acompanyada d'una pertorbació mecànica (*la vibració*), que en les immediacions de la via fèrria, pot suposar una font d'angoixa i molèstia superior al mateix soroll. Per avaluar correctament aquests efectes s'han tingut en compte diferents paràmetres: els efectes de la vibració (<1 mm/s, >2 mm/s) sobre l'estructura dels edificis, el nombre de trens en 24 hores (<25, >150) i la proporció de trens de càrrega. En una segona fase s'ha dividit el territori en zones, tot identificant les àrees i nuclis urbans situats en les proximitats d'una via fèrria amb més de 1000 habitants. Una tercera fase va consistir en visitar els llocs prèviament seleccionats i fer una tria dels més adients per dur a terme un treball de camp d'aquestes característiques. Finalment es van seleccionar 15 àrees urbanes que complien les condicions requerides en aquesta metodologia. El soroll s'enregistrà mitjançant nivells de soroll equivalents, L_{Aeq} , i màxims, L_{Amax} , a diferents distàncies de la línia de la via fèrria, en intervals de 5 dB. La vibració, d'altra banda, ha estat classificada en aquestes àrees com forta (< 1 mm/s) o molt forta (>2 mm/s). Els seus efectes sobre la gent, foren estudiats mitjançant un qüestionari acompanyat d'una carta introductòria prèvia. La molèstia general ha estat avaluada mitjançant la següent escala verbal de categories:

PREGUNTES	PUNTUACIÓ
No s'observa cap efecte	0
S'observa però no causa molèstia	1
La molèstia no és gaire important	2
Força angoixant	3
Molt angoixant	4

Taula 3.8.- Grau de molèstia en relació a aquesta escala de puntuació.

En aquestes taules també es recollien preguntes orientades a obtenir més informació sobre el tipus de molèstia o angoixa. Algunes són: orientació de les finestres, construcció de l'estructura dels edificis, especial sensibilitat dels individus al soroll ... En aquesta línia, els que afirmaven

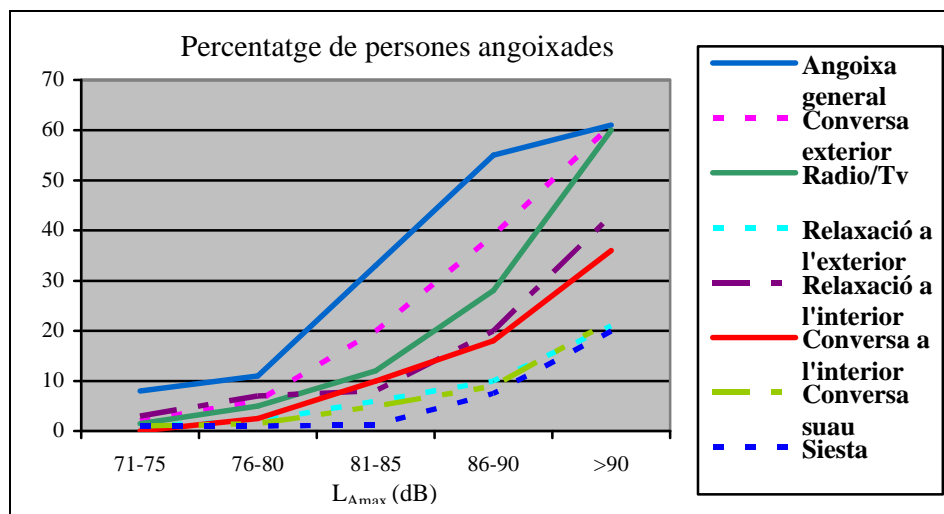
estar angoixats o molt angoixats pel soroll o la vibració havien de complimentar un segon qüestionari amb preguntes específiques sobre el grau de molèstia concret en les seves diferents activitats quotidianes; dormir, lectura, escoltar música ... Amb aquestes dades s'ha realitzat la següent gràfica on es compara la molèstia produïda pel soroll i la vibració a diferents distàncies de la via fèrria:



Gràfic 3.22.- Histograma on es reflexa la molèstia.

La disposició de les dependències dels habitatges i la situació de les finestres també tenen un efecte important sobre el grau de molèstia que experimenten els seus habitants. Generalment els individus que viuen en cases o apartaments amb les finestres del bany orientades cap a la via experimenten una angoixa superior als que no tenen aquesta orientació.

Cal destacar també que al voltant del 40% de les persones entrevistades que tenen les finestres del dormitori en la direcció de la via (*exposades a nivells superiors als 80 L_{Amax}*), dormen sempre amb les finestres tancades. El grau de molèstia de les diferents activitats sobre el percentatge de les persones entrevistades es recull en el següent gràfic:



Gràfic 3.23.- Percentatge d'individus que experimenten molèsties en diferents activitats.

En aquests gràfics s'observa que a partir d'uns 75 dB l'angoixa general de la gent augmenta considerablement, pel que fa a les diferents activitats s'aprecia que el soroll i la vibració del tren pertorba en major grau tasques realitzades a l'exterior (més afectades pel soroll) i les que

requereixen un cert grau de concentració (escoltar la radio, mirar el televisor ...), mentre que no interfereix en gran mesura les pròpies de l'interior de l'habitatge.

Els resultats indiquen que el 98% de les persones entrevistades en les àrees afectades per la vibració són conscients d'un efecte pertorbador que els molesta almenys un cop cada dia. En les zones afectades únicament pel soroll, les enquestes mostren que només el 89% dels entrevistats experimenten molèsties amb aquesta regularitat. La meitat d'aquestes persones, aproximadament, manifesten sentir un major grau de molèstia en determinades èpoques de l'any, majoritàriament l'estiu, i pel capvespre i les nits.

Conclusions

Aquestes resultats sobre l'angoixa que genera el pas del ferrocarril en zones habitades mostren que el soroll se sent com una font de molèstia molt més important en els punts on coincideixen simultàniament la pertorbació acústica i la vibració. Això, pot ser degut a la dificultat que tenim per distingir entre el soroll o l'efecte de la vibració quan es produeixen simultàniament. La vibració pot dificultar que un individu pugui acostumar-se a l'exposició continuada de soroll, doncs en les àrees amb uns nivells alts (superiors a 2 mm/s), la vibració s'experimenta com una molèstia tan angoixant com el soroll fins a distàncies properes als 200 m de la via fèrria.

Per garantir una qualitat ambiental acceptable, on menys del 5% de la població manifesti estar afectada pel soroll del ferrocarril, cal que la pertorbació acústica tingui un nivell màxim inferior als 80 L_{Amax} i un nivell equivalent de 55 L_{Aeq} (mesurat sobre un temps mitjà de 10 minuts) en àrees que no estan exposades a la vibració. En els punts on hi ha una exposició simultània als efectes del soroll i la vibració, cal prendre mesures dràstiques per reduir-ne els efectes. Aquestes línies d'acció poden concretar-se en obres o la inserció de materials que esmorteixen els seus efectes, no permetre la construcció de cases o edificis en la proximitat de la via o una reducció de la pertorbació acústica superior als 10 dB(A). En aquest sentit, els estudis indiquen que l'angoixa generada pel pas del ferrocarril pot reduir-se si els dormitoris es situen en la part més tranquil·la de l'habitatge, lluny del tram de la via. La interferència en les converses i les comunicacions en general sembla ser el principal motiu de queixa, per la qual cosa és important reduir-ne els efectes en els dwellings i les escoles.

3.3.4.-El soroll en zones urbanes

El soroll existent en les zones urbanes està originat fonamentalment pel trànsit rodat i, en menor mesura, pel trànsit aeri, les activitats industrials i les obres públiques. El caràcter aleatori d'aquest soroll imposa la necessitat d'utilitzar uns criteris específics per la seva valoració, tant pel que fa a la mesura del seu nivell d'intensitat en un interval de temps limitat, com a la distribució de la quantitat total d'energia sonora que es pot enregistrar en un determinat emplaçament al llarg de tot un dia. Aquestes mesures es realitzen amb un sonòmetre en perfectes condicions d'ús i calibrat com cal. Aquests enregistraments solen efectuar-se amb la corba de ponderació A, la constant de temps "slow" i sota condicions meteorològiques favorables (absència de vent i pluja). La utilització de la corba de ponderació A permet comparar les dades obtingudes amb la majoria de les existents en la literatura especialitzada.

Realització de mapes sonors

L'espectacular creixement del parc automobilístic a fet necessari un control efectiu dels nivells acústics i una planificació coherent de la lluita contra el soroll. En aquest sentit, la primera tasca

que cal portar a terme, és la realització de les mesures corresponents per tal de conèixer la localització exacte de les zones especialment sorolloses de la ciutat i fer una *cartografia del soroll urbà*. Aquesta eina, serà sens dubte, de gran importància, alhora que una font d'informació valuosíssima.

Seguint aquesta línia, durant la dècada dels anys 70 s'ha desenvolupat en la ciutat de Montreal (Canadà) un sistema de cartografia sonora original basat en la mesura del soroll de fons. Aquest índex és significativament proporcional a les activitats humanes i es va elaborar amb l'ajuda d'un ordinador, cosa que va permetre el tractament exhaustiu de totes les dades alhora que la correlació de tots els paràmetres i variables d'interès: traçat de corbes isofòniques, relació entre els nivells de soroll i els índexs de molèstia (confeccionats mitjançant enquestes), correlacions entre el soroll i les característiques socioeconòmiques de les diferents zones de la ciutat...

Aquesta iniciativa pionera va originar l'aparició de projectes semblants arreu del món. Així, entre el juny de 1979 i juliol de 1981, es va dur a terme el mapa sonor de València, realitzat a partir de 1.520 mesures que es van portar a terme en 380 enclavaments diferents de la ciutat, distribuïts regularment dins una superfície de 25 km², on s'inclou la pràctica totalitat de l'àrea urbana consolidada i Hi viuen més del 90% dels habitants de la ciutat. L'obtenció d'aquestes dades va fer-se mitjançant una lectura manual del sonòmetre cada 10 segons al llarg d'un temps total de 10 minuts.

Degut al fet que la intensitat del trànsit i l'activitat en general disminueix força els caps de setmana, totes les mesures es van enregistrar únicament en dies laborables (de dilluns a divendres). Lògicament els nivells acústics més elevats corresponen a les vies amb una major densitat de circulació. En la taula que es detalla a continuació es recullen els valors mitjans i la desviació típica dels principals índexs en diferents intervals

Índex	Interval	Valor mitjà	Desviació típica
L₁	63-96	80'5	5'4
L₁₀	57-86	72'8	5'7
L₅₀	46-78	64'8	6'1
L₉₀	42-72	58'5	5'8
L₉₉	40-69	54'6	5'3
L_{eq}	57-81	70'1	5'3

Taula 3.9.- Nivells de soroll diürn a València.

Cal destacar que un 10% del conjunt de les mesures van donar com a resultat valors de l'índex L₁₀ superiors als 80 dBA, mentre que en un 44% d'aquestes mesures el nivell sonor equivalent, L_{eq}, va superar els 70 dBA. Aquests resultats indiquen que València és una ciutat especialment sorollosa. Dissortadament, però, no hi ha massa diferència entre aquesta ciutat i qualsevol altra donada les similituds existents entre els diferents parcs de vehicles d'arreu del món i el propi "teixit urbà".

3.3.5.-Efectes a llarg termini de les barreres acústiques

Introducció

La construcció de barreres acústiques al costat de les carreteres i autopistes disminueix el nivell de soroll provocat pel tràfic rodat amb la finalitat de disminuir l'angoixa o molèstia dels residents que habiten en les immediacions. Pel que fa a la pressió acústica de les ones sonores pot classificar-se en tres grans grups:

- **Classe 1:** per sota els 55 dB(A), no es considera que els seus efectes puguin esdevenir una font de molèstia.
- **Classe 2:** entre els 56 i els 65 dB(A). En aquest cas, la particular finalitat dels edificis situats en la proximitat de la carretera, serà determinant en última instància per decidir si és necessari la construcció de barreres.
- **Classe 3:** més de 65 dB(A). Aquí la construcció de pantalles o de qualsevol altra mena de mesures protectores esdevé absolutament necessària per garantir el benestar i confort de les persones afectades.

En aquest apartat, però, s'estudiarà l'angoixa derivada de l'impacte psicològic que generen les barreres després de 8-10 anys de la seva construcció. Els resultats d'estudis fets un any després de la instal·lació de les pantalles indiquen que, a curt termini, disminueixen simultàniament les dues sensacions: l'acústica i la psíquica. A mesura que passen els anys, però, la disminució de l'angoixa i preocupació que es deriven del soroll és menor que la corresponent a la reducció efectiva de la intensitat de les ones, les quals realment són absorbides o reflectides per la barrera. Ens trobem, doncs, davant el que podríem anomenar un dèficit d'eficiència de les mesures de protecció.

Els experiments de laboratori fets per Aylor i Marks, entre d'altres, corroboren aquesta teoria, doncs els seus resultats indiquen que els subjectes sotmesos al test, afectats per sorolls de nivells idèntics, identificaven sorolls d'intensitat superior quan els vehicles no estaven amagats per l'estructura de la barrera. En aquest sentit, Vallet i els seus col·laboradors, han trobat que una disminució inferior als 4 dB(A), no suposa una reducció de l'angoixa significativa. Així, les principals qüestions a estudiar són:

- 1.- Les proteccions amb pantalles acústiques realment representen una millora pel que fa a la sensació d'angoixa?
- 2.- La presència de la barrera realment augmenta la percepció de molèstia de les persones afectades?
- 3.- Existeix una relació de proporcionalitat entre la sensació d'angoixa i el volum de tràfic?

En aquest capítol es detallen les últimes investigacions realitzades sobre aquesta important qüestió, doncs tenint en compte l'important cost que es deriva de la majoria d'aquestes obres cal assegurar-se que realment representen una millora real i efectiva.

Mètode de treball i Disseny de l'estudi

Dues enquestes paral·leles, una acústic i una altra psicològica, s'han fet sobre quatre barreres diferents amb quatre àrees adjacents d'investigació i 12 punts de control experimentals. Els resultats difereixen entre aquestes zones, degut principalment a la distància que les separa de l'autopista (de 30 a 240 metres). Seguidament es resumeixen les principals conclusions que s'extreuen d'aquest estudi:

- Les barreres acústiques són mesures molt eficaces per reduir els nivells de soroll i la sensació d'angoixa dels residents que viuen prop les autopistes.
- La presència de les barreres redueix considerablement la molèstia en les zones molt properes a les vies de trànsit, mentre que els seus efectes són mínims en els habitants de les zones que es troben a més de 150 m de l'autopista.

- Reduir el volum de trànsit d'una via, derivant-lo per altres carrils, sembla tenir un efecte psicològic menor i no tant efectiu que la construcció d'apantallaments acústics.
- Pels mateixos nivells acústics el soroll generat en l'autopista produeix uns nivells de molèstia i angoixa superiors als que es deriven del tràfic urbà.
- La construcció de barreres sonores té una influència positiva en el sentit que ajuden a minimitzar o alleugerir la sensació de preocupació davant d'uns mateixos nivells d'emissió acústica.

3.4.- MESURES CONTRA EL SOROLL

3.4.1.- Criteris d'exposició al soroll

En la nostra societat, el soroll s'ha convertit en un factor de gran importància doncs és susceptible de ser generat per qualsevol activitat humana. Els seus efectes són palesos principalment en les zones urbanes, malgrat que els diferents mitjans de transport i els polígons industrials que es construeixen arreu del planeta contribueixen a propagar-lo per àrees naturals que, fins els nostres dies, no estaven afectades per pertorbacions acústiques massa elevades. La natura de les fonts que generen les ones sonores és diversa i variada. No obstant, poden distingir-se tres criteris diferenciats per diferenciar-los:

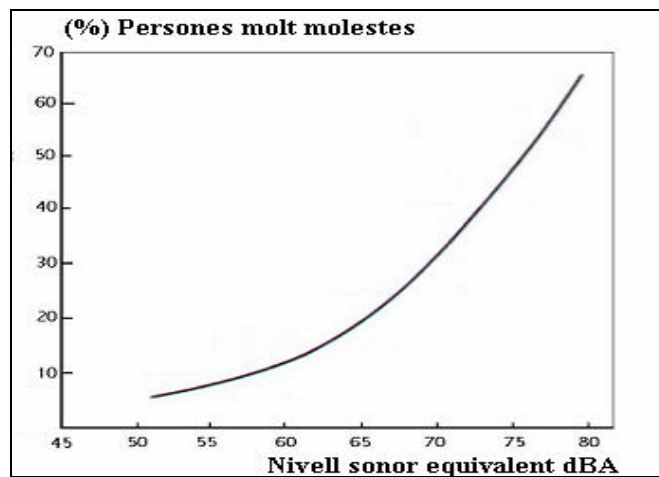
- Criteris sobre l'exposició comunitària al soroll urbà, on cal tenir en compte la qualitat de vida de la societat i les activitats que es desenvolupen en cada zona.
- Criteris de qualitat acústica interior, o soroll de fons màxim sense que esdevingui una font de molèstia. Aquestes consideracions són molt importants alhora de definir la qualitat acústica en l'interior de sales de concerts, estudis d'enregistrament, auditoris ..., i de fet, en qualsevol habitació o local on es precisin unes condicions acústiques excepcionals.
- Criteris d'exposició al soroll laboral. Aquí, cal analitzar les dosis màximes d'exposició al soroll admissibles per preservar als treballadors de contraure malalties relacionades amb la pèrdua de la capacitat auditiva o, fins i tot, la sordesa permanent en els casos més extrems.

Criteris d'exposició comunitària al soroll

S'han elaborat a partir de consideracions subjectives de grups de població sotmesos a nivells de soroll objectius anormalment alts. Els efectes que s'han tingut en compte alhora d'elaborar aquests criteris són:

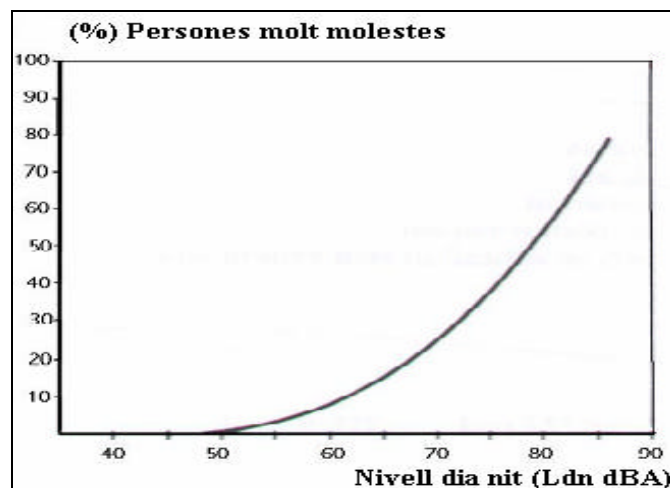
- Pèrdua d'audició degut a l'exposició continuada de soroll.
- Interferència en les comunicacions.
- Molèsties i trastorns del son i el repòs en general.
- Interferència en la concentració i el treball intel·lectual.

Aquests resultats s'han obtingut a partir d'enquestes socials orientades a esbrinar els graus de molèstia que experimenta la col·lectivitat davant els diferents sorolls. Els estudis fets a Europa i els Estats Units sobre el percentatge de persones molt molestes, degut al soroll extern mesurat en termes de nivells equivalents L_{eq} , poden representar-se gràficament.



Gràfic 3.24.- Resposta de la comunitat davant el soroll mesurat en L_{eq} .

Les mateixes enquestes indiquen que aquest percentatge és sensiblement menor si els resultats s'avaluen a partir del nivell d'exposició dia, nit L_{DN} , tal com s'aprecia en el següent gràfic.



Gràfic 3.25.- Percentatge de persones molestes mesurades segons el nivell L_{DN} .

Davant d'aquesta situació s'han elaborat criteris que determinen els nivells màxims d'emissió recomanats en diferents zones, tenint en compte l'activitat que s'hi desenvolupa. En alguns països aquestes directives són aplicables com lleis, en d'altres com ordenances i en alguns, com simples recomanacions. Alguns d'aquests criteris internacionals, mesurats en dB(A) i diferenciant entre el dia i la nit, L_{eqD} i L_{eqN} respectivament.

ACTIVITAT	ALEMANYA		SUIZA		POLÒNIA		USA	
	L_{eqD}	L_{eqN}	L_{eqD}	L_{eqN}	L_{eqD}	L_{eqN}	L_{eqD}	L_{eqN}
Residencial suburbana	50	35	55	45	50	30	65	55
Residencial urbana	60	45	60	50	55	30	65	55
Hospitals	45	35	45	35	50	30	–	–
Col·legis	–	–	–	–	55	–	60	–
Indústria lleugera	70	70	65	55	–	–	80	–
Indústria pesada	–	–	–	–	–	–	90	–

Taula 3.10.- Nivells recomanats en diferents països en funció de l'activitat.

criteris de qualitat acústica interior

Aquests criteris de confort acústic es justifiquen a partir de reconèixer que hi ha una necessitat de disposar d'uns límits recomanables pel soroll de fons, de manera que no interfereixi en el desenvolupament normal d'una activitat. Alguns dels mètodes que existeixen per avaluar aquesta molèstia són:

1.- Noise Criterion (NC)

Aquest criteri posa límits al contingut espectral del soroll de fons. Així, cadascuna de les bandes d'octava té un nivell de soroll (SPL), màxim permès i a partir d'aquests valors es determinen les corbes NC. Aquestes investigacions les ha portat a terme L'American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (A.S.H.R.A.E.). Els resultats poden presentar-se en forma gràfica o bé amb una taula on s'assigna un nivell d'emissió màxim, mesurat en dB, a cada freqüència central. Aquestes dades poden consultar-se en l'apèndix H. Dins l'interior d'alguns edificis és recomanable que els nivells de soroll estiguin dins uns certs marges acústics, als quals corresponen unes determinades corbes NC.

Tipus d'interior	Marges acústics (dBA)	Marges de corbes NC
Habitatges rurals	25 – 25	20 – 30
Habitatges urbanes	30 – 40	25 – 35
Habitacions d'hotel	35 – 45	30 – 40
Habitacions d'hospital	30 – 40	25 – 35
Sales de conferències	30 – 40	25 – 35
Teatres i cines	30 – 40	25 – 30
Esglésies	25 – 35	20 – 30
Escoles	35 – 45	30 – 40
Restaurants	40 – 50	35 – 45
Grans magatzems	40 – 50	35 – 45
Gimnasos	40 – 50	35 – 45
Estacions de ferrocarril	35 – 45	30 – 40

Taula 3.11.- Criteris de selecció de corbes PNC.

2.- Preferred noise criterion (PNC)

Aquest índex és indicatiu del nivell de soroll de fons acceptable fou creat per l'Acoustical American Society el 1971. Sovint s'utilitzen com a marc de referència i, de fet, són una petita variació de les corbes NC. En l'apèndix H es donen els nivells de SPL en dB per cadascuna de les freqüències centrals de les bandes d'octava.

Anàlogament a les gràfiques NC, existeixen uns criteris de selecció per les corbes PNC, que posen cotes als nivells admissibles pel desenvolupament normal d'una activitat dins un determinat recinte.

Tipus d'interior	Marges acústics (dBA)	Marges de corbes PNC
Estudis d'enregistrament	21 – 30	10 – 20
Oficines	38 – 47	30 – 40
Habitacions d'hotel	37 – 47	25 – 40
Habitacions d'hospital	37 – 47	25 – 40
Sales de conferències	No sobrepassar els 42	No sobrepassar els 35
Teatres i cines	No sobrepassar els 42	No sobrepassar els 20
Esglésies	No sobrepassar els 42	No sobrepassar els 20
Escoles	35 – 45	30 – 40
Restaurants	42 – 52	35 – 45
Grans magatzems	56 – 66	50 – 60
Cuines	52 – 61	45 – 55
Garatges	56 – 66	50 – 60

Taula 3.12.- Criteris de selecció de corbes PNC.

3.- Criteris ISO

S'apliquen en el àmbit europeu i tenen el mateix significat que les corbes NC i PNC. Foren proposades per especialistes holandesos. Els espectres de les corbes ISO i els nivells de soroll SPL en dB es mostren en l'apèndix H. Els criteris de selecció són similars als de les anteriors corbes.

4.- Criteris d'exposició laboral al soroll

Aquests criteris pretenen disminuir el risc que tenen els treballadors, sotmesos a nivells de soroll massa alts, de patir una disminució de la capacitat auditiva o, fins i tot, de contraure una sordesa permanent. En els Estats Units es segueixen les recomanacions del Comité on Hearing, Bioacoustic and Biomechanics (CHABA), de la National Academy of Sciences i els Threshold Limit Values (TLV'S) i de l'American Conference of Government Industrial Hygienist (ACGHI) on s'estableix que exposicions periòdiques al soroll, malgrat que siguin durant curts intervals de temps, produeixen disminucions de la capacitat auditiva amb el temps i, fins i tot, una sordesa permanent. Aquesta teoria s'anomena de l'Efecte Temporal. A Europa es segueixen les disposicions dictades per la British Occupational Safety Hygienes Society (BOSHS). Aquí es considera que el trauma acústic està provocat per la quantitat d'energia acústica rebuda, independentment de la seva distribució en el temps i rep el nom de teoria de l'Energia Equivalent. Els seus criteris d'avaluació es recullen en la norma ISO-1999.

Aquestes dues disposicions, que es detallen a continuació, s'han de considerar com guies generals a seguir i no com a límits precisos, donades les particulars susceptibilitats individuals de cada individu.

5.- Criteris d'avaluació als Estats Units

Per mesurar els nivells d'intensitat acústica utilitzen un sonòmetre ponderat amb l'escala A i la constant de temps d'integració "slow", segons les especificacions de la "American National Standard". En base a aquestes disposicions es determina que els temps d'exposició al soroll no poden excedir els valors que es mostren en la taula (3.13).

Hores per dia	Nivells sonors (dBA)
16	80
8	85
4	90
2	95
1	100
1/2	105
1/4	110
1/8	115

Taula 3.13.- Nivells de soroll i temps d'exposició permesos pels TLV.

Aquests valors s'apliquen al temps total d'exposició total, sense tenir en compte si es tracta d'exposicions contínues o intermitents, però no s'apliquen als sorolls d'impuls o d'impacte. Quan hi ha varies fonts sonores, amb diferents nivells d'exposició C_i , essent T_i el temps de durada màxima permesa per aquest nivell específic, es considera que el valor total supera el

TLV si la suma dels respectius quocients supera la unitat.

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} = \frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_n}{T_n} > 1$$

Pel que fa als soroll d'impacte o impuls aquesta normativa recomana que els temps d'exposició no sobrepassin els següents límits:

Nivells de soroll (dB)	Nº d'impulsos o impactes per dia
140	100
130	1.000
120	10.000

Taula 3.14.- Criteris d'exposició al soroll d'impacte segons els TLV.

Es considera soroll d'impacte quan l'interval entre dos impulsos sonors és superior a un segon, quan sigui igual o inferior serà considerat com un soroll intermitent i s'avaluarà com a tal. Cal fer aquestes mesures amb la constant d'integració "peak" i amb una referència de $20 \cdot 10^{-6}$ Pa. També es recomana que, sota cap circumstància, es permetin exposicions a sorolls superiors als 140 dB.

6.-Criteris d'avaluació segons la norma ISO-1999

Són els que s'utilitzen en la UE i defineixen els següents conceptes:

- **Índex Parcial d'Exposició al Soroll (IP).** Es calcula a partir del nivell de soroll, SPL_i (dBA) i el temps d'exposició T_i , en relació al període setmanal de 40 hores laborables.

$$IP = \frac{T_i}{40} 10^{\frac{(SPL_i - 70)}{10}}$$

- **Índex Compost d'Exposició al soroll (IT).** Es determina a partir de la la suma dels índexs parcials d'exposició durant una setmana.

$$IT = \sum_{i=1}^n (IP)_i$$

- **Nivell de Soroll Equivalent (L_{eq})**. Es defineix com el nivell sonor, mesurat en dBA, que si es presentés de forma contínua en una setmana de 40 hores laborals ocasionaria el mateix índex d'exposició que l'Índex Compost (apèndix S)

$$L_{eq} = 70 + 10 \cdot \log(IT)$$

Segons les disposicions d'aquesta normativa, cal fer les mesures amb resposta "Slow" i escala A. La finalitat d'aquestes mesures és aconseguir determinar l'Índex de Soroll Equivalent que, amb la taula (3.15) permet determinar el risc de pèrdua d'audició en funció del temps d'exposició.

Nivell de soroll continu equivalent (dBA)	Anys d'exposició										Risc de percentatge de pèrdua d'audició (%)
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
80	1	2	3	5	7	10	14	21	33	50	
85	1	3	6	10	13	17	22	30	43	57	
90	1	6	13	19	23	26	32	41	54	65	
100	1	14	32	42	49	53	58	65	74	83	
105	1	20	45	58	65	70	76	82	87	91	
110	1	28	50	76	85	88	91	93	95	95	
115	1	38	74	88	94	95	95	96	97	97	

Taula 3.15.- Riscos de pèrdua d'audició en funció del temps d'exposició.

3.4.2.- La lluita contra el soroll

Consideracions generals

Actualment, el soroll afecta considerablement la salut i el benestar de moltes persones, per la qual cosa la lluita contra els seus efectes és un tema d'interès general, al que dediquen els seus esforços milers de professionals en els àmbits més diversos (física, arquitectura, medicina, psicologia ...). En última instància, però, el responsable últim del control ambiental és l'Administració que mitjançant els diferents organismes de que disposa (medi ambient, obres públiques, justícia...) té de portar a terme una política de control de soroll responsable i coherent amb les necessitats dels ciutadans.

Sortosament, la tecnologia actual permet resoldre la majoria de problemes que es deriven d'un excés de soroll, conseqüentment és possible emprendre una lluita eficaç que cal fonamentar en la consciència de tots els ciutadans. A partir d'aquí una política de control de soroll, basada en tècniques de planificació, gestió i economia és possible. Per tal d'aplicar els principis científics corresponents, el procés que es segueix quan es detecta un problema acústic és el següent:

- a) Amb un treball de camp es prenen les mesures necessàries per avaluar els nivells de soroll i la identificació de les fonts més importants existents en la zona.
- b) La segona fase consisteix en la formulació d'objectius que s'han d'assolir. Normalment es tracta d'aconseguir que els nivells de soroll no sobrepassin uns mínims prefixats, mitjançant l'aplicació d'unes accions determinades.

- c) El pas consisteix en *l'aplicació dels principis tècnics* de control de soroll que resulten més escaients. Cal tenir en compte, però, que la selecció d'aquestes mesures està condicionada a factors de caire molt diferent: el cost econòmic, la seguretat de les instal·lacions (*la construcció d'una pantalla acústica pot comportar risc d'incendis*) o repercussions sobre l'operativitat dels sistemes o els processos de producció.
- d) La quarta i última fase d'aquest procés consisteix en *comprovar l'efectivitat* de les mesures adoptades on es determina si s'han assolit els objectius previstos. En cas de no complir-se aquests objectius cal tornar a repetir tot el procés des del principi. Sovint, l'existència de moltes fonts complica l'anàlisi i la diagnosi d'un problema acústic. En aquest sentit, programes informàtics com el Mithra i el Soundplan són una gran ajuda, doncs permeten recrear una àrea en un entorn virtual i fer tota mena de simulacions són una gran ajuda.

En aquests tipus d'estudis cal prendre en consideració la cadena de tres baules característica: la font de soroll, el camí de transmissió i el receptor. Així, les mesures que s'adopten poden incidir únicament sobre una d'aquestes baules o a totes elles en conjunt. Les mesures que es poden aplicar sobre la *font* acostumen a ser les més efectives i en casos extrems, sempre i quan aquesta acció sigui viable, podria implicar la substitució de la font sonora per una altra de més silenciosa. Altres solucions alternatives podrien ser un canvi d'ubicació de la font, la construcció d'un recinte protegit, millora del sistema de fixació de la maquinària...

Pel que fa al *camí de transmissió* del so, acostuma a ser la via aèria. En aquest cas la reducció del soroll pot fer-se col·locant materials absorbents o aïllants en mig del camí de propagació. Si també hi ha transmissió a través d'estructures sòlides (vibracions), cal aplicar materials aïllants i sistemes d'amortiment.

Finalment, respecte als *punts de recepció*, hi ha varies i diferents tècniques que protegeixen del soroll. Així els treballadors d'una indústria molt sorollosa acostumen a portar protectors auditius (cascos orelles...). D'altra banda, per reduir els nivells de soroll en l'interior dels habitatges es col·loquen materials aïllants sobre les parets i vidres dobles en les finestres.

El paper de les institucions

El model de gestió ambiental a Espanya és de *coordinació*. No hi han unitats administratives especialitzades en medi ambient, i s'ha optat per atorgar competències ambientals a una diversitat d'òrgans de govern que coordinen les respectives polítiques mitjançant la Comissió Interministerial del Medi Ambient. Es distingeixen doncs, quatre nivells ministerials:

- 1.- **Nivell supranacional.** Està regulat per les directives que emanen de la Comunitat Europea. És el màxim òrgan legislatiu i té especial incidència en les polítiques que, malgrat es facin en territori espanyol, tinguin una especial incidència en l'àmbit de tota la UE.
- 2.- **Nivell estatal.** L'article 149 de la Constitució estableix que, en última instància, correspon a l'estat la legislació bàsica sobre la protecció del medi ambient.
- 3.- **Nivell autonòmic.** Les diferents comunitats autònomes tenen determinades competències en matèria de protecció i política ambiental.
- 4.- **Nivell local.** És el propi de les corporacions locals que tenen atribuïdes certes competències sobre gestió medioambiental en les respectives demarcacions territorials.

Inevitablement, l'existència d'un nivell supranacional fa que les polítiques d'àmbit nacional o local s'hagin d'adaptar, o com a mínim no entrar en contradicció, amb les directives comunitàries. Això, no cal dir-ho, suposa un enorme esforç per Espanya, doncs l'aplicació dels programes d'acció medioambiental europeus tenen uns costos econòmics i jurídics considerables. Pel que fa a la resta de nivells, Espanya, igual que tots els països que han experimentat un fort desenvolupament industrial en les últimes dècades, ha tingut d'elaborar i aplicar polítiques de protecció del medi ambient coherents amb la legislació vigent, però sempre d'una manera tímida davant la possibilitat d'una frenada econòmica. Les despeses que suposen les obres i els sistemes de tractament de residus i purificació d'aire i aigua entre d'altres poden ser molt elevades. Des del punt de vista de l'organització administrativa s'ha produït una difusió de competències entre òrgans molt diferents. Aquest fet suposa, a efectes pràctics sobretot, una manca d'eficiència i una descoordinació força generalitzada.

Respecte a la *contaminació acústica*, Espanya ha estat un dels països que menys atenció i recursos ha dedicat a aquest tema (a diferència de molts altres països desenvolupats). Les referències més significatives, en aquest àmbit, es remunten al Reglament sobre Homologació dels Vehicles (Reglament de Ginebra de març de 1958, BOE 19/5/82 i 22/6/83) i a la Norma Bàsica d'Edificació NBE-CA-82 (BOE 7/9/81). L'objecte d'aquesta última és especificar les condicions acústiques mínimes que han de complir els edificis en funció de l'ús al que estan destinats.

Les instàncies administratives més pròximes al ciutadà són els ajuntaments i, de fet, són les *corporacions municipals* les institucions que mostren una major receptivitat als problemes del ciutadà i desenvolupen un paper destacat en les funcions de protecció del medi ambient. En aquest sentit, en el nostre país, Catalunya, s'està realitzant un "*cadastre acústic*" on es delimitin els nivells acústics permissibles en els diferents carrers i zones de tots i cadascun dels municipis de Catalunya. La finalitat d'aquest treball és crear una legislació eficaç que permeti actuar contra qui faci activitats que sobrepassin aquests nivells màxims preestablerts. Les disposicions fonamentals que regulen aquestes facultats legislatives són la Llei de Bases de Règim Local (abril de 1985) i el Reglament d'Activitats Molestes, Insalubres, Nocives i Perilloses (novembre de 1961)

El control del soroll a nivell municipal

En un informe del Defensor del Poble, redactat aquests darrers anys, es recull que el soroll és un dels problemes que sorgeixen amb major freqüència en les reclamacions ciutadanes a l'administració local. Per afrontar aquesta lluita, cal tenir present que qualsevol política medioambiental ha de tenir un caràcter *global i preventiu*. Per globalitat s'entén la necessitat que els municipis integrin dins un departament únic les tasques de vigilància i control dels abocaments residuals, la gestió de l'aire, aigua, sorolls, residus sòlids, espais naturals i educació medioambiental. A més han d'establir una coordinació adequada amb els diferents serveis municipals concurrents (urbanisme, sanejament...). El caràcter preventiu és del tot necessari si es volen abaratir costos, doncs és molt més barat i senzill destinar recursos per prevenir possibles desordres acústics que haver de construir mesures correctores.

Inspirant-se en aquests plantejaments qualsevol política de gestió del medi ambient (l'acústica està implícita) ha d'estar basada en les següents consideracions generals:

- 1.- Prendre per model el concepte de ciutat ecològica on l'atenció i cura del medi ambient tingui la màxima prioritat i sigui objecte de la màxima atenció possible.

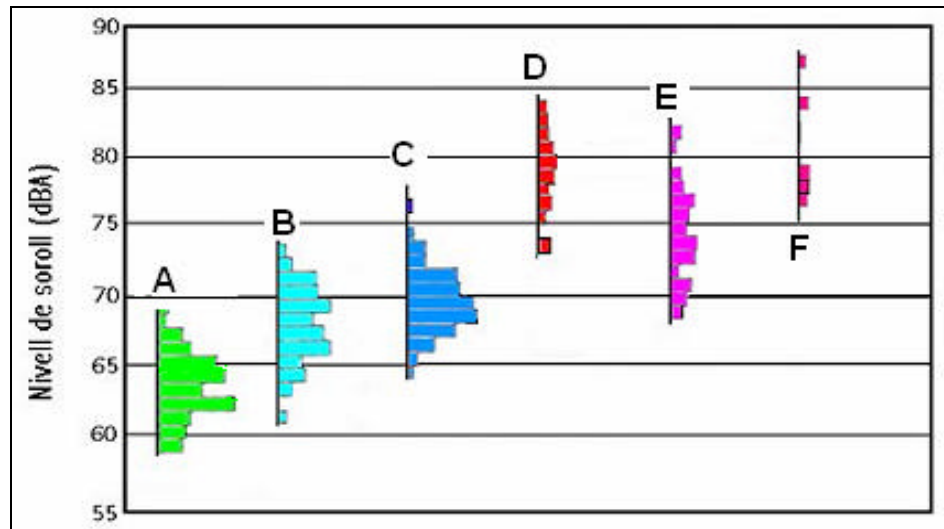
- 2.- Determinar els objectius i actuacions que, d'acord amb aquest model previst, facin possible la millora de la qualitat de vida de tots els ciutadans.
- 3.- L'existència d'un marc normatiu adequat per comptar amb un suport legal eficaç. Aquest punt és fonamental si es vol portar a terme una política acústica viable i coherent.
- 4.- Deixar ben clara en un principi la voluntat política de fer acomplir la llei amb fermesa i determinació davant les situacions irregulars.
- 5.- Fer un inventari exhaustiu i detallat de tots els problemes medioambientals de la ciutat o municipi.
- 6.- Recollir i atendre les demandes ciutadanes mitjançant enquestes periòdiques per exemple.
- 7.- Potenciar la unificació de les diferents forces socials (sindicats, associacions de veïns, col·lectius ecologistes...) per tal d'unificar els seus criteris i fer un front comú davant aquesta problemàtica.
- 8.- Sensibilitzar i educar a tots els ciutadans sobre la temàtica medioambiental utilitzant tots els mitjans i canals disponibles (televisió, premsa, escola...)
- 9.- Destinar els fons necessaris per dotar dels suficients recursos humans i materials als serveis encarregats de la gestió ambiental.

La lluita contra el soroll a nivell municipal ha d'emmarcar-se en aquestes mateixes consideracions, però tenint en compte que una actuació eficaç està lligada a una estreta *interrelació entre informació i actuació*. Pel que fa a la informació cal que es compleixin els següents objectius:

- a) Un coneixement dels nivells sonors existents, tot identificant les fonts que els produeixen amb un estudi de la variació horària, diària i estacional.
- b) Delimitació de les zones que necessiten un clima sonor especialment silenciosos (hospitals, centres docents, ...)
- c) Controlar els vehicles que produeixen nivells de soroll massa elevats (motocicletes, vehicles pesats, turismes en estat deficient ...)
- d) Fer un inventari de totes les activitats que puguin esdevenir focus de soroll (tallers, obres públiques, bars, discoteques...)
- e) Avaluar i prevenir l'impacte acústic d'algunes activitats lúdiques o recreatives (competicions esportives, fires populars, espectacles a l'aire lliure...)
- f) Estudiar la repercussió acústica de qualsevol obra urbanística (reordenació del trànsit, obertura de nous carrers...)
- g) Tenir coneixement de l'opinió dels ciutadans respecte a aquest tema, tant a nivell general com en zones específiques.

En les ciutats, la principal font de soroll, és el trànsit rodat. Bàsicament, hi ha dos punts dels vehicles on es produeix el soroll: els pistons i el tub d'escapament. Pel que fa al primer d'aquests factors, el soroll que es produeix dins la culata i la caixa dels motors és directament

proporcional al nombre de pujades i baixades del pistó dins la cavitat del cilindre o rpm (*revoluciones per minut*). Quan les ones de pressió surten pels tubs d'escapament el soroll que generen depèn bàsicament de la geometria d'aquests tubs. Per aquest fet és important que estiguin homologats segons la normativa vigent. En la figura que hi ha a continuació es mostren els nivells acústics que produeixen les diferents tipologies de vehicles agrupades en distribucions, quan circulen a una velocitat entre 50 i 60 km/h.



Gràfic 3.26.- Distribucions de nivells de soroll produïts per diferents tipus de vehicles.
(Ref. Amando García / Universitat de València)

En aquesta gràfica, la longitud de les barres horitzontals és proporcional al nombre de vehicles existents en l'actual parc automobilístic. La distribució A correspon a automòbils de turisme, la B a camions lleugers, la C a camions pesats, la D a camions d'obres públiques carregats, la E a camions d'obres públiques buits i la F a camions remolc. S'aprecia que els menys sorollosos són els vehicles lleugers, mentre que els més pesats són els que produeixen més fressa. És convenient representar la informació en mapes sonors on es recullin les característiques urbanístiques (densitat d'edificació, zones comercials i industrials, carrers principals...), els hàbits i costums dels seus habitants (horaris de treball i descans ...) i les fonts sonores més molestes. A més de les dades que proporciona l'observació directa és convenient que existeixin altres sistemes d'informació sobre aquests aspectes, tal com l'anàlisi estadístic de les activitats denunciades. Aquests mapes no s'han de limitar al centre de la ciutat o a zones especialment conflictives, sinó que han de cobrir tot el terme municipal, incloent-hi tots els nuclis de població perifèrics. En qüestions acústiques una política preventiva és altament recomanable per estalviar futures obres i construccions.

En un estudi realitzat per Gesplan el 1986 sobre la problemàtica del medi ambient als municipis espanyols es recull que els següents factors són els principals motius de protesta dels ciutadans:

- Pubs, discoteques i similars (48'8%)
- Tallers i petites indústries (24,7%)
- Trànsit urbà (12'6%)

Aquestes xifres són valors mitjans, doncs aquestes estadístiques varien molt en funció de la localitat. Finalment, la realització d'enquestes permet avaluar la molèstia del soroll sobre una comunitat i relacionar-la amb tota una sèrie de factors demogràfics, socials i culturals. En aquest sentit, un factor molt important en la prevenció de la contaminació acústica és la concessió de les llicències corresponents per part dels ajuntaments, els quals poden exigir que

l'activitat en qüestió no excedeixi per sobre d'uns límits preestablerts (per exemple mitjançant la implantació d'un aïllament acústic).

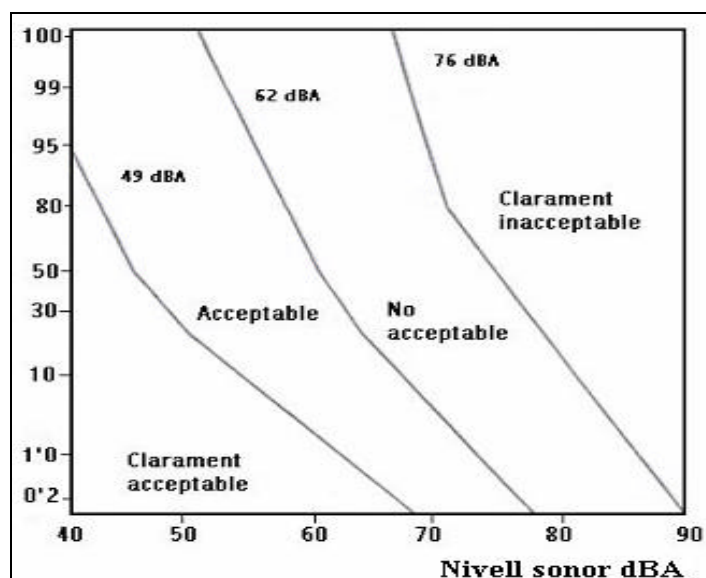
Estudis fets fa uns 10 anys sobre la problemàtica medioambiental als municipis del nostre país posaven de manifest que el 33% dels municipis on s'havia realitzat l'enquesta disposaven d'ordenances municipals, un 6% no en disposa i el 61% restant ni tan sols va contestar la pregunta. Sortosament, la situació actual es ben diferent, doncs la sensibilitat i preocupació dels ciutadans ha augmentat considerablement en els darrers anys.

Les ordenances municipals de lluita contra el soroll han de preveure, almenys, els aspectes següents:

- 1.- Disposicions generals on es defineixin les activitats regulades, els nivells d'emissió màxims tolerats, les sancions i el marc d'actuació municipal.
- 2.- Criteris generals de prevenció on es faci una relació de les activitats que cal regular: construcció, instal·lacions industrials, centres comercials ...
- 3.- Criteris de prevenció específica relatius al soroll en l'interior dels habitatges, aïllament d'habitatges i fressa dels vehicles principalment.
- 4.- Existència d'ordenances on s'especifiquin les característiques de l'equip de mesura i les condicions generals d'utilització.
- 5.- Establiment d'un règim sancionador, dins el marc de les competències de l'ajuntament, on es recullin explícitament les penalitzacions relatives a les possibles infraccions.

Nivells sonors admissibles

Els criteris fonamentals que determinen els nivells sonors admissibles es recullen en la legislació general existent sobre el tema. En aquest sentit, s'ha elaborat als Estats Units un criteri d'acceptabilitat adoptat pel Departament de l'Habitatge i el Departament Urbà (HUD) relatiu al soroll ambiental tolerable en zones residencials (excloent els avions per considerar-lo un cas especial).



Gràfic 3.27.- Criteri d'acceptabilitat d'Estats Units.

Les línies trencades (corresponents als valors dels nivells sonors equivalents L_{eq}) divideixen l'espai de la gràfica en quatre regions amb diferents nivells d'acceptabilitat. L'eix d'ordenades representa el percentatge de temps que es permet una determinada activitat per poder considerar-se dins d'una d'aquestes quatre categories. Així, per exemple, un nivell sonor de 60 dB resulta acceptable si no es supera més enllà del 50%, mentre que un nivell de 80 dB és clarament inacceptable quan es supera més del 15% del temps total. En aquest sentit, en el nostre país, s'ha elaborat la Norma NBE-CA-82, que únicament es limita a recomanar els nivells admissibles. Els resultats d'uns estudis fets en diferents països de l'OCDE sobre els efectes del soroll s'ha arribat a les següents conclusions generals:

- a) Els nivells inferiors a 55 dBA, mesurats a la façana exterior d'un edifici, permeten la pràctica de qualsevol activitat en l'interior .
- b) Entre els 55 i 60 dBA, malgrat que l'impacte del soroll encara és petit, algunes persones especialment sensibles, poden patir-ne els seus efectes.
- c) Entre 60 i 65 dBA apareixen molèsties i perturbacions significatives, especialment pel que fa al son.
- d) Per sobre els 65 dBA la molèstia és important i afecta a la majoria de la població.

L'establiment d'aquests valors dins les ordenances municipals depèn, en última instància, del tipus de zona sotmesa a consideració. En la comunitat de Madrid, per exemple, està regulat que no és possible sobrepassar els 45 dBA a les zones amb equipament sanitari, els 55 dBA en les zones residencials i de serveis terciaris, 65 dBA a les zones comercials i 70 dBA en les àrees industrials. Durant la nit, els valors d'aquests nivells permesos es redueixen 10 dBA. Pel que fa a Barcelona, les ordenances municipals simplifiquen aquesta qüestió establint un límit pel nivell sonor exterior de 55 dBA durant el dia i 45 dBA per la nit, aplicable a totes les zones, exceptuant les industrials on els límits estan fixats en 65 i 60 dBA respectivament.

Aquests normatives ,però, són bàsicament un marc de referència, doncs la seva aplicació i compliment és intrínsecament difícil i depèn en última instància de la política municipal. En aquest sentit el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya en col·laboració amb diferents universitats ha realitzat un cadastre de soroll de tots els municipis del país on, en un plànol digital, es recullen els nivells permissibles en cada punt del municipi o ciutat.

Malgrat aquestes directives i recomanacions, aquests nivells màxims recomanats s'excedeixen sovint. Així ho confirmen les mesures realitzades en l'interior dels edificis, que difereixen bastant d'aquests valors proposats.

La propagació del so

En el primer capítol s'ha vist com el nivell de pressió sonora disminueix 6 dB cada vegada que es duplica la distància. Òbviament, aquest càlcul està fet sota unes condicions ideals que difereixen força de les condicions de propagació existents en la realitat, doncs quan es propaguen per l'aire, les ones sonores, experimenten una pèrdua d'energia causada per la conducció i viscositat de l'aire i els fenòmens de relaxació propis de la rotació i vibració de les molècules. L'efecte d'atenuació de l'aire augmenta fortament amb la freqüència i malgrat que és molt important en els ultrasons, en el rang de les ones sonores resulta menyspreable.

Sobre el terreny l'atenuació del so provocada pels agents atmosfèrics (precipitacions, neu i boira), l'absorció del sòl, la vegetació i l'originada per la presència d'obstacles físics és molt

més important. En aquest sentit, cal destacar que la topografia del terreny pot afectar considerablement a la propagació de les ones sonores. L'existència de desnivells al costat d'una carretera i la presència de pujols o turons poden influir de manera decisiva en el camí de propagació de les ones una vegada han sortit de la font.

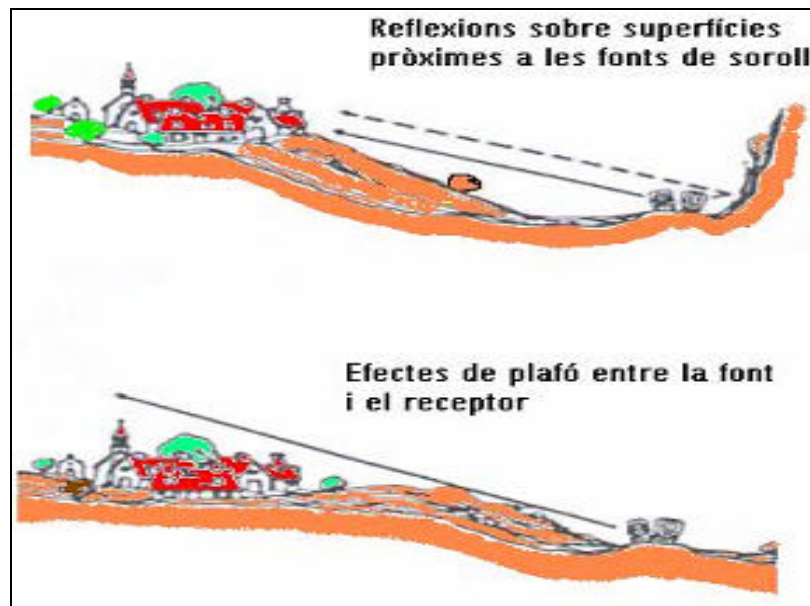


Figura 3.16.- Diferents camins de propagació de les ones sonores.

Darrerament es construeixen plafons acústics a les vores de les autopistes i vies de ferrocarril per evitar la propagació de les ones amb nivells acústics massa alts. Interposant una superfície sòlida en el camí de les ones sonores (*amb una densitat superficial d'almenys 20 kg/m^2*)

s'aconsegueix evitar la propagació rectilínia i creant una zona d'ombra acústica. L'eficàcia d'aquests obstacles depèn de la seva geometria i de la longitud d'ona del so que hi incideix i, en termes generals, aconseguen una atenuació del so que rarament sobrepassa els 10 dBA.

Malgrat que els resultats acústics no són massa encoratjadors, la reacció del públic davant els plafons és bastant favorable. Aquest efecte psicològic sembla motivat pel fet que aquestes construccions oculten visualment la presència dels automòbils i, alhora, ofereixen una relativa protecció davant els fums i la pols que s'hi genera. Hi ha diverses alternatives, que amb la mateixa finalitat, ofereixen diferents solucions: murs de formigó prefabricat, barreres absorbents de fusta, plafons de material plàstic (utilitzant en alguns casos ressonadors de Helmholtz) proporcionant, aquests últims, una atenuació suplementària. L'elecció d'una alternativa o d'una altra depèn en última instància de les possibilitats de realització pràctica i del seu cost econòmic.

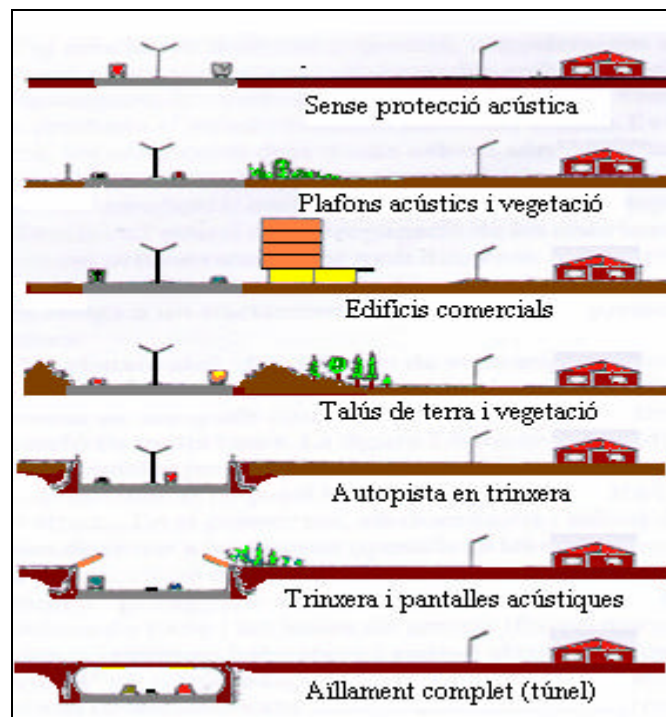


Figura 3.17.- Diferents propostes per col·locar pantalles acústiques en una autopista.

Un altre factor que cada vegada es té més en compte és l'*estètic*. En aquest sentit, les barreres vegetals ofereixen una solució viable, malgrat que la protecció acústica és molt petita, doncs per aconseguir una atenuació d'uns 10 dB caldria un espessor de 15 m de vegetació densa. Amb arbres de fulla perenne es poden aconseguir atenuacions de fins 0'9 dB per metre d'espessor de vegetació. En qualsevol cas, les plantacions vegetals són un procediment molt emprat per complementar amb altres mètodes, perquè combinen l'eficàcia amb l'estètica i tenen un impacte psicològic favorable sobre els individus.

Acústica, arquitectura i urbanisme

El volum de trànsit que acostuma a haver-hi en les ciutats i la pròpia complexitat de les zones urbanes fan molt difícil, en aquest sentit, la feina dels arquitectes i els urbanistes. Hi ha certes normes generals, però, que es poden seguir i ajuden a millorar sensiblement la situació, malgrat que en pocs casos podran resoldre completament el problema. En la següent il·lustració hi ha dues disposicions típiques dels edificis al costat d'una via de circulació.

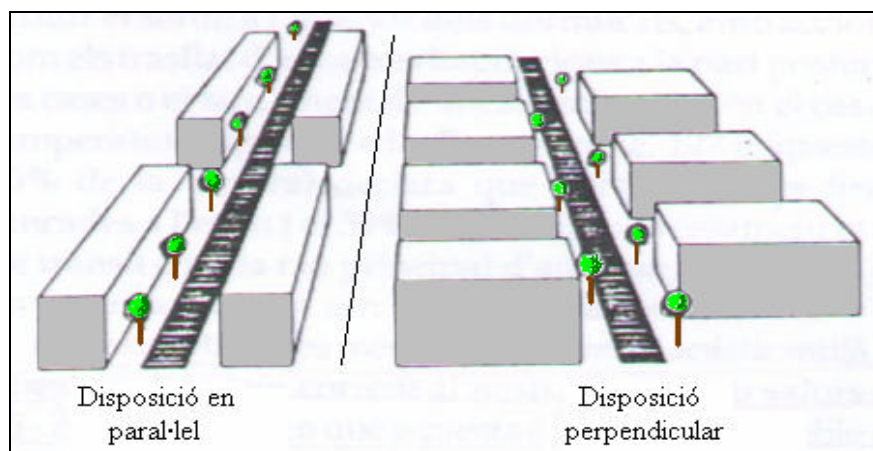


Figura 3.15.- Disposicions diferents d'edificis al costat d'un carrer.

En la disposició de l'esquerra (en paral·lel) les dependències amb major sensibilitat acústica com els dormitoris i salons d'estar han d'estar situades en les façanes oposades a les que fiten amb la principal via de circulació. Així, d'altres habitacions com la cuina i la cambra de bany, on no és necessari un ambient tan silenciós faran també la funció de pantalles. L'altre disposició, amb una distribució perpendicular, pretén evitar l'augment de pressió sonora que es produeix com a conseqüència de les successives reflexions en les parets situades junt a la via de circulació.

L'inconvenient principal que presenta aquesta darrera disposició consisteix en que les façanes principals, situades ara en el lateral dels edificis, queden força desprotegides. Cap distribució dels edificis ofereix una bona solució al problema, per la qual cosa un element fonamental de la lluita contra el soroll a les ciutats segueix sent l'*aïllament acústic* de les façanes dels edificis que, cal no oblidar-ho, també és un bon aïllament tèrmic i representa un estalvi important de les despeses que es deriven del consum energètic.

Les *finestres* són un altre factor de gran importància en aquest context, doncs cal tenir en compte que la diferència d'aïllament mitjà d'un local amb una finestra, amb vidres simples de 3 mm d'espessor, oberta o tancada pot arribar a ser de 15 dBA. Si es tracta d'una finestra amb vidres dobles de 5 i 10 mm d'espessor cadascun aquest valor pot arribar a reduir-se fins arribar als 35 dBA.

Tenint en compte aquestes consideracions, els problemes derivats de l'existència de nivells de soroll anormalment alts en l'exterior dels edificis poden esdevenir estacionals per la tendència a obrir les finestres en èpoques caloroses (la instal·lació d'aire condicionat és absolutament minoritària). En el nostre país les mesures fetes en les finestres d'ús més corrent donen uns resultats que oscil·len entre els 15 i els 20 dBA, depenent de si estan obertes o tancades, deixant palesa que és la baula més feble quant a la penetració del soroll exterior a l'interior dels edificis.

La planificació de la ciutat, que pertoca als arquitectes i als urbanistes, juga un paper fonamental en el confort acústic. El principal inconvenient s'esdevé pel fet que la majoria de les nostres ciutats suporten un volum de trànsit pel que no van ser dissenyades en el seu dia; aquesta situació pot arribar a ser insuportablement angoixant a moltes ciutats europees que encara conserven una estructura gairebé medieval, amb carrers estrets i pocs espais lliures. L'única solució viable en aquests casos extrems consisteix en reduir dràsticament la circulació rodada en la zona, tancant l'accés al trànsit barris sencers.

3.4.3.- Soroll generat pels vehicles pesats

El soroll del trànsit està originat pels vehicles que circulen per la ciutat. Tots contribueixen a incrementar el nivell acústic, però entre ells distingim que els vehicles pesats són una font de soroll molt més important que els lleugers. Seguidament es detallen les seves principals característiques acústiques.

En la majoria de ciutats una reducció de 10 dBA dels nivells de soroll generats pels autobusos que s'utilitzen avui en dia, faria que s'equiparessin als nivells emesos pels vehicles lleugers. Actualment, les regulacions europees respecte als nous autobusos permeten un nivell d'intensitat màxim de 90 dBA mesurats segons les normes ISO i, en conseqüència, aproximadament 7 dBA per sobre els cotxes privats. Les xifres de la taula (3.16) són una guia dels valors d'emissió màxims recomanats en relació al pes i la potència dels vehicles.

Pes i potència	Nivells sonors (dBA)
Inferior a 3-5 tones	84 dBA
Superior a 3-5 tones	
- motors amb menys de 200 hp	89 dBA
- motors per sobre els 200 hp	91 dBA

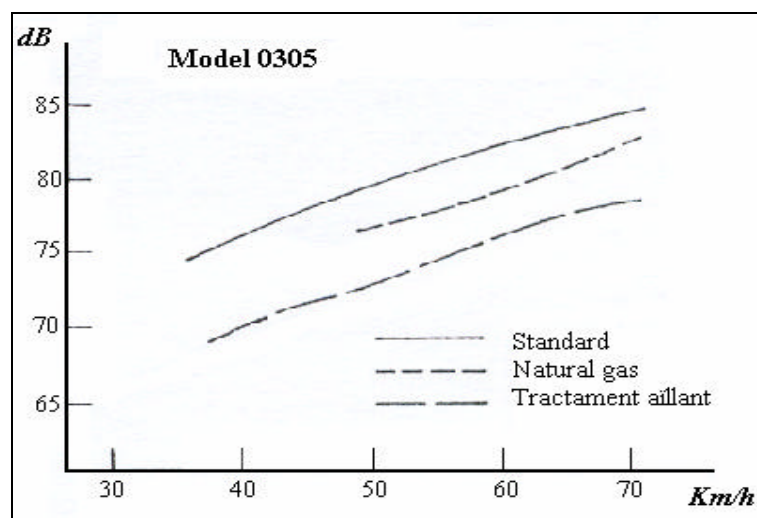
Taula 3.16.- Valors dels nivells d'emissió màxims recomanats pels vehicles pesats.

Aquests valors es refereixen a les condicions estàndard de les normes ISO relatives al màxim nivell acústic d'emissió en condicions de conducció urbana quan el motor desenvolupa la màxima potència per una marxa determinada. Cal distingir, però, entre els diferents sistemes de propulsió que utilitzen.

Autobusos Diesel

La gran majoria d'autobusos europeus fan servir motors diesel. Darrerament campanyes per promoure una millor qualitat de vida han incentivat les investigacions orientades a reduir-ne els nivells d'emissió acústica aconseguint resultats força satisfactoris, doncs s'han aconseguit fabricar motors amb una intensitat similar a la dels vehicles lleugers. Els problemes, però, estan relacionats bàsicament amb el cost de fabricació d'aquests nous autobusos. Els problemes d'aïllament es resolen més fàcilment quan hi ha més espai disponible. Així, per exemple, quan els motors es col·loquen en la part lateral a suficient alçada del terra, queda prou espai per situar una cambra absorbent de soroll per la toma d'aire i per posar-hi un pannel absorbent sota el motor. Aquesta és la solució adoptada per Mercedes Benz pels models d'autobusos 0305 i 0307, els quals han estat catalogats, segons la norma acústica ISO, amb 12 dBA per sota els nivells normals d'emissió d'aquest tipus de vehicles.

En el gràfic que s'il·lustra a continuació s'aprecia com els models que funcionen amb un motor estàndard són els que tenen uns nivells d'emissió més elevats (oscil·len entre el rang dels 75 i els 85 dB), els que utilitzen com a mitjà de propulsió el gas natural són una mica menys sorollosos, doncs només sobrepassen lleugerament els 80 dB. Únicament, després d'aplicar el tractament aïllant s'observa una reducció dràstica dels nivells acústics que disminueixen, per aquest rang de velocitats, des de 68 dB, per arribar només fins als 77 dB. Malgrat que aquesta intensitat acústica és encara força elevada representa una reducció considerable respecte els nivells d'emissió de la majoria d'autobusos.



Gràfic 3.28.- Nivells de soroll emesos pels models d'autobusos Mercedes 0305.

D'altres fabricants com Magirus Deutz han aconseguit que, per exemple, el model d'autobús Vov M. 170-SH-110 redueixi entre 5 i 6 dBA el seu nivell d'emissió després de col·locar l'aïllament acústic i Saab-Scania ha aconseguit una disminució de 8 a 10 dBA en els seus vehicles. Després d'aplicar el tractament acústic s'aprecia una reducció notable del nivell de soroll, la qual cosa representa un increment en els costos de producció que oscil·la entre el 2% i el 4% sobre el preu inicial de venda.

Autobusos propulsats amb gas

Respecte a aquest tipus d'autobusos cal destacar que l'ús de gas líquid ajuda a reduir la fressa provocada pel sistema de ventilació i l'aire condicionat. Entre d'altres avantatges, el gas líquid permet substituir el sistema d'ignició i mesclador pel sistema diesel estàndard. Així, la companyia Air Liquide ha desenvolupat en les seves instal·lacions un sistema de transport que funciona amb aquest tipus de carburant. De manera similar el Steyr "City-Bus" funciona amb gas propà o butà líquid, la companyia MAN ha convertit el model 750-HO-M10 en un vehicle no contaminant que funciona amb gas natural i la casa Mercedes ha experimentat amb gas comprimit en el seu model 0305.

A curt termini, però, les prestacions d'aquests vehicles els limiten a operar únicament en situacions on no es requereixi una excessiva velocitat, com per exemple les zones centrals de les ciutats, àrees de vianants, aeroports ...

Nous motors de calor

En aquests darrers anys s'ha intensificat la recerca en aquest tipus de motors, doncs s'espera que puguin funcionar amb uns nivells d'emissió acústica raonablement baixos. El problema radica en el tractament acústic dels ventiladors necessaris per obtenir una acceptable eficiència en el cicle de Carnot i pel fet que encara funcionat sota un règim de consum massa alt. Els nivells de soroll enregistrats en alguns projectes experimentals són encara massa elevats. Els experiments realitzats amb motors diesel, per exemple, mostren que per un règim de velocitats comprès entre els 45–50 km/h, el soroll mesurat segons la norma ISO és de 89 dBA, mentre que els nivells sonors enregistrats després d'aplicar un tractament acústic a l'aparell són encara de 77 dBA.

Autobusos elèctrics

En principi, la tracció elèctrica sembla eliminar els problemes del soroll generat pel motor i eliminen les emissions de gasos contaminants. Malgrat aquests avantatges, encara presenten problemes tècnics considerables, doncs tenen un radi d'acció limitat, la seva velocitat màxima és reduïda i necessiten un sistema complementari de calefacció alimentat amb petroli. Aquests factors contribueixen a encarir considerablement el seu cost de fabricació.

La companyia francesa Sovel ha fabricat aquest tipus d'autobusos amb una capacitat de 50 passatgers (23 seguts) capaços de desenvolupar una velocitat propera als 100 km/h. Funcionen amb quatre tones de bateries elèctriques, que es poden canviar en pocs minuts. Vint-i-un d'aquests nous vehicles han estat provats en diferents ciutats franceses amb resultats prou satisfactoris. En alemanya les companyies MAN i Bosch and Varta han desenvolupat l'"Elektrobus" que es caracteritza per portar les quatre tones de bateries en un tràiler fàcilment desmuntable. Els seus nivells d'emissió, mesurats a 7'5 metres de distància, es recullen en la taula (3.17).

Estat de funcionament	Elektrobus	Model estàndard
45 Km/h	77	86
Vehicle estacionari mantenint el ventilador i el compressor en funcionament.	60	88
Canvi de marxa a 45 km/h	78	89

Taula 3.17.- Comparació entre els nivells d'emissió acústics de l'"Elektrobus" i un model estàndard.

Una solució híbrida consisteix en fabricar un sistema de propulsió que combini un motor diesel per funcionar a velocitat constant i bateries que li proporcionin una acceleració suplementària o la capacitat de funcionar amb un mínim de soroll en les "àrees més sensibles".

IV ALTRES MODELS MATEMÀTICS

4.1.- MODELS MATEMÀTICS DE PREDICCIÓ DE SOROLL

4.1.1.- Mètode de predicció de soroll

En aquest apartat es descriuen les característiques bàsiques del soroll de trànsit on intervien factors relatius a la generació del so i a la seva propagació, considerant els següents supòsits:

- 1.- El soroll generat per un vehicle és originat per un punt que es mou amb velocitat, V , sobre una superfície reflectora, S , del que es coneix la seva posició en l'espai en funció del temps, $x(t)$.
- 2.- No es té en compte l'efecte Doppler degut a la diferència de velocitats existent entre la font i el punt receptor.
- 3.- L'únic efecte d'atenuació del soroll que es té en consideració és la distància entre el vehicle i el receptor.
- 4.- Es menysprea qualsevol tipus d'interferència (constructiva o destructiva) resultant de la interacció entre les ones directes i les reflectides amb la mateixa fase. Amb aquestes assumpcions la pressió sonora, p , mesurada a una distància r pot expressar-se com:

$$p^2(t) = \frac{DF(\mathbf{q}, \mathbf{j})W(t)rc}{2p r^2(t)} \quad (4.1)$$

on $W(t)$ és la potència acústica, pc la impedància característica de l'aire i $DF(\mathbf{q}, \mathbf{j})$ és el factor de direcció de la font. Tenint en compte les definicions del nivell de pressió sonora, L_p , i potència acústica, L_w , aquesta fórmula pot expressar-se en forma logarítmica com:

$$L_p(t) = L_w(t) + 10\log_{10} DF(\mathbf{q}, \mathbf{j}) - 10\log_{10} 2p r^2(t) = L_w(t) - 10\log_{10} 2p r^2(t)$$

s'ha suposat que el factor de direcció pot representar-se per un monopol i és aproximadament igual a la unitat. En situacions on hi ha fonts sonores predominants, amb un vector de direcció privilegiat (aires condicionats, tubs d'escapament...) cal emprar un model bipolar i el factor de direcció seria $DF(\mathbf{q}, \mathbf{j}) = \cos^2\theta$.

En el punt receptor, quan un mòbil S que es desplaça en línia recta amb una velocitat V constant, s'enregistra un nivell de pressió màxim, p_d , en el moment que el vehicle travessa la línia perpendicular a la carretera i que passa pel punt receptor.

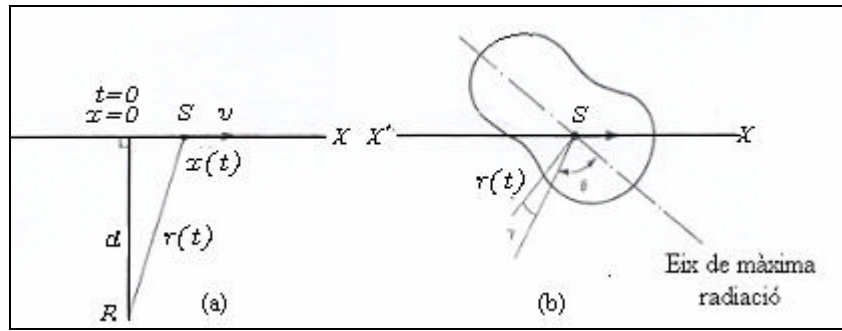


Figura 4.1.- Model geomètric d'un vehicle proper a un receptor R (a) Eix de màxima radiació (b).

Així, la pressió sonora a una distància $r(t)$ de la font es calcula a partir de:

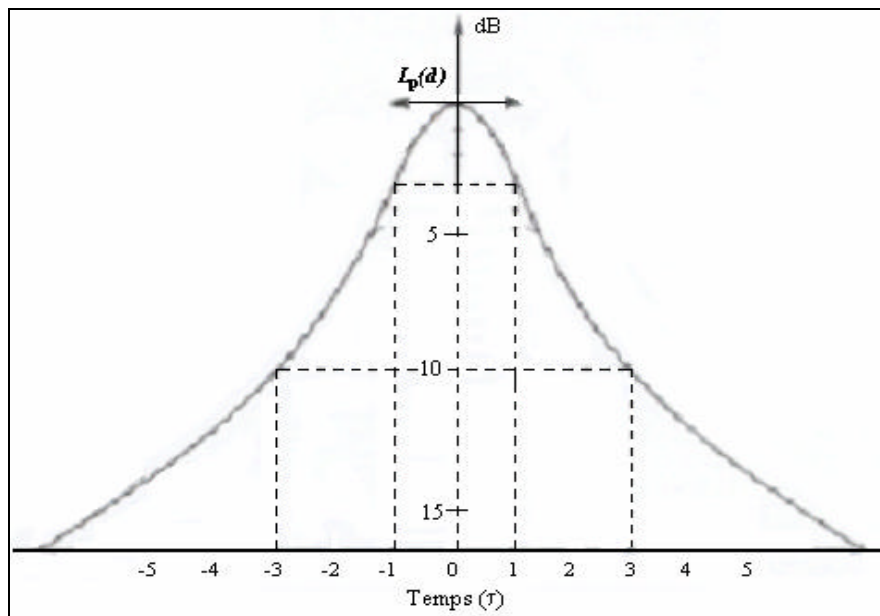
$$p^2(t) = p_d^2 \frac{d^2}{r^2(t)} = p_d^2 \frac{d^2}{x^2(t) + d^2} = p_d^2 \frac{d^2}{V^2 t^2 + d^2} \quad (4.2)$$

que aplicant la reducció d'escala logarítmica es converteix en

$$L_p(t) = (L_p)_d - 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{t}{\tau} \right)^2 \right] \quad \text{on} \quad \tau = \frac{d}{V} \quad (4.3)$$

La representació gràfica d'aquesta funció ve donada per la corba del gràfic (4.1) on els punts d'inflexió ocorren en els temps $t = \pm \tau$, mentre que el pendent és

$$\pm \left(\frac{-10}{t \log_e 10} \right)$$



Gràfic 4.1.- Evolució temporal de la corba $L_p(t)$.

Es veu que la intensitat és màxima en l' instant $t = 0$, just quan el mòbil talla la perpendicular al sonòmetre respecte l'eix de la carretera, i disminueix a mesura que s'apropa o s'allunya. El nivell de pressió sonora equivalent s'obté integrant l'expressió (4.2) durant un interval de temps $T = t_2 - t_1$ i fent la corresponent transformació d'escala logarítmica en

$$\left[p^2 \right]_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt = \frac{1}{T} p_d^2 t \left[\tan^{-1} \frac{t}{\tau} \right]_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{T} p_d^2 t a_{12}$$

resulta la següent expressió:

$$\boxed{\left(L_{eq} \right)_T = \left(L_p \right)_d + 10 \text{Log}_{10} \frac{t}{T} + 10 \text{Log}_{10} a_{12}} \quad (4.4)$$

el valor d' a_{12} representa l'amplitud angular compresa entre les diferents posicions de la font sonora en el seu desplaçament i el punt receptor a partir del temps $t = 0$ en el punt $x = 0$. Les dades del trànsit que circula dins la ciutat corresponen a un valor mig de 50 km/h i el sonòmetre ha estat situat aproximadament a 2 m de distància dels vehicles. Amb aquestes dades la constant τ té un valor de

$$\tau = \frac{d}{V} = \frac{2 \text{ m}}{1'39 \text{ m/s}} \cong 1'44$$

Els nivells equivalents s'han mesurat en un interval de temps de 10 minuts (600 s). En la figura (4.1) s'aprecia com es comença a contar el temps quan la font passa davant el sonòmetre en l' instant $t = 0$, per la qual cosa el temps que, durant la mesura, el vehicle es troba en la part positiva de l'eix d'abscisses és justament la meitat: 300 s. A aquest temps li correspon un angle donat per

$$\tan^{-1} \left(\frac{t}{\tau} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{600}{1'44} \right) \cong \frac{\pi}{2}$$

Cal tenir present que, per simetria, pot fer-se un raonament idèntic pel que fa a les x negatives, llavors el valor que correspon al factor a_{12} té un valor molt proper als 180°. En aquestes condicions la fórmula (4.3) es converteix en

$$\left(L_{eq} \right)_T = \left(L_p \right)_d + 10 \text{Log}_{10} t - 10 \text{Log}_{10} 600 + 10 \text{Log} p = \left(L_p \right)_d - 23$$

i essent el soroll proporcional al nombre de vehicles, Q , resulta finalment que el nivell acústic total provocat per un flux de vehicles idèntics en aquest període de temps T ve donat per

$$\left(L_{eq} \right)_T = \left(L_p \right)_d + 10 \text{Log} Q - 23$$

Els valors dels nivells equivalents que s'obtenen a partir d'aquesta expressió són massa elevats. Experimentalment s'ha determinat que s'obtenen valors més propers a les mesures reals si aquesta expressió es corregeix aquesta expressió segons

$$(L_{eq})_T = (L_p)_d + 10 \text{Log } Q - 43 \quad (4.5)$$

El càlcul del valor del nivell $(L_p)_d$ s'ha fet a partir dels valors dels nivells equivalents de 1 s de durada, L_{AE} s que es recullen en l'apèndix I. Per estimar el nivell acústic que enregistraria el sonòmetre en el moment just que el vehicle passa per davant l'aparell de mesura s'ha fet una transformació d'escala a l'ordre de la dècima de segon.

$$(L_p)_d = L_{Aeq,0.1s} = L_{AE} - 10 \text{Log}(0.1) + 10 \text{Log}(1)$$

Finalment, es distingeixen tres tipus diferents de vehicles als que s'aplica l'expressió (4.4). El nivell equivalent final s'obté sumant logàritmicament aquests valors.

$$L_{eq} = 10 \text{Log}_{10} \left[10^{L_{LL}/10} + 10^{L_M/10} + 10^{L_P/10} \right] \quad (4.6)$$

Els valors de $(L_p)_d$ relatius a cadascun dels tipus de vehicles considerats són:

Valors de $L_p(d)$ per cadascun dels vehicles	L_{LL}	85dB
	L_M	95 dB
	L_P	100 dB

Taula 4.1.- Nivells acústics de $(L_p)_d$.

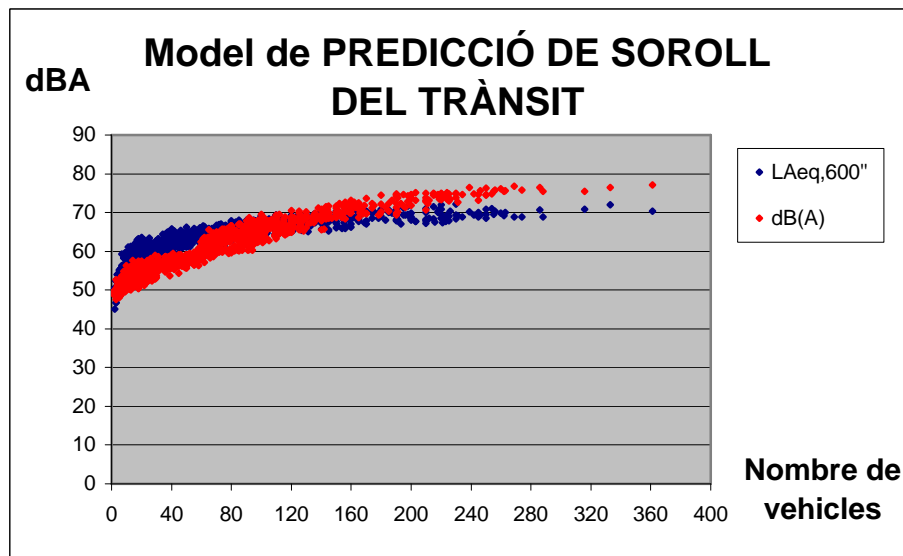
Aquest valors es corresponen gairebé exactament amb els nivells de "peak" (pic) que el sonòmetre registra en mesures de més llarga durada.

Càlculs fets a Girona: valoració i anàlisi estadístic

Aplicant aquesta metodologia de càlcul a Girona ha resultat un coeficient de correlació generalitzat igual a

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [y_i(\text{teòrica}) - m]^2}{\sum_{i=1}^n [y_i(\text{exp.}) - m]^2} = 0.77$$

que s'obté a partir del quocient entre el quadrat de les desviacions de les dades teòriques respecte a la mitjana, calculades amb aquest model de predicció, i les respectives desviacions dels valors reals. En ambdós casos la mitjana aritmètica μ correspon a les dades experimentals, enregistrades amb el sonòmetre, i és igual a 58 dB. El valor no massa alt d'aquest coeficient s'aprecia en aquest gràfic on es representen els valors teòrics o nivells equivalents referits a 600 s calculats a partir d'aquest model i les dades reals (dBA). Aquests càlculs han estat fets sobre un total de 1963 mesures.



Gràfic 4.2.- Comparació entre les mesures reals i les estimades amb el model.

Quan el nombre total de vehicles és proper als 100 aquest model teòric s'ajusta força bé als valors experimentals, però a mesura que aquest nombre augmenta o disminueix s'accentua la desviació entre els dos conjunts de dades. Aquest model de predicció fora molt millor si hi haguessin factors correctors que tinguessin en compte l'absorció atmosfèrica de l'energia de l'ona, els fenòmens d'interferència constructiva i destructiva ... Tot i que la descripció d'aquest model apareix en un llibre del doctor Bernard M. Favre, aquest no s'atribueix l'autoria del mètode.

4.1.2.-Mètode anglès de predicció

Introducció

La propagació del soroll del trànsit està condicionat per les propietats acústiques del terreny sobre el que es propaguen les ones sonores, sobretot quan el receptor es troba prop de la superfície. En àrees obertes, els efectes atmosfèrics poden produir canvis significatius, que esdevenen més importants a mesura que augmenta la distància de separació. Factors com la velocitat i la direcció del vent, gradients de velocitat i l'estratificació de temperatures són variables impredecibles que poden alterar considerablement els valors de les mesures.

El mètode de predicció de soroll que s'aplica en Anglaterra presenta un esquema de corbes de nivell per l'esmoreïment del so sobre dos tipus de superfícies: dura (asfalt) i suau (herba). Gairebé sempre, les condicions del terreny són una combinació d'aquestes dues superfícies. En aquests casos cal especificar el tipus de sòl predominant. Seguidament es detallen les fórmules sobre les quals es fonamenta aquest mètode.

Esmorteïment del soroll produït pel trànsit

Es pressuposa que el traçat de la carretera és rectilini, amb un únic carril que té un flux continu de vehicles sobre un terreny pla, tal com es representa a continuació.

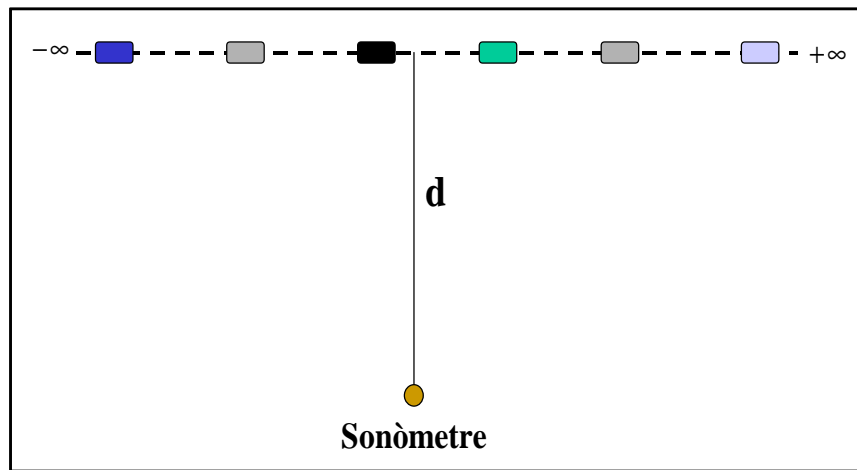


Figura 4.2.- Flux continu de tràfic.

Així, en el receptor situat a una distància d de la carretera, el nivell equivalent *estàndard*, L_{eq0} , pot calcular-se a partir de:

$$L_{eq0} = 10 \log_{10} \left\{ I_0^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\sqrt{d^2 + x^2}) dx \right\} \quad (4.7)$$

on $I_0=10^{12}$ W/m² i x és la distància, al llarg de la carretera, des d'un vehicle fins a la línia perpendicular que passa pel receptor. La funció $I(r)$ és la intensitat generada per un vehicle a una distància r i pot calcular-se a partir dels valors de diferents mesures preses a distàncies diferents. Aquest càlcul s'aplica sota unes condicions *estàndard* que suposen la propagació del so sobre un terreny dur, que el receptor es troba a 13'5 m del corrent de trànsit i a una alçada de 1'5 m sobre la superfície. Les dades obtingudes mitjançant l'expressió (4.7) són de 91'5 dBA pels vehicles lleugers i de 95'9 dBA pels pesats.

És molt difícil, però, que una mesura es pugui fer sota aquestes condicions "ideals", per la qual cosa existeixen una sèrie de factors correctors que permeten modificar-ne el valor i es detallen seguidament

- **El coeficient, C_D** , depèn de les particulars característiques del terreny. Les corbes de nivell de C_D es recullen en les gràfiques de l'apèndix J, les quals discriminen si es tracta de vehicles lleugers o pesats. El traçat d'aquestes gràfiques pot variar lleugerament en funció de la densitat, ρ , del tipus de vehicles. Aquestes gràfiques s'han fet tenint en compte que el valor de la mesura sota les condicions *estàndard* ($\rho = 1$), L_{eq0} , és de 91'5 dB(A) per vehicles lleugers i 95'9 dB(A) pels pesats.

En l'eix d'abscisses es representa l'alçada (*metres*) sobre el pla de la carretera, mentre que l'eix d'ordenades correspon a la distància que separa el receptor del flux de vehicles. Les

corbes de correcció mostren un increment en la reducció a mesura que s'apropen fins una certa distància horitzontal de la carretera. Així, per exemple, a un cotxe que circula a 80 m de la carretera li correspon una atenuació a 20 m d'alçada d'uns 11 dB, mentre que si l'altura és de només 3 m el coeficient corrector augmenta fins els 14 dB. Aquest efecte es fa palès sota

una línia que, passant pel focus, forma un cert angle, θ° , amb la superfície del terreny. En la taula (4.1) es recullen aquests valors angulars en funció del tipus de terreny i de vehicles.

	Terreny dur	Terreny tou
Vehicles lleugers	$\theta = 8^\circ$	$\theta = 1^\circ$
Vehicles pesats	$\theta = 4^\circ$	$\theta = 0'5^\circ$

Taula 4.2.- Valors angulars en funció del tipus de terreny.

En totes les posicions l'atenuació del so pels vehicles lleugers és major que la produïda pels vehicles pesats. La diferència de rangs és d'aproximadament 1 dB(A) prop de la carretera fins a 4 dB(A) que s'enregistren a una distància de 300 m. Cal esmentar que, en tots aquests casos i especialment per grans distàncies, l'aire contribueix a l'esmoreïment en una proporció d'uns 0'6 dB(A) cada 100 m.

- Un altre factor és el relatiu a la **velocitat** dels vehicles, tenint en compte que el soroll generat és proporcional a aquesta variable, pot escriure's l'equació:

$$C_v = a \log_{10} \frac{v}{v_0}$$

en aquesta expressió, α i v_0 , representen constants que depenen de la densitat de flux. En condicions *estàndard* (representatives dels valors mitjans) aquests paràmetres són:

Constants	Vehicles pesats	Vehicles lleugers
α	22'9	28'3
V_0	72'7 Km/h	84'2 Km/h

Taula 4.3.- Valors mitjans del coeficient relatiu a la velocitat.

- La darrera variable considerada en aquest model és la **densitat de flux de trànsit**, ρ , que pondera el nivell equivalent total segons l'expressió:

$$C_F = 10 \log_{10} \mathbf{r}$$

en condicions *estàndard* es considera que $\rho = 1$. Així, aquest model s'expressa com:

$$L_{eq} = L_{eq0} - C_D + C_v + C_F$$

i desenvolupant cadascun dels termes resulta:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left\{ I_0^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\sqrt{d^2 + x^2}) dx \right\} - C_D + a \log_{10} \left(\frac{v}{v_0} \right) + 10 \log_{10} \mathbf{r} \quad (4.8)$$

Aquest model, en principi, no ha estat creat per descriure el soroll en un entorn eminentment urbà. D'altra banda el factor corrector C_D depèn d'unes corbes que no estan parametritzades (gràfica 4.2), la qual cosa dificulta enormement la seva aplicació sobre una base de dades amb un gran nombre de mesures.

4.1.3.-Model del CETUR

En el segon capítol s'ha exposat la metodologia i les fórmules emprades en aquest model de predicció. L'expressió a partir de la que s'obtenen els nivells equivalents és:

$$L_{Aeq} = 50 + 10 \log(N_{LL} + E \cdot N_p) - 10 \log a + K_h + K_v \quad (4.9)$$

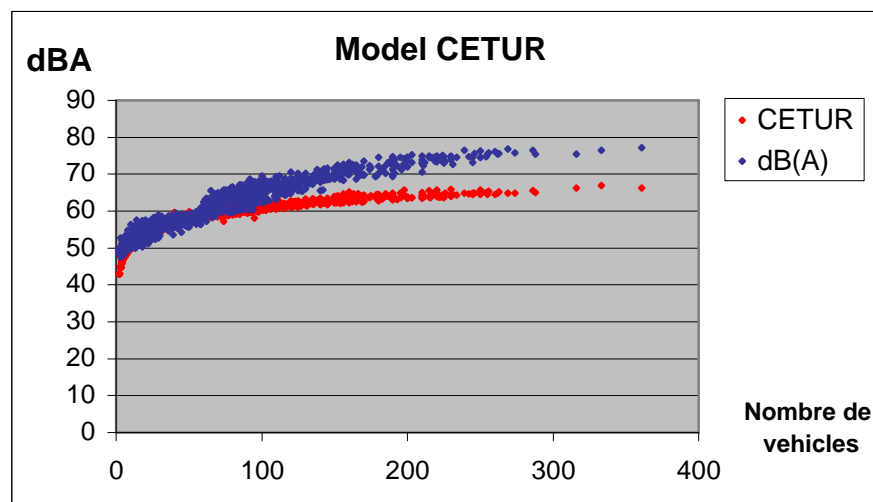
que depèn fonamentalment del nombre de vehicles lleugers i els pesats. Per poder-la aplicar efectivament en l'entorn urbà de Girona s'han pres els següents valors mitjos:

- Amplada dels carrers: 8 m $\Rightarrow -10 \log 8 = -9'03$
- Alçada mitjana dels edificis: 10 m $\Rightarrow K_h = -2(10 - 4)/8 = -1.5$
- Velocitat mitjana: 50 km/h (< 60 km/h) $\Rightarrow K_v = 0$
- Factor d'equivalència E = 10 (desnivell < 2%)

Amb aquestes dades l'equació (4.9) es converteix en: $L_{Aeq} = 40 + 10 \log(N_{LL} + 10 \cdot N_p)$

Càlculs fets a Girona: Valoració i anàlisi estadístic

Amb aquest model tampoc resulta un coeficient de correlació massa elevat, doncs té un valor d'únicament 0'70. En la gràfica pot veure's la divergència dels dos grups de dades a mesura que augmenta el nombre de vehicles.



Gràfic 4.3 - Comparació entre les dades obtingudes amb el model de predicció i els valors reals.

S'observa que per un nombre de vehicles inferior a les 100 unitats aquest model s'ajusta força bé a les dades experimentals. Si es sobrepassa aquesta valor, però, augmenta la divergència entre els dos conjunts de dades. El fet de considerar valors mitjans no afecta massa aquest rang de valors, ja que s'han fet càlculs a partir de les mesures exactes del carrer i s'obtenen uns ordres de magnitud molt similars. El major defecte que s'aprecia en aquest model és aplicar una penalització excessiva al factor relatiu a l'amplada del carrer.

4.1.4.- Estadística acústica: una perspectiva diferent

Normalment, la predicció del soroll generat pel trànsit es realitza a partir del nivell de pressió sonora que es genera en un punt d'observació fix, respecte a la posició d'un nombre variable de fonts sonores mòbils. Els resultats d'aquestes prediccions només son rellevants si aquests valors representen la mitjana, la mediana o qualsevol altre paràmetre estadístic definit i la dispersió és petita. L'objectiu d'aquest estudi és aconseguir determinar la distribució de probabilitat, la mitjana i la variança dels nivells de pressió acústica. L'esquema del model emprat en aquest anàlisi es el de la figura (4.3).

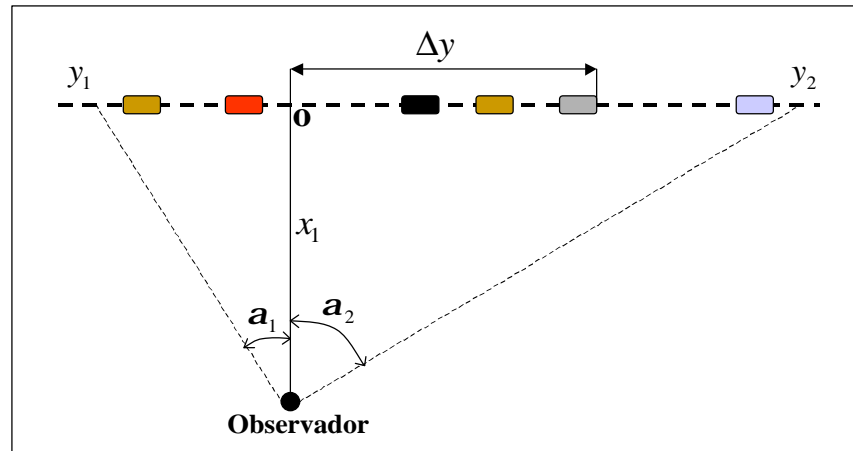


Figura 4.3 Esquema d'un flux lliure de trànsit distribuït aleatòriament sobre l'eix y

Per simplificar els càlculs, però sense pèrdua de generalitat, es suposa que la densitat de trànsit i la velocitat dels vehicles són constants. Es suposa que el factor de direcció de cadascuna de les fonts és el mateix per cada una amb un valor igual a la unitat.

Paràmetres considerats

El paràmetre fonamental que s'utilitza per descriure la densitat de tràfic és l'espai entre dos punts font: $1/\lambda$. Així, λ , es defineix com el nombre mig de vehicles per unitat de longitud sobre la carretera i el nombre mitjà de fonts, N , que hi ha en aquest interval pot expressar-se com:

$$N = I \cdot (y_2 - y_1)$$

També es fa servir el nombre mitjà M de fonts sonores sobre una longitud r_1 de la carretera igual a la distància entre l'observador i el punt més proper d'aquesta via.

$$M = I r_1 = \frac{I x_1}{\cos \alpha_{\min}}$$

l'angle α_{\min} és doncs l'angle entre l'eix de les X i la línia que passa pel punt més proper de la carretera i l'observador. Amb aquesta definició el valor d'aquest angle és zero si el punt receptor es troba entre les perpendiculars als extrems de la via. En base a aquestes definicions, si en l'interval $y_2 - y_1$ hi ha 3 vehicles ($N = 3$), separats a igual distància $1/\lambda$ i $M > 1/\pi$, llavors el nivell de pressió sonora (SPL) pot calcular-se aproximadament, amb només 1 dB de marge d'error, a partir de:

$$L_{eq} = L_{ref} + 10 \log \frac{r_0^2}{x_1} I(\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1) \text{ dB} \quad (4.10)$$

on L_{ref} representa el nivell de referència mesurat a una distància r_0 i l'amplitud angular ($\alpha_2 - \alpha_1$) avarca l'interval comprès entre y_2 i y_1 . Si la distribució de les fonts sonores és aleatòria el terme corresponent a l'espai entre vehicles pot calcular-se a partir de la suma de l'invers del quadrat de les distàncies entre cada una de les fonts i el punt receptor. Llavors el càlcul del SPL pot fer-se a partir de:

$$I(\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1) \approx \sum_{i=0}^n \frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta y_i}{x_i}\right)^2} \Rightarrow L_{eq} = L_{ref} + 10 \log \frac{r_0^2}{x_1^2} \sum_{i=0}^n \frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta y_i}{x_i}\right)^2} \text{ dB}$$

on Δy_i representa l'interval on es troba cadascuna de les variables aleatòries. Així la distribució i la densitat de probabilitat són respectivament:

$$p(\Delta y_i) = \begin{cases} \frac{1}{y_2 - y_1} & y_1 \leq \Delta y_i < y_2 \\ 0 & \text{fora d'aquest interval.} \end{cases} \quad i \quad P(n) = \frac{N^n e^{-N}}{n!}$$

en la darrera d'aquestes expressions N representa el nombre de vehicles per unitat de temps, mentre que $P(n)$ és la probabilitat de trobar n vehicles en aquest interval. Així els paràmetres estadístics de la distribució del soroll es poden calcular a partir de la intensitat.

$$I = 10^{(L - L_{eq})/10 \text{ dB}} = \frac{1}{I x_1 (\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1)} \sum_{i=0}^n \frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta y_i}{x_i}\right)^2} \equiv K \sum_{i=0}^n I_i$$

Paràmetres estadístics

Es calculen a partir de la funció característica, ϕ , que és la suma de les variables aleatòries independents amb idèntiques densitats de probabilitat.

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} P(n) \langle e^{jKtI_i} \rangle_{\Delta y_i}^n = \frac{e^{-N} \sum_{n=0}^{\infty} \left(N \langle e^{jKtI_i} \rangle_{\Delta y_i} \right)^n}{n!} = \exp \left[N \left(\langle e^{jKtI_i} \rangle_{\Delta y_i} - 1 \right) \right]$$

doncs $e^x \equiv \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$

A partir de la derivada n-èsima del logaritme d'aquesta funció en $\tau = 0$ s'obtenen els acumuladors k_n :

$$k_n = \frac{d^n \ln f(t)}{dt^n} = NK^n \langle I_i^n \rangle_{\Delta y_i} =$$

els parèntesis representen la mitjana de la intensitat ponderada per la distribució de probabilitat en cadascun dels intervals, Δy_i , al llarg de la distància compresa entre $y_2 - y_1$.

$$k_n = NK^n \int_{y_1}^{y_2} p(\Delta y_i) I_i^n d\Delta y_i = NK^n \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} \frac{d\Delta y_i}{\left[1 + (\Delta y_i/x_1)^2\right]^n}$$

el càlcul d'aquesta integral es simplifica fent aquest canvi de variable:

$$\Delta y_i/x_1 \equiv \tan a$$

que mitjançant les corresponents transformacions trigonomètriques esdevé

$$\boxed{k_n = K^{n-1} \frac{1}{a_2 - a_1} \int_{a_1}^{a_2} \cos^{2(n-1)} a da} \quad (4.11)$$

per n=1 s'obté un resultat especialment interessant

$$k_1 = K^{1-1} \frac{1}{a_2 - a_1} \int_{a_1}^{a_2} \cos^{2(1-1)} a da = \frac{1}{a_2 - a_1} \int_{a_1}^{a_2} da = \frac{a_2 - a_1}{a_2 - a_1} = 1$$

la qual cosa significa que l'equació (4.10) és representativa de l'energia mitjana i, en conseqüència, una bona estimació del nivell de pressió sonora mitjà per un nombre suficientment gran de fonts de soroll. Els acumuladors d'ordre superior es calculen emprant l'expressió (4.11) que els defineix, tot fent el canvi $n \rightarrow n+1$.

$$k_{n+1} = K^n \frac{1}{a_2 - a_1} \int_{a_1}^{a_2} \cos^{2n} a da$$

ara pot calcular-se emprant el mètode de la integració per parts amb els següents canvis de variable.

$$\begin{cases} u \equiv \cos^{(2n-1)} a \\ dv \equiv \cos a da \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} du = (2n-1) \cos^{2(n-1)} a da \\ v = \sin a \end{cases}$$

així,

$$\begin{aligned} \int_{a_1}^{a_2} \cos^{2n} a da &= \int_{a_1}^{a_2} \cos^{(2n-1)} a \cos a da = \cos^{(2n-1)} a \sin a + \int_{a_1}^{a_2} (2n-1) \cos^{2(n-1)} a (1 - \cos^2 a) da = \\ &= \cos^{(2n-1)} a \sin a + (2n-1) \int_{a_1}^{a_2} \cos^{2(n-1)} a da - (2n-1) \int_{a_1}^{a_2} \cos^{2n} a da \end{aligned}$$

al final d'aquesta successió de termes es torna a trobar l'expressió inicial, la qual cosa permet escriure,

$$\int_{a_1}^{a_2} \cos^{2n} a da = \frac{1}{2n} [\cos^{(2n-1)} a \cdot \sin a] + \frac{2n-1}{2n} \int_{a_1}^{a_2} \cos^{2(n-1)} a da$$

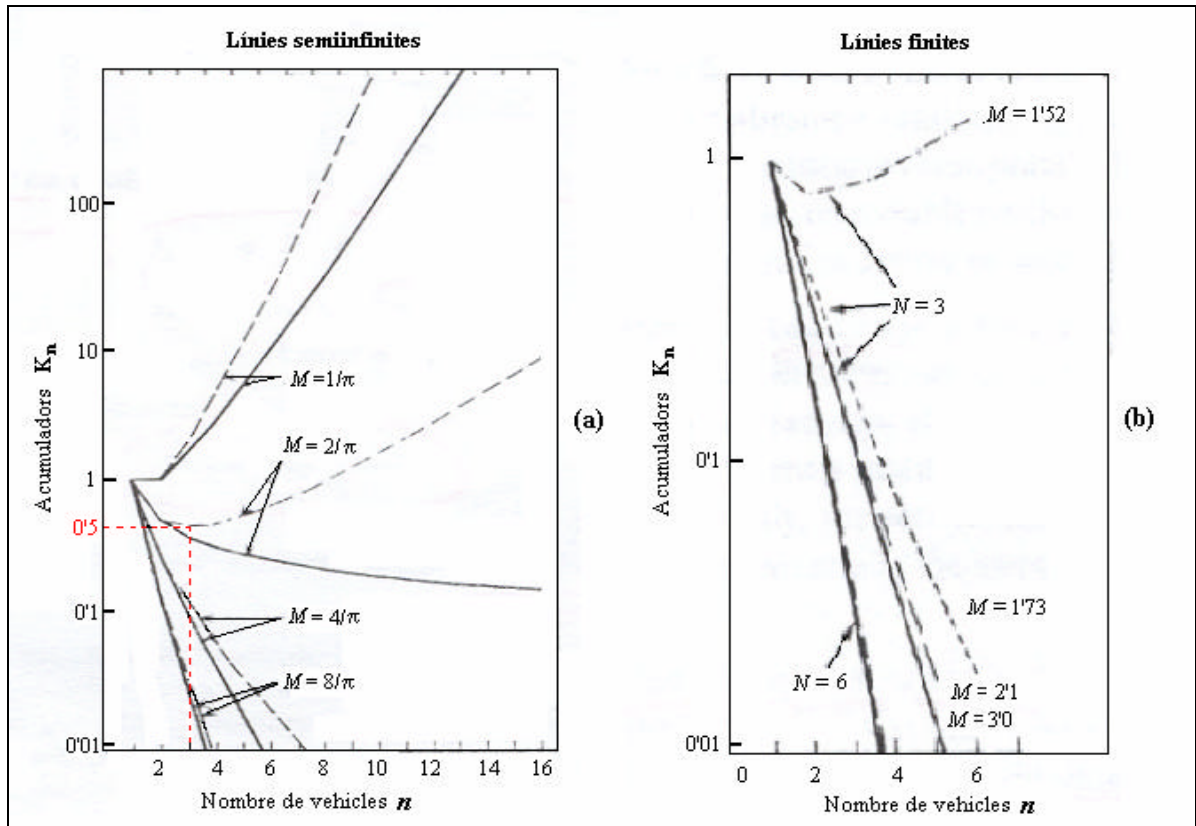
llavors,

$$k_{n+1} = K^n \frac{1}{a_2 - a_1} \int_{a_1}^{a_2} \cos^{2n} a da = K^n \frac{1}{a_2 - a_1} \cdot \left[\frac{\sin a \cos^{(2n-1)} a}{2n} + \frac{2n-1}{2n} \int_{a_1}^{a_2} \cos^{2(n-1)} a da \right]$$

que porta a una relació de recurrència entre els acumuladors, k_n

$$k_{n+1} = \frac{K}{2n} \left[\frac{\sin a_2 \cdot \cos^{(2n-1)} a_2 - \sin a_1 \cdot \cos^{(2n-1)} a_1}{a_2 - a_1} + (2n-1)k_n \right] \quad (4.12)$$

aquesta relació augmenta monòtonament quan disminueix el nombre de fonts (cotxes) o disminueix la distància a la línia de soroll (carretera). També augmenten monòtonament quan s'incrementa l'angle α_1 . D' aquesta regla general cal exceptuar-ne els dos primers acumuladors: k_1 i k_2 .



Gràfic 4.4.- Gràfiques dels acumuladors, k_n , per una línia semiinfinita (a) i per línies finites (b) al voltant de l'origen.

Les gràfiques dels acumuladors serveixen per estimar el nombre de fonts sonores, N , sobre la línia i el nombre mitjà de fonts, M , en una longitud igual a la distància entre l'observador i la font sonora més propera. Paral·lelament, coneixent el valor de M i el nombre n de vehicles es pot determinar el valor del corresponent acumulador, K_n , representatiu de la varianza de l'energia normalitzada per la seva mitjana. Per exemple, si el nombre de vehicles és $n = 2$ i el valor de $M = 2/\pi$ per una línia semi -infinita s'obté un valor de $K_2 = 0.5$.

Distribucions de probabilitat

Aquest estudi es fonamenta amb l'expressió de la densitat de probabilitat de Poisson, que s'obté de la distribució de Bernoulli quan el nombre de casos tendeix a infinit. Es parteix de les següents consideracions:

i) La probabilitat per una línia d'intensitat nul·la (carretera sense cotxes) és:

$$P(n = 0) = \frac{N^0 e^{-N}}{0!} = e^{-N}$$

ii) La densitat de probabilitat, $P(I)$ és equivalent a zero en l'interval

$$0 < I < I_{1,\min}$$

on $I_{1,\min}$ representa el nivell d'intensitat degut a una única font en l'extrem oposat de la carretera. A partir de les definicions inicials pot calcular-se el seu valor.

$$I_{1,\min} = K \frac{1}{1 + (\Delta y_n / x_1)^2} = K \frac{1}{1 + \tan^2 \mathbf{a}_2} = k \cos \mathbf{a}_2$$

iii) Anàlogament, s'obté el valor màxim de la intensitat per un únic vehicle en el punt més proper.

$$I_{1,\max} = K \frac{1}{1 + (\Delta y_1 / x_1)^2} = K \frac{1}{1 + \tan^2 \mathbf{a}_1} = k \cos \mathbf{a}_1$$

en les dues fórmules anteriors Δy_n i Δy_1 representen els intervals on es troben els vehicles situats en els extrems més allunyats i proper respectivament.

iv) Així, els valors diferents de zero de la densitat de probabilitat quan hi ha n mòbils sobre la carretera estan compresos en l'interval

$$I_{n,\min} < I < I_{n,\max} \quad \text{on} \quad I_{n,\min} = nk \cos^2 \mathbf{a}_2 \quad \text{i} \quad I_{n,\max} = nk \cos^2 \mathbf{a}_1$$

amb aquestes definicions els rangs dels valors diferents de zero no es sobreposen si

$$I_{n,\min} > I_{n-1,\max} \Rightarrow n < n_0 = \frac{x_1^2 + y_2^2}{y_2^2 - y_1^2} = \frac{1}{1 - \cos^2 \mathbf{a}_2 / \cos^2 \mathbf{a}_1}$$

S'ha considerat que la densitat de probabilitat pot aproximar-se a una funció contínua per petites discontinuïtats ($M \gg 1$) i que la funció de distribució també presenta el mateix caràcter continu ($N \gg 1$).

4.1.5.- Programació lineal

Mètode del Símplex

En aquest apartat es detallen separatament, alhora que s'integren, tècniques pròpies dels mètodes d'optimització i la teoria de grafs i xarxes amb la finalitat d'aconseguir una distribució dels carrers on l'impacte acústic provocat pel trànsit viari sigui mínim.

Plantejament general d'un problema de programació lineal

Qualsevol problema d'aquest tipus pot reduir-se a trobar un vector $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ que faci mínima la forma lineal (funció objectiu)

$$\boxed{f(\vec{X}, \vec{c}) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n} \quad (4.13)$$

subjecte a les restriccions:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1j}x_j + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \Rightarrow A\vec{X} = \vec{b} \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mj}x_j + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases}$$

on es compleixen les següents condicions: $X_j \geq 0$ amb $j \in (1, 2, \dots, n)$, $b_i \geq 0$ i $m < n$.

Així, s'anomena solució possible d'un problema de programació lineal a un vector \vec{X} que satisfà les restriccions:

$$\begin{cases} \vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \\ i \\ A\vec{X} = \vec{b} \end{cases}$$

Els conjunts convexos i la programació lineal

Definició de conjunt convexa: en un espai de m dimensions i donats els vectors $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_p$, s'anomena combinació lineal convexa d'aquests vectors a un vector

$$\vec{V} = \mathbf{a}_1\vec{v}_1 + \dots + \mathbf{a}_2\vec{v}_2 + \dots + \mathbf{a}_p\vec{v}_p \quad \text{amb } \mathbf{a}_i \geq 0$$

on els coeficients α_i verifiquen una condició característica: $\sum_{i=1}^p \mathbf{a}_i = 1$

En base a aquesta definició, un conjunt C en un espai de m dimensions, E_m , és convexa si per qualsevol parell de vectors \vec{v}_i, \vec{v}_j que pertanyen a C , la seva combinació convexa també hi pertany

$$\begin{cases} \vec{V} = \mathbf{a}_i\vec{v}_i + \mathbf{a}_j\vec{v}_j \\ \mathbf{a}_i + \mathbf{a}_j = 1 \quad \text{on } \mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j \geq 0 \end{cases}$$

Llavors, un vector \vec{V} d'un conjunt convexa C es diu que és un **punt extrem** si no pot expressar-se com una combinació convexa de dos punts de C . A partir d'aquesta definició poden enunciar-se els dos teoremes fonamentals de la programació lineal:

Teorema I: "El conjunt de les solucions possibles d'un programa lineal, si no és buit, és un conjunt convexa. Tota combinació convexa de dos solucions possibles qualsevol és també una solució possible".

Teorema II: “La funció objectiu és mínima en un punt extrem del conjunt convexa de les solucions possibles. Si a més de ser un punt extrem és mínim, llavors pren el mateix valor per tota combinació convexa d’aquests punts”.

La programació lineal i les xarxes amb capacitats màximes

Un dels objectius d’aquesta tesis és desenvolupar un mètode per estudiar la distribució del trànsit pels diferents carrers procurant que no es sobrepassin unes capacitats màximes predeterminades, donat un flux de vehicles que entra en una zona. Els principis i axiomes en base els que es fonamenta aquest mètode es detallen en l’apartat (4.2.1). Seguidament s’exposa com s’ha adaptat la teoria matemàtica pròpia de la programació lineal i el mètode símplex.

En qualsevol zona determinada per una xarxa de carrers o vies de circulació es fixen uns vèrtexs o nodes d’entrada, e , i sortida, s , a partir dels quals es distribueix tot el trànsit que entra i surt de la zona respectivament, de manera que el node d’entrada té un flux positiu, mentre que el de sortida és negatiu. Tots els altres nodes de la xarxa tenen un flux net igual a zero. Els carrers o vies es representen mitjançant arcs. Associat amb cadascun dels arcs (i,j) hi ha una capacitat màxima $c(i,j)$ que representa el nombre màxim de vehicles que poden passar per aquesta via o carrer. Qualsevol problema de xarxes es pot reduir a aquesta forma canònica, tot introduint en els extrems de la xarxa dos nodes ficticis a partir dels que es distribueix tots els vehicles. A més s’introdueix un arc de retorn fictici que uneix el node de sortida amb el d’entrada. El que es pretén, d’acord amb l’axioma 2 de l’apartat 5.1.1, es maximitzar aquest flux de sortida o retorn fins que iguala al flux entrant, fent que es verifiquin totes les restriccions imposades per les capacitats màximes permeses en cadascun dels arcs. Llavors, el problema es planteja d’una manera similar al símplex, tal com s’il·lustra en l’exemple que s’exposa a continuació. En primer lloc es considera una xarxa model:

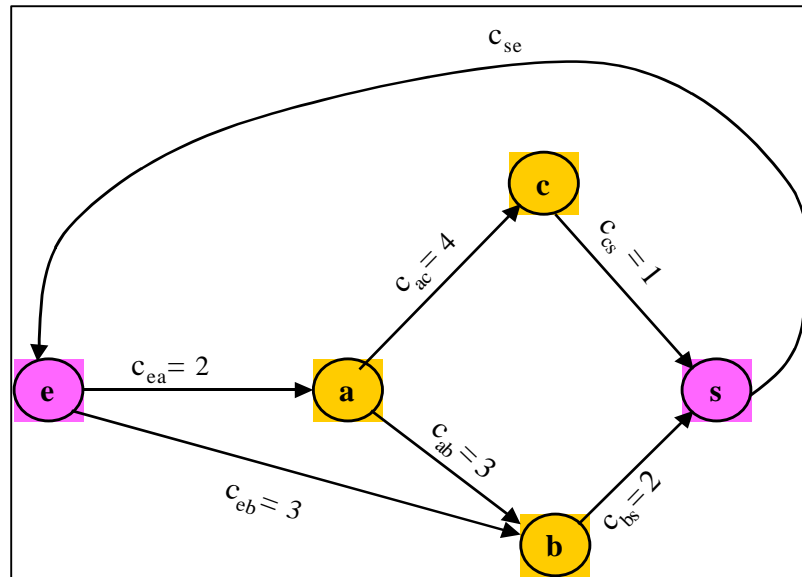


Figura 4.4.- Diagrama de flux amb les capacitats màximes de la xarxa model.

On es vol aconseguir un flux màxim en l’arc de retorn (s,e) que d’acord amb el principi exposat en el segon axioma del darrer capítol s’exigeix que sigui igual al flux que entra a la zona a través del node d’entrada, e . La matriu d’incidència, A , on es recullen les restriccions ve donada per:

$$A \equiv \left\{ \begin{array}{l} x_{e,a} \leq 2 \\ x_{e,b} \leq 3 \\ x_{a,b} \leq 3 \left(\begin{array}{l} \text{Capacitats} \\ \text{Maximes} \end{array} \right) \\ x_{a,c} \leq 4 \\ x_{b,s} \leq 2 \\ x_{c,s} \leq 1 \\ x_{e,a} + x_{a,b} + x_{a,c} = 0 \text{ (Node a)} \\ x_{e,b} - x_{a,b} + x_{b,s} = 0 \text{ (Node b)} \\ x_{e,a} + x_{e,b} + x_{e,s} = 0 \text{ (Node e)} \\ -x_{a,c} + x_{c,s} = 0 \text{ (Node c)} \\ +x_{b,s} + x_{c,s} - x_{e,s} = 0 \text{ (Node s)} \end{array} \right.$$

En aquesta matriu es recullen els diferents arcs (carrers o vies de circulació) que conformen una zona, amb signe positiu o negatiu segons el següent criteri:

$$a_{(i,(j,k))} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ -1 & \text{si } i = k \\ 0 & \text{si } i \neq j, k \end{cases}$$

La matriu d'incidència, A, segons aquest criteri vindria donada per:

$$\begin{matrix} & (e,a) & (e,b) & (a,b) & (a,c) & (b,s) & (c,s) & (s,e) \\ \begin{matrix} e \\ a \\ b \\ c \\ s \end{matrix} & \left(\begin{array}{ccccccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 \end{array} \right) \end{matrix}$$

Així el problema del flux màxim pot formular-se com:

- Maximitzar $f(x) = x_{se}$
- Subjecte a les restriccions: $\begin{cases} A\bar{x} - f(x)\bar{e} = 0 \\ 0 \leq \bar{x} \leq \bar{c} \end{cases}$

Aquí, \bar{x} , representa el flux de vehicles, \bar{e} , l'arc artificial o de retorn que va des del node de sortida al d'entrada i $f(x) = x_{se}$ el flux que circula per aquest arc, i maximitzar-lo és precisament una de les fites d'aquest treball. D'acord amb el ja esmentat axioma 2, s'ha exigit com a condició indispensable que aquest flux de sortida sigui igual al d'entrada.

4.1.6.-ANÀLISIS DE FOURIER

Superposició de modes sobre una corda

En qualsevol instrument de corda, quan es colpeja en un punt, la corda es empaitada de manera sobtada cap a un costat d'aquest punt i la seva forma no s'assembla gens a la d'una funció sinusoidal. Un instant després, però, es produeix una superposició del mode fonamental i alguns dels harmònics inferiors que es presenten simultàniament i independentment uns dels altres. Aquest fenomen es produeix degut a que l'equació bàsica de la dinàmica és *lineal*, doncs només es generen les primeres potències del desplaçament, la suma de les quals satisfà aquesta equació fonamental. Per aquest motiu aquest moviment pot considerar-se resoluble en aquestes components individuals.

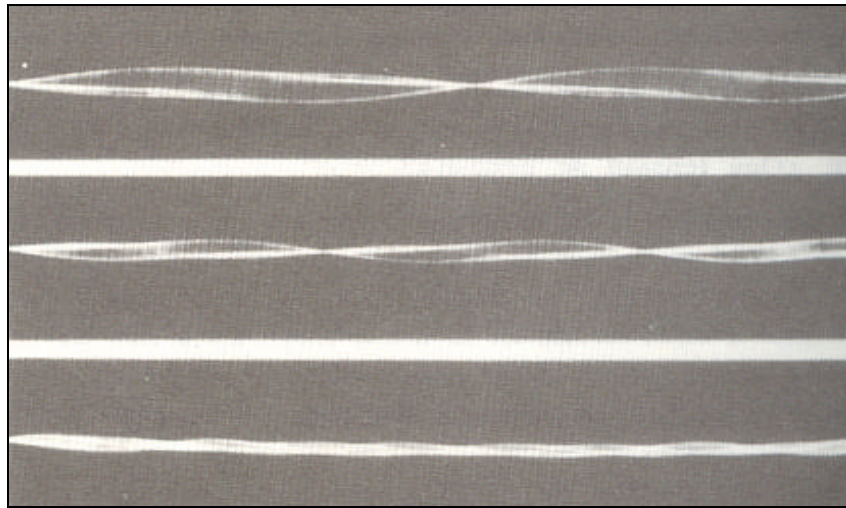


Figura 4.5.- Vibracions compostes d'una corda.

Aquest principi d'independència i superposició dels diferents modes normals d'un sistema vibrant és la base que permet l'anàlisi de pertorbacions més complicades mitjançant *l'anàlisi de Fourier*.

En les seccions anteriors s'han estudiat les vibracions naturals, anomenades també *modes normals*, de diferents sistemes físics que s'han suposat amb les següents condicions de contorn:

- 1.- Qualsevol sistema és monodimensional i de longitud finita.
- 2.- S'han considerat amb una estructura contínua i uniforme.
- 3.- Tots es trobaven sotmesos a condicions límits en els extrems.
- 4.- Estaven controlats per forces restauradores proporcionals a la separació de l'equilibri.

Cada mode està caracteritzat i unívocament definit pels següents paràmetres:

- Un nombre modal: n
- La freqüència: f_n
- La longitud d'ona: λ_n

S'ha vist que, en línies generals, la longitud d'ona depèn directament de la longitud del sistema i el nombre modal, mentre que la freqüència varia linealment amb n . Aquests resultats matemàtics, malgrat descriu un sistema físic, no deixen de ser consideracions abstractes que aplicades a la realitat poden induir a confusió, per la qual cosa cal aclarir algunes qüestions importants:

- a) Quants modes diferents pot tenir un sistema? Segons aquests estudis un nombre discret i infinit, però això no és ven bé cert. Dels estudis fets sobre partícules subatòmiques, s'esdevé que una línia de N partícules interaccionants tindria N modes normals de vibració. Per aquest fet, malgrat que el nombre d'àtoms que formen una corda pot ser elevadíssim (de l'ordre de 10^{10} per només un metre de corda) no és infinit.
- b) Quines són les longituds d'ona possibles per les vibracions estacionàries? Per respondre a aquesta pregunta podem fixar-nos en el cas d'una corda fixa pels dos extrems on s'ha vist que la longitud d'ona està donada per la relació:

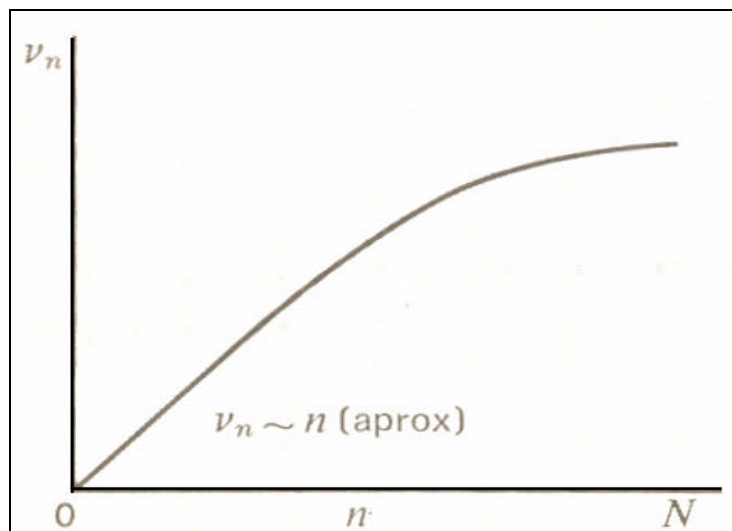
$$n \frac{l_n}{2} = L \Rightarrow l_n = \frac{2L}{n}$$

on cal tenir en compte que aquest resultat només depèn de la geometria del sistema i conseqüentment és vàlid per qualsevol valor modal. Podria semblar així que el nombre d'ones permeses és infinit, però cal no oblidar el que s'ha esmentat en la primera d'aquestes qüestions referent a que n és un valor discret i finit, per la qual cosa les longituds d'ona possibles també ho són.

- c) Es manté la linealitat de la freqüència per a modes molt elevats? Per aquest sistema amb els extrems fixes s'obtenia aquest resultat:

$$f_n = n \frac{v}{2L}$$

on v és una velocitat que es defineix per les propietats d'inèrcia i elasticitat del medi. Aquesta senzilla relació de proporcionalitat no és es compleix per nombres modals elevats. De fet, s'arriba a una freqüència límit que correspon al nombre modal més elevat possible, N, (*nombre de partícules del sistema*)



Gràfic 4.5.- Gràfica de la freqüència modal.

En la il·lustració s'aprecia que la dependència lineal amb n, només es verifica per valors baixos i deixa de tenir validesa, amb tota generalitat, quan es passa a sistemes bi i tridimensionals. Pot concloure's aquest discussió general sobre els modes normals esmentant els dos fets més importants: el paper decisiu que tenen les condicions límit i el fet que diferents modes poden coexistir donada la linealitat de les equacions.

Fonaments de l'anàlisi de Fourier

Un punt d'una corda de longitud L que vibra pot descriure's mitjançant aquesta equació on tots els modes de vibració, de moment, estan permesos:

$$y_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\frac{np_x}{L}\right) \cos(w_n t - d_n)$$

El moviment real d'una corda descrita per una funció d'aquest tipus és molt complexa i difícil de visualitzar. Per resoldre aquest entrebanc, podem imaginar que es fan fotografies mitjançant flaixos lluminosos, que ens permeten veure la configuració en un instant determinat, t_0 . Així, el terme que conté la velocitat angular i el desfasament esdevé un nombre fixa. Llavors aquesta equació pot escriure's com:

$$y_n(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{np_x}{L}\right) \quad \text{on} \quad B_n = A_n \cos(w_n t_0 - d_n) \quad (4.14)$$

És el desenvolupament d'un anàlisi de Fourier en l'espai. Hi ha un principi matemàtic, en el que es fonamenta aquest anàlisi, que diu: "Qualsevol forma d'una funció pot expressar-se mitjançant una sèrie infinita de funcions sinusoidals" Aquest resultat, aplicat a un sistema físic, és exacte si es considera un sistema continu format per infinites partícules que interactuen. El que succeeix realment, en un sistema físic real, és que sempre hi ha un nombre finit de partícules la forma de l'ona de les quals pot aproximar-se mitjançant l'equació anterior (4.14). El grau d'aproximació dependrà del nombre de termes (*modes*) que apareguin en el sumatori.

Anàlogament pot fer-se un anàlisi similar en el temps, i no en l'espai, considerant el moviment transversal de la corda donat per l'equació (4.14) pot escriure's el terme corresponent a la posició com un coeficient constant i les respectives freqüències angulars múltiples de la freqüència fonamental ω_1

$$y_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(w_n t_0 - d_n) \quad \text{on} \quad C_n = A_n \sin\left(\frac{np_x}{L}\right) \quad i \quad w_n = n\omega_1$$

D'aquest resultat s'esdevé que qualsevol moviment d'un punt de la corda és periòdic en el temps $2\pi/\omega_1$ que es pot expressar com una combinació de vibracions sinusoidals pures on es comprenen tots els harmònics possibles d'aquesta freqüència fonamental.

Fórmules de Fourier

Dur a terme aquest anàlisi consisteix en determinar aquests coeficients que multipliquen les funcions sinusoidals i cosinusoidals. És precisament aquest procés el que s'anomena **anàlisis harmònic**. Considerant el desenvolupament de $y(x)$, per trobar l'amplitud associada amb un valor concret de n , per exemple n_1 , es multipliquen ambdós membres de l'expressió per $\sin(n_1 p_x/L)$ i s'integra respecte a x al llarg de tota la corda

$$y_n(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{np_x}{L}\right) \Rightarrow \int_0^l y(x) \sin\left(\frac{n_1 p_x}{L}\right) dx = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \int_0^L \sin\left(\frac{np_x}{L}\right) \sin\left(\frac{n_1 p_x}{L}\right) dx$$

Aquesta integral pot resoldre's fàcilment gràcies a la següent transformació trigonomètrica:

$$\left. \begin{aligned} \cos(\mathbf{q} - \mathbf{g}) &= \cos\mathbf{q} \cos\mathbf{g} + \sin\mathbf{q} \sin\mathbf{g} \\ \cos(\mathbf{q} + \mathbf{g}) &= \cos\mathbf{q} \cos\mathbf{g} - \sin\mathbf{q} \sin\mathbf{g} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \sin\mathbf{q} \sin\mathbf{g} = \frac{1}{2} [\cos(\mathbf{q} - \mathbf{g}) - \cos(\mathbf{q} + \mathbf{g})]$$

Així, fent les corresponents identifications, el segon terme, aparentment complexa, es redueix a resoldre dues senzilles integrals immediates

$$\begin{aligned} \int_0^L \sin\left(\frac{n\mathbf{p}x}{L}\right) \sin\left(\frac{n_1\mathbf{p}x}{L}\right) dx &= \frac{1}{2} \int_0^L \left(\cos\frac{(n-n_1)\mathbf{p}x}{L} - \cos\frac{(n+n_1)\mathbf{p}x}{L} \right) dx = \\ &= \frac{L}{2\mathbf{p}(n-n_1)} \sin\left(\frac{(n-n_1)\mathbf{p}x}{L}\right) - \frac{L}{2\mathbf{p}(n+n_1)} \sin\left(\frac{(n+n_1)\mathbf{p}x}{L}\right) \Big|_0^L \end{aligned}$$

Quan es substitueixen els límits d'integració en les respectives funcions sinusoidals, s'obtenen uns valors de l'argument que o bé són nuls o bé són múltiples de π . Sembla doncs, que el resultat és zero. Cal fixar-se, però, en el denominador del primer terme d'aquest resultat, allí apareix la diferència $(n-n_1)$, per la qual cosa quan els valors d'aquests dos nombres modals coincideixen tenim una indeterminació del tipus 0/0 i el resultat d'aquest terme és diferent de zero. Llavors si $n = n_1$, la integral que s'ha de calcular és:

$$\int_0^L \sin^2\left(\frac{n_1\mathbf{p}x}{L}\right) dx = \frac{1}{2} \int_0^L \left(1 - \cos\left(\frac{2n_1\mathbf{p}x}{L}\right) \right) dx = \frac{L}{2}$$

el terme corresponent al cosinus és nul per múltiples enters de 2π . Per resoldre-la s'ha transformat la primera equació fent ús de la fórmula de l'angle doble

$$\sin a = \sqrt{\frac{1 - \cos 2a}{2}}$$

D'aquesta manera s'arriba a fer la següent identificació:

$$\int_0^L y(x) \sin\left(\frac{n\mathbf{p}x}{L}\right) dx = \frac{L}{2} B_n \Rightarrow B_n = \frac{2}{L} \int_0^L y(x) \sin\left(\frac{n\mathbf{p}x}{L}\right) dx$$

la darrera equació representa l'amplitud de B_n associada a un valor qualsevol de n . Si $y(x)$ és una corba empírica amb un nombre elevat de termes, el càlcul dels coeficients de Fourier es fa mitjançant ordinadors o emprant la integració gràfica. Però si la forma de $y(x)$ pot fer-se amb una funció analítica exacta, pot obtenir-se una fórmula general que permeti determinar tots els valors B_n . La funció "dent de serra" o $y=kx$, és un bon exemple per il·lustrar aquest mètode. A partir del desenvolupament dels coeficients de Fourier s'obté:

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{2}{L} \int_0^L kx \sin\left(\frac{n\mathbf{p}x}{L}\right) dx = \frac{2k}{L} \left\{ -\frac{L}{n\mathbf{p}} \left[x \cos\left(\frac{n\mathbf{p}x}{L}\right) \right]_0^L + \frac{L}{n\mathbf{p}} \int_0^L \cos\left(\frac{n\mathbf{p}x}{L}\right) dx \right\} = \\ &= \frac{2K}{n\mathbf{p}} \left\{ -\left[x \cos\left(\frac{n\mathbf{p}x}{L}\right) \right]_0^L + \frac{L}{n\mathbf{p}} \left[\sin\left(\frac{n\mathbf{p}x}{L}\right) \right]_0^L \right\} = -\frac{2KL}{\mathbf{p}} \cos\frac{n\mathbf{p}}{n} \end{aligned}$$

segons la paritat del valor de n la funció cosinus és parella o senar, fet que permet escriure aquest resultat com:

$$B_n = (-1)^{n+1} \frac{2KL}{np}$$

Donant valors a n , pot ajustar-se l'expressió de l'amplitud amb l'aproximació que es desitgi

$$y(x) = \frac{2kL}{p} \left\{ \sin\left(\frac{px}{L}\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2px}{L}\right) + \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3px}{L}\right) - \dots \right\} \quad (4.15)$$

en la taula es recullen els valors de B_n/kL pels cinc primers valors de n

n	B_n/kL	Valor
1	$2/\pi$	0'636
2	$-1/\pi$	-0'318
3	$2/3\pi$	0'212
4	$-1/2\pi$	-0'159
5	$2/5\pi$	0'127

Taula 4.4.- Valors dels coeficients numèrics de B_n/kL .

El fonament d'aquest mètode és poder ajustar qualsevol funció mitjançant els termes d'una sèrie trigonomètrica. En les gràfiques que hi ha a continuació s'aprecia el fet que a mesura que augmenten el nombre de termes del desenvolupament el perfil ondulat es va ajustant millor a una línia recta. En el límit (*infinites termes*) coincidiria exactament.

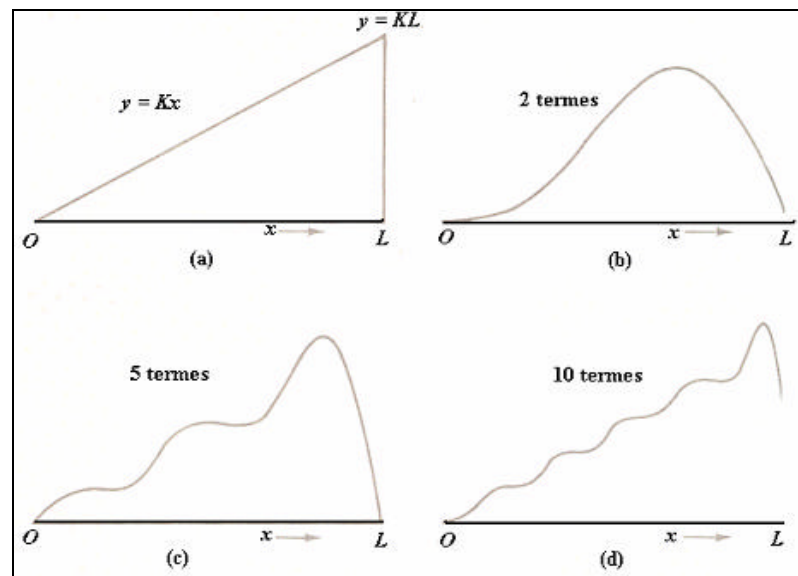


Figura 4.6.- Síntesis parcial de Fourier.

En la figura (a) està representada la funció original, mentre que en les gràfiques (b), (c), i (d) corresponen a les funcions que s'obtidrien emprant 2, 5 i 10 termes respectivament del desenvolupament donat per l'expressió (4.15).

4.2.- MODELS DESENVOLUPATS PER L'AUTOR

4.2.1.- Model de predicció del soroll del trànsit (J.R.)

Amb aquest mètode de mesura del soroll del trànsit s'aconsegueix determinar el nivell de pertorbació acústica (dBA) en qualsevol carrer coneixent únicament la densitat i el tipus del flux de vehicles que hi passen. Les dades obtingudes s'apropen als valors reals amb una precisió considerable, molt superior a les altres tècniques esmentades al principi d'aquest mateix capítol i es fonamenta en la teoria que es detalla a continuació. En un punt on incideixen ones sonores que provenen de fonts incoherents diferents, donat que el so pot descriure's com una ona de pressió, el nivell acústic total pot calcular-se a partir de la suma quadràtica de les pressions parcials.

$$p_T^2 = \sum_{i=1}^n p_i^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2$$

A partir d'aquesta definició, i aplicant la reducció d'escala logarítmica, s'obté la intensitat total mesurada en decibels o nivell sonor equivalent, $L_{Aeq, T}$, en un interval de temps t .

$$L_{Aeq, T} = 10 \text{Log}(p_T^2) = 10 \text{Log}(p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2) = 10 \text{Log} \left[\sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \right] \quad \text{on } L_i \equiv 10 \text{Log}(p_i^2)$$

Ara, pot definir-se el nivell sonor d'un succés referit només a 1 segon, L_{AE} . La seva expressió es determina considerant que la pressió acústica és directament proporcional al nombre de vehicles e i inversament proporcional al temps. Després es veurà que aquest supòsit, tot i ser una bona descripció del fenomen físic real, no s'ajusta massa a la realitat en les situacions on el nombre de punts emissors o fonts sonores és baix.

$$p_{eq}^2 = p_{AE}^2 \cdot \frac{N}{T} \quad \Rightarrow \quad p_{AE}^2 = p_{eq}^2 \cdot \frac{T}{N} \quad \Rightarrow \quad 10 \text{Log}(p_{AE}^2) = 10 \text{Log}(p_{eq}^2) + 10 \text{Log} \left(\frac{T}{N} \right)$$

$$\boxed{L_{AE} = L_{Aeq, T} + 10 \text{Log} T - 10 \text{Log} N} \quad (4.16)$$

En aquesta mesura es fonamenta aquest mètode de mesura del soroll del trànsit. En primer lloc s'ha mesurat el L_{AE} de cadascun d'aquest tipus de vehicles: vehicles lleugers (V_{LL}), motocicletes (V_M) i vehicles pesats (V_P). Aquests valors s'han determinat a partir de la mesura de 10 nivells equivalents de 10 s de durada mesurats en diferents carrers de Girona, poc transitats, escollits a l'atzar. Les condicions en que s'han efectuat aquestes mesures són les següents:

- El sonòmetre s'ha situat a 1 m de distància de la carretera, a 80 cm de la paret situada al darrera i aproximadament uns 2 metres de distància respecte els vehicles.
- La constant d'integració de l'aparell s'ha col·locat en mode *fast* (125 ms)
- Els valors del L_{AE} dels vehicles lleugers, les motocicletes i els vehicles pesats s'han obtingut quan només circulava un únic vehicle de cadascun d'aquest tipus.
- Les mesures s'han enregistrat sobre vehicles que circulaven a una velocitat compresa entre els 40 i 50 km/h.
- El temps de mesura, 10 s, és el mínim que permet el sonòmetre (*Briuel-Kjaer -2231*).
- No existeixen fonts sonores diferents que el propi trànsit rodant.

Seguidament, per cadascun dels diferents tipus de vehicles, s'han calculat els valors mitjans d'aquestes mesures a partir dels quals s'han determinat els respectius nivells L_{AE} .

L_{AE} vehicles lleugers (cotxes)

El valor mitjà de les deu mesures és:

$$\langle L_{Aeq,10} \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{N} = \frac{63'2 + 64'3 + 70'5 + \dots + 60'1}{10} \approx 65 \text{ dB}$$

Totes les dades corresponents a aquests enregistraments es troben en l'apèndix I. Cal tenir present que aquest nivell equivalent correspon a un temps de 10 segons de durada generat per l'energia acústica d'un cotxe. Pot referir-se a 1 s, L_{Aeq1} o L_{AE} , fent la següent transformació:

$$L_{AE} = \langle L_{Aeq,10} \rangle + 10 \log T - 10 \log N = 65 + 10 \log 10 - 10 \log 1 = 75 \text{ dB}$$

Anàlogament es calculen els respectius valors pels altres dos tipus de vehicles considerats.

L_{AE} motocicletes

En aquest cas el valor mitjà de les 10 mesures és:

$$\langle L_{Aeq,10} \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{N} = \frac{70'4 + 73'6 + 75'7 + \dots + 72'6}{10} \approx 72 \text{ dB}$$

i el corresponen valor del L_{AE} resulta

$$L_{AE} = \langle L_{Aeq,10} \rangle + 10 \log T - 10 \log N = 72 + 10 \log 10 - 10 \log 1 = 82 \text{ dB}$$

L_{AE} vehicles pesats (camions i autobusos)

Ara, el valor mitjà dels nivells equivalents sobre 10 s és:

$$\langle L_{Aeq,10} \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{N} = \frac{83'2 + 75'9 + 83'5 + \dots + 79'6}{10} \approx 80 \text{ dB}$$

resultant un valor de

$$L_{AE} = \langle L_{Aeq,10} \rangle + 10 \log T - 10 \log N = 80 + 10 \log 10 - 10 \log 1 = 90 \text{ dB}$$

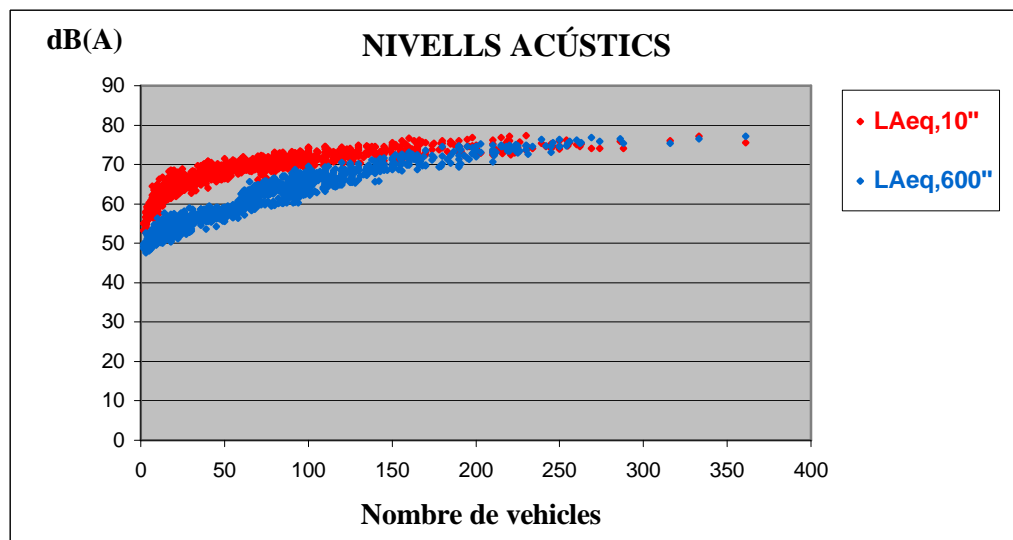
Ara, els nivells equivalents, L_i , referits a 10 minuts (600 segons), per un nombre determinat de vehicles del mateix tipus poden estimar-se emprant la mateixa definició del L_{AE} .

$$L_{LL} = L_M = L_P = L_{AEi} - 10 \log 600 + 10 \log N_i \quad (i = LL, M \text{ i } P)$$

La variable N_i es refereix al nombre de vehicles lleugers, els vehicles pesats i les motocicletes pels valors del subíndex iguals a: LL , P i M respectivament. Llavors el nivell equivalent global, que per tractar-se d'unitats logarítmiques no es pot obtenir sumant aritmèticament, s'obté a partir de:

$$L_{Aeq,10'} = 10 \text{Log} \left[\sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \right] = 10 \text{Log} \left[10^{L_{LL}/10} + 10^{L_M/10} + 10^{L_P/10} \right] \quad (4.17)$$

on L_{LL} , L_M i L_P són els nivells equivalents a 10 minuts de cadascun dels tres tipus de vehicles. Comparant els resultats que s'obtenen d'aquesta fórmula amb les dades reals s'observa que per un nombre reduït de vehicles resulten valors massa elevats, mentre que si aquest nombre augmenta considerablement el valor que se'n deriva pot esdevenir, fins i tot, inferior.



Gràfic 4.7.- Intensitat acústica, dB, en funció del nombre total, N , de vehicles.

Els dos tipus de dades representades en aquest gràfic representen nivells equivalents de 10 minuts de durada, però amb la diferència que unes s'han obtingut a partir d'enregistraments de 10 segons de durada i posteriorment se'ls ha aplicat una transformació d'escala, mentre que les altres són nivells equivalents reals enregistrats durant períodes de 10 minuts, d'acord amb les dades que apareixen en el treball de tesi del Dr. J. Blanco.

Per un nombre de vehicles inferior a 100, s'aprecia clarament la diferència d'intensitat (dB), havent-hi una diferència de l'ordre de 5-10 dB entre les dades enregistrades amb un temps de mesura de 10 segons (*vermell*) i les obtingudes a partir d'enregistraments de 600 segons de durada (*blau*). A mesura que s'incrementa aquest nombre s'observa que aquesta diferència disminueix i per valors superiors als 200 vehicles pot esdevenir, fins i tot, inferior. Les dades reals s'ajusten als resultats que s'obtenen amb aquesta fórmula quan el nombre de vehicles oscil·la al voltant dels 130 (73 % vehicles lleugers, 22% motocicletes i 5 % vehicles pesats aproximadament). Les desviacions que s'observen per sobre i per sota d'aquesta xifra poden entendre's si es té en compte la situació real en que s'han pres les dades i el model ideal donat per la fórmula (4.16) a partir del que s'extrapolen aquests resultats.

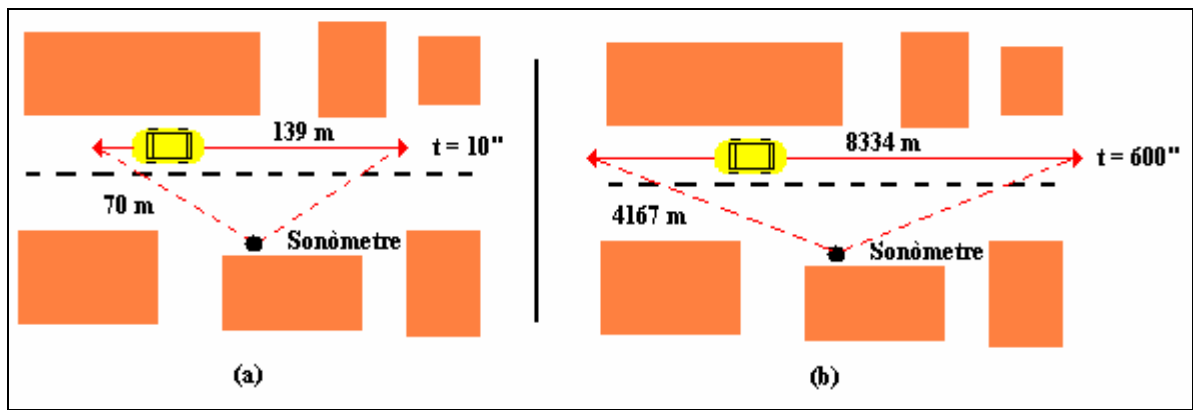


Figura 4.7.- Temps de mesura corresponent a 10'' (a) i 600'' (b).

En aquesta il·lustració (figura a) s'aprecia com un únic vehicle passa davant l'aparell de mesura durant 10 segons. Suposant una velocitat mitjana de 50 km/h recorre una distància de només 139 m essent la distància màxima que recorre l'ona sonora de 70 m. La situació representada en la figura (b) il·lustra les condicions en que s'han enregistrat les mesures empíriques, corresponents als nivells equivalents de 10 minuts de durada. En aquest segon cas, les ones sonores poden recórrer una distància molt major fins que arriben a l'aparell de mesura, la qual cosa suposa que durant un temps molt superior estan sotmeses a diversos fenòmens dissipatius (fonamentalment d'absorció atmosfèrica i interferència constructiva i destructiva) que distorsionen els valors de la mesura, sobretot quan el nombre de vehicles és baix. Així, s'observa que l'expressió (4.16) és una bona transformació d'escala dels nivells equivalents per valors superiors als 250 vehicles. En ambdós casos, tant per les mesures de 10 s o 600 s de durada, l'absorció de l'atmosfera no és un factor massa important, perquè la dissipació, deguda a la fricció, de les molècules portadores de l'ona sonora en l'aire és màxima en el rang de les altes freqüències. Aquest fet s'aprecia observant els espectres acústics, en banda d'octava, propis d'un reduït nombre de vehicles d'una banda i d'un elevat flux de vehicles per l'altre (apèndix X). En els dos casos les freqüències predominants oscil·len en el rang de les baixes freqüències, al voltant dels 1.000 Hz.

Així, davant la necessitat ineludible d'incloure un factor corrector, s'ha optat per agafar uns valors del L_{AE} fixos i ajustar les dades teòriques i les reals mitjançant una estimació logarítmica. En aquest càlcul de regressió les variables independents són el nombre de vehicles lleugers, N_{LL} , motocicletes, N_M , i vehicles pesats N_P , mentre que la variable dependent són les desviacions entre els valors empírics reals i els estimats teòricament. S'obté així un factor corrector, F_C , que depèn dels següents paràmetres:

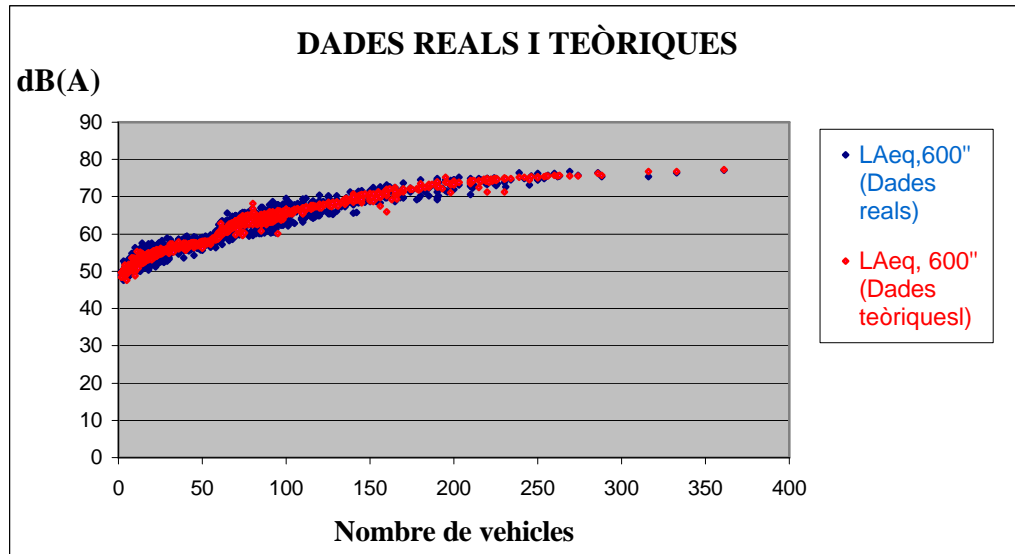
$$F_C = C_0 \cdot C_{LL}^{N_{LL}} \cdot C_M^{N_M} \cdot C_P^{N_P} \quad C_0, C_{LL}, C_M, C_P \text{ constants} \quad (4.18)$$

Els valors de les constants, C_i , s'han determinat a partir de més de 2.000 mesures enregistrades en diferents èpoques de l'any a la ciutat de Girona però sempre dins la franja diürna (7.00 am – 10.00 pm). Per millorar el grau d'ajustament d'aquest factor corrector s'han fet diferents estimacions tenint en compte el nombre total de vehicles, N (apèndix K). Així, aquest factor corrector és en realitat una funció multivaluada que pren valors diferents depenent del nombre de vehicles. Les diferents constants s'han determinat a partir de vàries regressions logarítmiques entre les variables. D'aquesta manera, s'obté una funció, $S_{so}(N_{LL}, N_M, N_P)$ que permet fer una estimació del soroll que es genera en un carrer urbà en funció únicament de les característiques i el nombre de vehicles que hi passen.

$$S_{so} (dB) = L_{Aeq, 10'} + F_C =$$

$$S_{so} = 10 \text{Log} \left[10^{\frac{L_{LL}(N_{LL})}{10}} + 10^{\frac{L_M(N_M)}{10}} + 10^{\frac{L_P(N_P)}{10}} \right] + C_0 \cdot C_{LL}^{N_{LL}} \cdot C_M^{N_M} \cdot C_P^{N_P} \quad (4.19)$$

En el següent gràfic es comparen els valors dels nivells equivalents reals, $L_{Aeq,10}$, amb els calculats mitjançant el model.



Gràfic 4.8.- Comparació entre les dades reals i les calculades amb el model.

S'aprecia que les dades teòriques s'ajusten amb força exactitud als resultats experimentals reals. Aquest fet es detalla en l'apartat corresponent a l'anàlisi estadístic. Els valors obtinguts mitjançant aquesta expressió s'ajusten força bé als nivells que es poden enregistrar en qualsevol via urbana de característiques similars. En l'apèndix L es poden veure els resultats obtinguts aplicant aquest mètode en les ciutats de Vic i Figueres. Els valors del L_{AE} s'han mesurat en carrers, per la qual cosa implícitament es tenen en compte les reflexions de les ones sonores en les parets dels edificis. Aquest augment de la intensitat acústica degut als fenòmens de reflexió en les façanes s'ha estudiat separatament en el proper apartat on s'ha desenvolupat un model per estimar l'augment del nivell d'intensitat sonora.

Càlcul d'errors

Aquest càlcul es fa seguint la metodologia descrita en l'apartat (3.2.1) a la funció (4.19). Tenint en compte que aquesta expressió depèn de tres variables que són: el nombre de vehicles lleugers, els pesats i les motocicletes. Així, el desenvolupament de la diferencial total és:

$$|\Delta S_{so}| = \left| \frac{\partial S_{so}}{\partial N_{LL}} \right| |\Delta N_{LL}| + \left| \frac{\partial S_{so}}{\partial N_P} \right| |\Delta N_P| + \left| \frac{\partial S_{so}}{\partial N_M} \right| |\Delta N_M|$$

el desenvolupament i els càlculs de les derivades parcials estan fets en l'apèndix AA. Així, estimant un error a l'hora de comptar els vehicles, durant una mesura de 10 minuts de durada, igual a 2 unitats per cadascun dels tres tipus, resulta que:

$$\Delta N_{LL} = \Delta N_M = \Delta N_P = 2$$

Es considera que l'amplitud del carrer és a i l'alçada dels edificis h . Les ones sonores generades pel vehicle que passa pel mig de la via es propaguen en totes direccions i experimenten reflexions fins arribar al punt P , situat a 1 m de la vorera i de la paret, on es calcula l'increment de soroll. Es considera que aquests raigs d'ona reflectits des de la paret de la façana recorren una distància r amb un angle d'elevació θ . S'ha emprat la notació següent per simbolitzar els diferents grups d'ones:

- Les ones que arriben directament al sonòmetre des del vehicle: L_P
- Les ones reflectides en la façana del costat esquerre es representen per: L_{RE}
- Les ones reflectides en la façana del costat dret estan simbolitzades per: L_{RD}

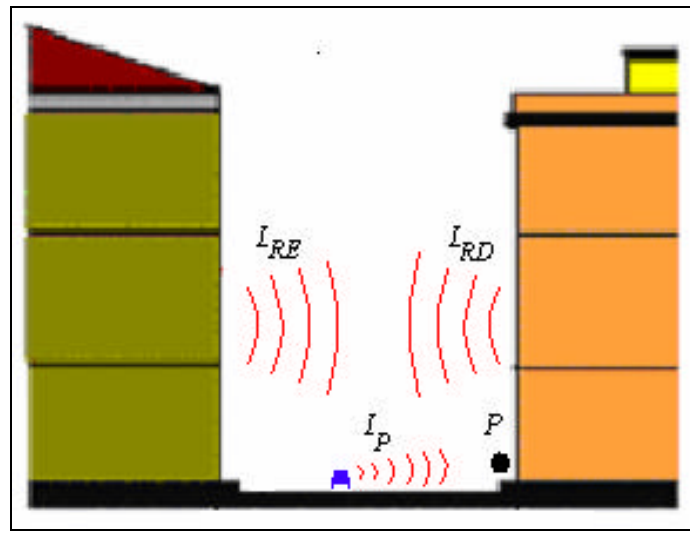


Figura 4.9.- Diferents grups d'ona considerats en el model.

Per fer el càlcul de les reflexions experimentades per les ones de pressió acústica quan reboten sobre la superfície de les façanes s'ha considerat un model lineal, a partir del qual les ones sonores incideixen sobre les parets formant línies. El valor total d'aquestes reflexions s'obté integrant les respectives funcions de soroll respecte la distància que recorren les ones, r , i els diferents angles d'elevació, θ , doncs cal fer aquest càlcul en ambdues bandes del carrer.

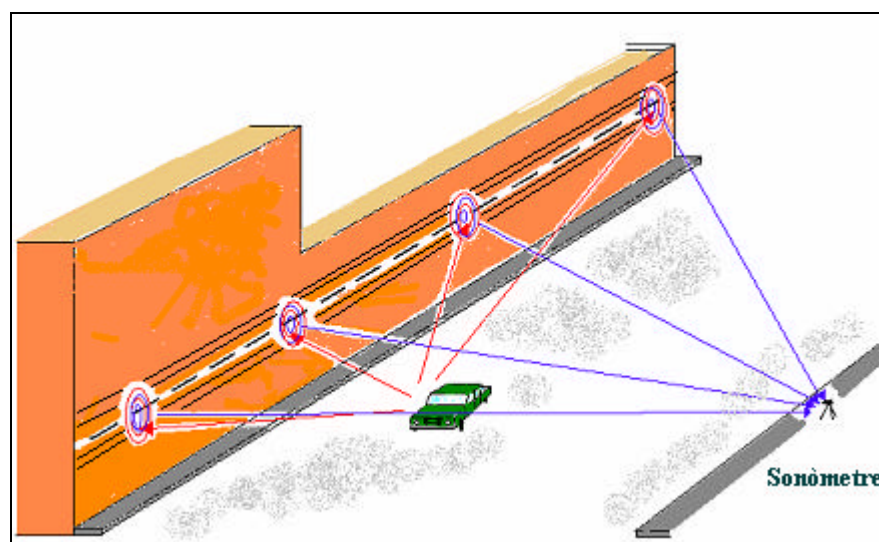


Figura 4.10.- Representació de les reflexions de les ones sonores en les façanes.

Així la intensitat total dels nous fronts d'ona que es generen en la superfície de les parets es determina a partir de la suma de les següents ones parcials:

- L'ona de pressió que arriba directament des del vehicle al punt P, durant 10 segons, representada per:

$$L_p = L_{Aeq,10''} - \frac{\partial L}{\partial r} r$$

- L'ona reflectida en les parets laterals, $L_R(r, \mathbf{q})$, el valor de la qual s'obté directament integrant sobre totes les línies dels nous fronts d'ona generats per les ones incidents sobre cadascuna de les façanes.

$$\Delta L_R = 10 \text{Log} \int_1^R \int_0^{\alpha} \left(10^{L_{RE}(r, \mathbf{q})/10} + 10^{L_{RD}(r, \mathbf{q})/10} \right) dr d\mathbf{q} \quad (4.20)$$

aquesta integral doble és l'aplicació de la fórmula (1.19) a una funció contínua que s'estén sobre una superfície, doncs s'ha suposat que les ones reflectides s'han generat en nous fronts distribuïts d'una manera contínua i uniforme sobre les façanes dels edificis.

D'altra banda aquesta funció, el valor de la qual depèn de la distància, r , i l'angle d'elevació, \mathbf{q} , respecte el nivell del terra, varia en relació inversa als seus gradients, doncs la intensitat de les ones reflectides disminueix a mesura que augmenta la distància i l'angle de reflexió.

$$L_{Ri}(r, \mathbf{q}) = L_{R0^{\circ}i} - \frac{\partial L_R}{\partial r} r - \frac{\partial L_R}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{q} \quad (i = E, D)$$

$L_{R0^{\circ}}$ representa el valor (en decibels) de la intensitat acústica reflectida per la línia de fronts d'ona que es troba a la mínima distància del terra (1 m d'alçada en aquest model). Aquest valor s'ha determinat empíricament a partir de les dades enregistrades pel sonòmetre quan un vehicle passa davant l'aparell a una velocitat de 50 km/h. De fet, s'ha emprat aquesta metodologia per comprovar que, efectivament, l'augment de la intensitat sonora és d'un ordre similar al previst mitjançant les fórmules de predicció, ja que el valor de $L_{R0^{\circ}}$ és precisament el que s'obté en la situació (b) de la figura (4.11).

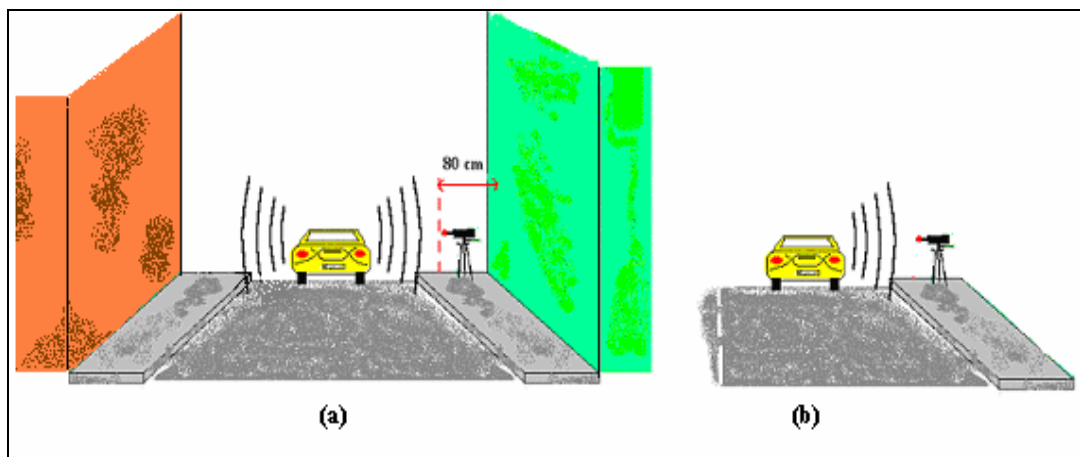


Figura 4.11.- Mesura d'un vehicle amb una paret darrera (a). Sense paret reflectora (b)

Càlculs dels gradients i determinació experimental de L_{R0}

S'ha escollit un tram de carrer recte als afores de Girona, en les immediacions del campus Montilivi, on es presentaven les condicions idònies per realitzar aquests tipus de mesures, doncs en un segment rectilini de carrer (gairebé 100 m i sense un pendent apreciable) s'han construït blocs d'edificis en ambdós costats de la via, però encara hi ha un bon tram sense cap edificació. En primer lloc, s'ha fet una mesura en condicions similars a les descrites en la figura (a), obtenint un valor $L_a = 70'8$ dB. Després, i segons la situació descrita en la figura (b), s'ha enregistrat un valor corresponent a $L_b = 70'2$ dB, resultant un increment en l'escala de decibels de $0'6$ dB. Aquest valor és molt proper als $0'5$ dB que s'obtenen a partir de la fórmula proposada pel model del CETUR per un carrer de 8 m d'amplada i una alçada mitjana dels edificis de 6 m, dimensions molt similars als del carrer objecte d'estudi. A partir d'aquest càlculs s'obté que el nivell en decibels corresponent a les ones reflectides sobre la paret és:

$$70'8 = 10 \text{Log} \left[10^{70'2/10} + 10^{\Delta L_r/10} \right] \Rightarrow \Delta L_r = \frac{\text{Log} \left[10^{70'8/10} - 10^{70'2/10} \right]}{0'1} \cong 66 \text{ dB}$$

valor molt proper a la xifra que s'obté amb l'expressió (4.20) desenvolupada a partir del càlcul integral. El valor del gradient $\partial L/\partial R$ s'ha estimat a partir de càlculs empírics fets a diferents distàncies d'una línia de fonts sonores, tal com s'indica en la figura (4.12.-a), mentre que per determinar el gradient de dispersió angular, $\partial L/\partial q$, s'ha col·locat una superfície aïllant, entre el sonòmetre i la font sonora situada a diferents alçades (figura 4.12.-b).

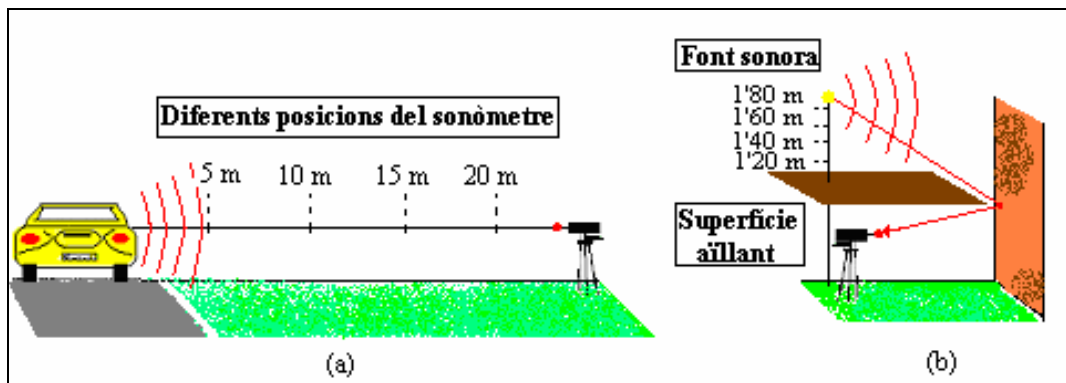


Figura 4.12.- Mesures fetes per estimar els gradients.

Amb mètodes matemàtics de regressió s'han estimat aquests valors pels gradients longitudinal i angular respectivament:

$$\frac{\partial L}{\partial R} = 0'54 \quad i \quad \frac{\partial L}{\partial q} = 0'36$$

Sobre la façana més propera al sonòmetre el valor de la intensitat a 1 m d'alçada, tenint en compte que les ones recorren una distància de $0'8$ m fins que arriben a la paret, és:

$$L_{R0'D} = \left(70'2 - \frac{\partial L}{\partial r} r \right) \cdot K = (70'2 - 0'54 \cdot 0'8) \cdot \frac{2}{3} = 46'51 \text{ (dB)}$$

en la paret oposada aquest valor dependrà de l'amplada del carrer, a. Si el sonòmetre es troba a 80 cm de distància de la paret resulta que

$$L_{R0^{\circ}E} = \left(70'2 - \frac{\partial L}{\partial r}(a - 0'8) \right) \cdot K \text{ (dB)}$$

Es considera que aquests valors de la intensitat acústica són els que s'enregistren al costat de les façanes just en el moment posterior a que l'ona sonora incideixi en la paret a 1 m d'alçada sobre el terra. La quantitat d'energia acústica absorbida per les molècules del material de la paret, representada pel factor corrector $K = 2/3$, esdevé més important a mesura que la longitud d'ona del so s'apropa a les dimensions dels pors i rugositats existents sobre la superfície. B. Favre ha determinat experimentalment que es pot dissipar fins el 35% de l'energia incident, d'aquí el valor d'aquest factor corrector,

$$K = 1 - 0'35 = \frac{65}{100} \cong \frac{2}{3}$$

Ara, desenvolupant la integral doble mitjançant la regla de Barrow, s'arriba a una fórmula per la intensitat reflectida, L_{Ri} , ($i = E, D$) en les façanes d'ambdós costats, dreta i esquerra respectivament, que només depèn de les característiques geomètriques del carrer representades per les variables R i θ .

$$L_{Ri} = \int_0^R \int_0^a 10^{0'1 \cdot L_{Ri}(r, q)} dr dq = \int_0^R \int_0^a 10^{0'1 \left[L_{R0^{\circ}i} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial r} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial q} \right]} dr dq =$$

$$= \frac{1}{(\partial L_{Ri} / \partial R)(\partial L_{Ri} / \partial \theta)(L_{Ri0})^2} \left[10^{0'1 \left[L_{R0^{\circ}i} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial r} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial q} \right]} - 10^{0'1 \left[L_{R0^{\circ}i} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial r} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial q} \right]} - 10^{0'1 \left[L_{R0^{\circ}i} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial r} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial q} \right]} + 10^{0'1 \left[L_{R0^{\circ}i} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial r} - \frac{\partial L_{Ri}}{\partial q} \right]} \right] \quad (i = E, D)$$

(4.21)

Tenim doncs que, en aquest model, en el punt P arriben tres grups d'ones diferenciades. La de major intensitat, L_P , és la que prové directament del vehicle, una altra de menor intensitat, L_{RD} que s'obté integrant les línies de fronts d'ona generades en la façana més propera (dreta en el dibuix) i una darrera, L_{RE} , provenint de la paret oposada. La intensitat total s'obté sumant logàrítmicament aquestes tres ones de pressió

$$L_{Req, 10^n} = 10L \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{0'1 \cdot L_i} \right] = 10Log \left[10^{0'1 \cdot L_P} + 10^{0'1 \cdot \Delta L_{RE}} + 10^{0'1 \cdot \Delta L_{RD}} \right] \quad (4.22)$$

L'increment d'intensitat degut a les reflexions del carrer es pot calcular sumant només les reflexions en les façanes.

$$\Delta L_{Req, 10^n} = 10L \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{0'1 \cdot L_i} \right] = 10Log \left[10^{0'1 \cdot \Delta L_{RE}} + 10^{0'1 \cdot \Delta L_{RD}} \right] \quad (4.23)$$

Aquest valor s'ha comparat amb les dades que s'obtenen de la fórmula del model proposat pel CETUR.

$$\Delta L_R = \frac{2 \cdot (h - 4)}{a} \quad (4.24)$$

Els valors calculats a partir de les expressions (4.18) i (4.20) es recullen en la taula (4.5). S'han comparat diferents amplades i alçades de carrers emprant un full de càlcul.

Amplada (m):	10	11	8	9	6
Alçada (m):	8	6	6	8	7
RUIZ	0,83	0,40	0,63	0,76	1,01
CETUR	0,80	0,36	0,50	0,89	1,00

Taula 4.5.- Diferents valors de ΔL_R en funció de la geometria dels carrers.

S'observa que les diferències són de l'ordre de centèsimes de decibel, insignificants a qualsevol efecte pràctic o de càlcul. S'adverteix, però, que a mesura que augmenten l'amplada dels carrers o l'altura dels edificis els resultats que s'obtenen comencen a divergir. Per vies o edificis de majors dimensions caldria introduir correccions a aquest model.

Estimació de l'error

La intensitat de les ones reflectides en les parets depèn de factors molt variables: la composició molecular i la textura del material de les parets, la freqüència i longitud d'ona del so incident ... Davant de la gran variabilitat de tots aquests factors s'ha considerat prendre com error la màxima diferència observada en la mostra aleatòria de la taula (4.5) que és 0'13 dB. Cal dir que en mesures acústiques urbanes, no s'acostuma a precisar fins l'ordre de les dècimes. Per aquest motiu, molts models de simulació per ordinador (MITHRA, SoundPLAN ...) no calculen l'increment de soroll que podria provocar la presència d'edificacions als costats del carrer.

Aquests estudis de les ones sonores incidents sobre les façanes dels edificis, apart d'un interès físic, són sens dubte, d'aplicació i utilitat a l'hora de dissenyar finestres, parets i envans acústicament aïllants i que permetin la construcció d'edificis amb espais interiors on es gaudeixi d'una bona sonoritat.

4.2.3.- Nivells acústics en túnels provocats pel pas del ferrocarril. (J.R.)

Aquest model serveix per predir el soroll provocat per un ferrocarril quan passa per un túnel. Les múltiples reflexions de les ones sonores en les parets generen uns nivells acústics en la boca de la cavitat superiors als que provocaria el tren si circulés en terreny obert. L'estudi i anàlisi d'aquesta pertorbació acústica, força elevada, és de gran interès sobretot en les zones habitades situades prop de l'orifici de la cavitat. Per desenvolupar aquest model de predicció s'han considerat els següents supòsits:

- Les ones sonores es generen principalment en la base de les rodes del tren (punt de fricció amb el rail) i es propaguen per l'aire. Una part de l'ona, $L_{(e,d)_i}(z, \mathbf{a})$, es propaga paral·lelament a l'eix del túnel \vec{z} , i acaba sortint per la seva boca, mentre que l'altre, $L_{P_i}(\mathbf{a})$,

es propaga per la cavitat, paral·lelament a si mateixa, experimentant repetides reflexions. (veure figura 4.14)

- Segons el principi de Huygens quan una ona sonora incideix sobre una superfície es crea un nou front d'ones secundàries que es propaguen en totes direccions. En aquest model, per poder expressar analíticament la intensitat acústica, s'ha suposat que l'energia mitjana es concentra en un únic raig d'ona que té una sentit i direcció ben definits.
- A partir del valor mitjà de l'angle d'incidència, α , sobre la superfície cilíndrica de la cavitat (els valors límit són 0° i 90°), s'ha estimat que l'ona incident ho fa sempre sota un angle de 45° respecte el vector normal, \vec{n} , al diferencial de superfície, $d\vec{S}$.

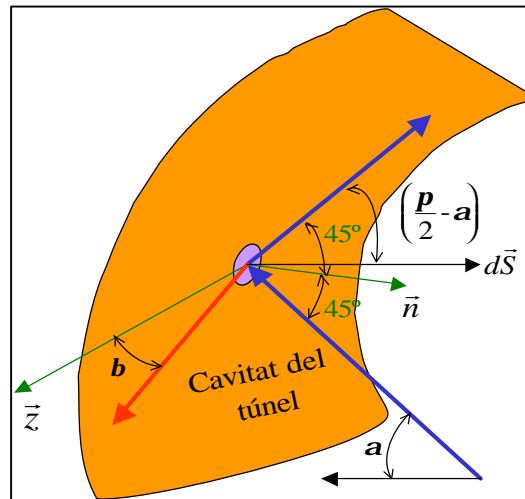


Figura 4.13.- Reflexió de l'ona incident sobre la cavitat del túnel.

- El nivell d'intensitat provocat es deu, principalment a les ones acústiques que es genera en les rodes i és funció directa de la velocitat del ferrocarril. El seu valor s'ha determinat experimentalment i es detalla en aquest mateix capítol.
- La finalitat d'aquest model és aconseguir una descripció de la intensitat màxima que es genera en l'extrem d'un túnel de ferrocarril. Les dades experimentals mostren que la màxima perturbació acústica apareix just en el moment que el ferrocarril surt per la cavitat del túnel.

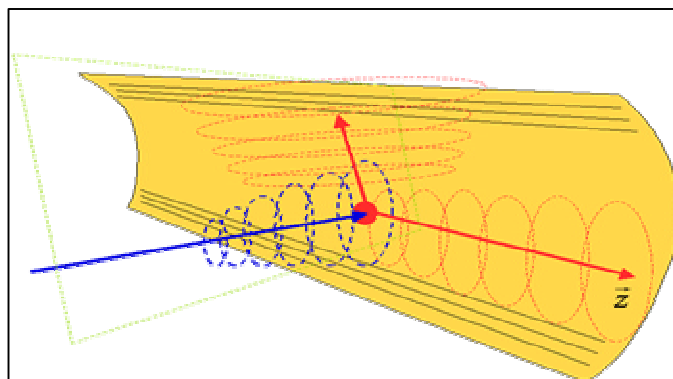


Figura 4.14.- Il·lustració de la reflexió de les ones en la paret de la cavitat.

Ones ortogonals a l'eix reflectides en l'interior del túnel: $L_{Pi}(\alpha)$

Són les que es propaguen perpendicularment a l'eix del túnel i paral·lelament a si mateixes experimentant successives reflexions (tres en aquest model) mentre perdent intensitat i dissipen la seva energia pels efectes de l'absorció de l'aire, el canvi de sentit en la reflexió i els fenòmens d'interferència destructiva.

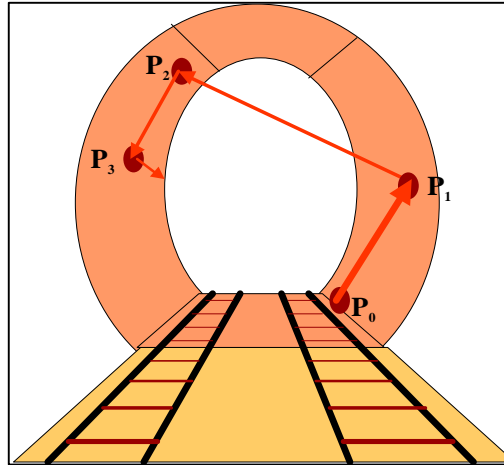


Figura 4.15.- Reflexions de les ones quan es propaguen per la cavitat del túnel.

En cada un dels punts, P_i , l'ona reflectida té una expressió matemàtica diferent, en funció de la distància recorreguda, r , l'angle d'elevació, α , el coeficient de dissipació de l'aire, A , i el coeficient de transmissió paral·lel, B_p .

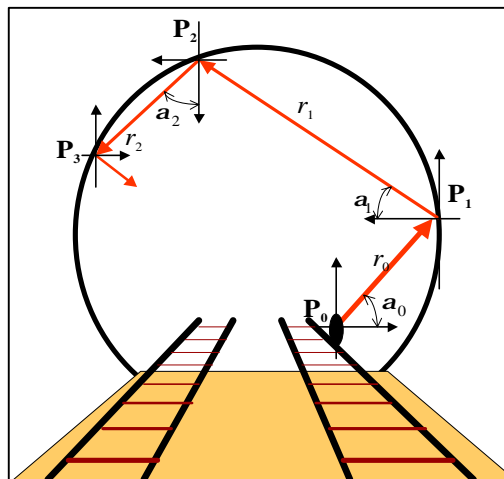


Figura 4.16.- Variables que descriuen les ones.

S'ha escollit el sentit dels eixos de referència dels diferents angles en base a les dades empíriques, les quals indiquen que la reflexió és màxima per les ones incidents segons la normal a la superfície. D'aquesta manera, pel que fa a les reflexions en les parets, el nivell d'intensitat de l'ona reflectida disminueix a mesura que augmenta l'angle d'elevació, α_i . En cada un dels punts de la gràfica anterior es genera una ona. Seguidament es detalla la seva expressió matemàtica en cada un dels punts de l'interior de la cavitat, tenint en compte que corresponen a les expressions de l'energia, just en el moment anterior d'incidir sobre la paret del túnel. D'acord amb la figura (4.16) aquests punts són:

P₀: En les rodes del ferrocarril es genera una intensitat acústica, L_{P_0} , que depèn de la velocitat del tren. Empíricament s'ha determinat una funció que descriu aquest soroll. Els càlculs realitzats per determinar aquesta fórmula s'explicaran en l'apartat de càlcul numèric.

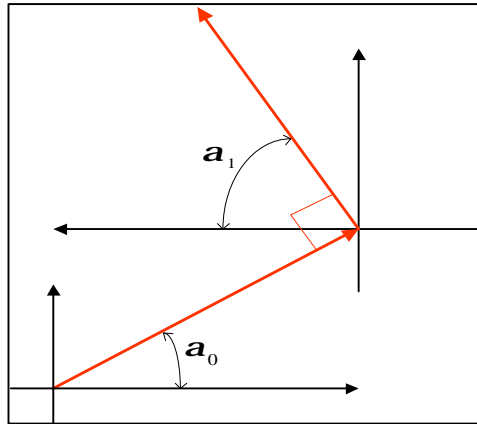
$$L_{P_0} = L_0(v)$$

P₁: Des de que l'ona sonora es genera en les rodes i es propaga per l'aire fins arribar a la cavitat del túnel, punt P_1 , la seva intensitat es pot descriure segons:

$$L_{P_1} = L_0(v) - Ar_0$$

En aquesta expressió la intensitat inicial, $L_0(v)$, s'esmorreix per efecte de l'absorció en l'aire. Aquesta disminució de l'energia es descriu mitjançant el coeficient de dissipació A , avaluat empíricament a partir de les dades experimentals en l'apartat corresponent al càlcul numèric.

P₂: L'ona reflectida en el punt P_1 , amb un angle de 90° respecte a l'ona incident i un angle α_1 , respecte a l'horitzontal, tal com s'il·lustra en el gràfic (4.9)



Gràfic 4.9.- Angle incident i reflectit.

Així, el valor d'aquest angle sota el que es reflexa l'ona respecte l'angle inicial és:

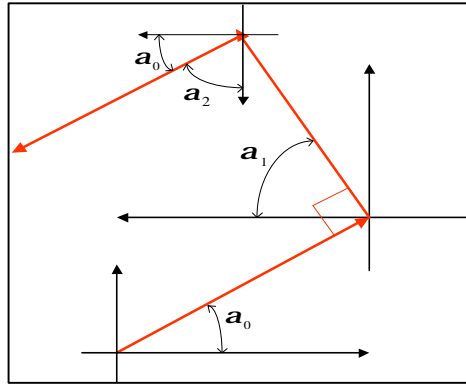
$$\mathbf{a_1 = p - \left(\frac{p}{2} + \mathbf{a_0}\right) = \frac{p}{2} - \mathbf{a_0}}$$

L'expressió de l'ona vindrà donada ara en funció del coeficient de dissipació en l'aire ponderat per la longitud del trajecte recorregut (r_0 i r_1) i pel coeficient de transmissió

paral·lel, B_p . degut a la reflexió en la paret de la cavitat, representatiu del percentatge d'energia acústica que es transmet en aquesta direcció.

$$L_{P_2} = L_0(v) - A(r_0 + r_1) - B_p \mathbf{a_1} = L_0(v) - A(r_0 + r_1) - B_p \left(\frac{p}{2} - \mathbf{a_0}\right)$$

P₃: L'angle sota el que es reflexa l'ona en la segona reflexió també ho fa sota un angle de 90° respecte l'ona incident (gràfic 4.10)



Gràfic 4.10.- Angle α_2 respecte α_0 .

llavors donada la simetria del túnel l'angle α_2 , pot expressar-se respecte l'angle inicial com:

$$a_2 = 2p - \left(p + \frac{p}{2} + a_0 \right) = \frac{p}{2} - a_0$$

i l'expressió de la funció acústica vindrà donada per:

$$L_{p_3} = L_0(v) - A(r_0 + r_1 + r_2) - B_p(a_1 + a_2) = L_0(v) - A(r_0 + r_1 + r_2) - B_p(p - 2a_0)$$

Aquestes fórmules depenen de l'angle d'elevació inicial α_0 i de les distàncies r_i que les ones recorren dins el túnel. Tenint en compte la geometria del túnel, gairebé circular, és possible expressar aquestes fórmules de manera molt més convenient en funció únicament de l'angle inicial d'elevació. Observant la figura s'observa que es poden establir algunes igualtats entre les variables.

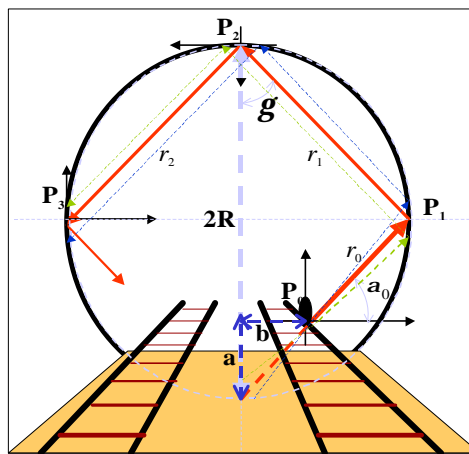


Figura 4.16.- Geometria d'una secció perpendicular a l'eix del túnel.

La longitud del trajecte en el primer tram, r_0 , pot relacionar-se amb l'angle d'elevació inicial emprant el teorema del sinus, doncs

$$\frac{2R}{\sin 90^\circ} = \frac{r_0 + r_{ST}}{\sin g} \Rightarrow r_0 + r_{ST} = 2R \sin g$$

D'altra banda, observant la figura (4.16) s'aprecia que l'amplitud angular d' α_0 i γ és la mateixa, mentre que la longitud del tram soterrat, r_{ST} , (*on no hi ha ona sonora*) per un angle proper als 45° és equivalent a:

$$r_{ST} = \frac{a}{\cos \mathbf{a}_0}$$

aquesta longitud, però, si es té en compte la major escala de les magnituds implicades és negligible i obviar el seu valor no afecta en cap manera els resultats finals

$$\left. \begin{array}{l} r_{ST} = \frac{a}{\cos \mathbf{a}_0} \\ \mathbf{g} = \mathbf{a}_0 \end{array} \right\} \Rightarrow r_0 = 2R \sin \mathbf{a}_0 - \frac{a}{\cos \mathbf{a}_0} \cong 2R \sin \mathbf{a}_0$$

La distància entre els punts P_1 i P_2 , pot determinar-se tenint en compte que en el punt on impacta l'ona l'angle entre l'ona incident i la reflectida és de 90° , per la qual cosa es pot emprar el Teorema de Pitàgores.

$$r_1 = \sqrt{(2R)^2 - r_0^2} = \sqrt{(2R)^2 - (2R \sin \mathbf{a}_0)^2} = 2R \sqrt{1 - \sin^2 \mathbf{a}_0} \Rightarrow r_1 = 2R \cos \mathbf{a}_0$$

Donada la simetria circular i en base a que l'ona reflectida forma un angle recte respecte l'ona incident en cada un dels punts on incideix, pot apreciar-se que el camí recorregut en el tram inicial és equivalent a la longitud del darrer menys un factor corrector que s'ha suposat negligible, per la qual cosa:

$$r_2 \cong 2R \sin \mathbf{a}_0$$

Per poder substituir aquestes expressions en les equacions, L_{Pi} , s'han agrupat convenientment aquestes fórmules.

$$\left\{ \begin{array}{l} r_0 \cong 2R \sin \mathbf{a}_0 \\ r_0 + r_1 = 2R(\sin \mathbf{a}_0 + \cos \mathbf{a}_0) \\ r_0 + r_1 + r_2 = 2R(2\sin \mathbf{a}_0 + \cos \mathbf{a}_0) \end{array} \right.$$

Ara, s'està en condicions d'expressar aquestes funcions de soroll, en funció d'una única variable: l'angle inicial d'elevació, α_0 . Donada la simetria existent, expressions similars també són aplicables al grup de rodes del costat més proper a l'eix central de la cavitat. És convenient, arribats a aquest punt, recalcar que aquest mètode no constitueix una descripció dels nombrosos i complexos fenòmens físics que ocorren en l'interior de la cavitat, únicament pretén ser una eina que, tot i fonamentant-se en apreciacions físiques raonables, permet calcular els nivells acústics provocats per les ones quan surten a l'exterior del túnel.

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{P_0}(\mathbf{a}_0) = L_0(v) \\ L_{P_1}(\mathbf{a}_0) = L_0(v) - Ar_0 = L_0(v) - A2R \sin \mathbf{a}_0 \\ L_{P_2}(\mathbf{a}_0) = L_0(v) - A(r_0 + r_1) - B_p \left(\frac{\mathbf{p}}{2} - \mathbf{a}_0 \right) = L_0(v) - A2R(\sin \mathbf{a}_0 + \cos \mathbf{a}_0) - B_p \left(\frac{\mathbf{p}}{2} - \mathbf{a}_0 \right) \\ L_{P_3}(\mathbf{a}_0) = L_0(v) - A(r_0 + r_1 + r_2) - B_p(\mathbf{p} - 2\mathbf{a}_0) = L_0(v) - A2R(2\sin \mathbf{a}_0 + \cos \mathbf{a}_0) - B_p(\mathbf{p} - 2\mathbf{a}_0) \end{array} \right.$$

A partir d'aquestes ones es generen unes altres gairebé paral·leles a l'eix del túnel que integrades determinen el nivell de soroll total en la boca de la cavitat. És important remarcar que aquestes expressions representen l'energia acústica de l'ona en el moment just anterior a l'impacte amb la paret.

Ones quasi paral·leles a l'eix del túnel (L_i)

Aquestes ones es generen en cada punt on incideixen les ones ortogonals, que després de ser reflectides per la superfície de la paret, surten per la boca de la cavitat provocant la pertorbació acústica. En la figura de la pàgina següent s'esquemmatitza aquest procés amb les ones ortogonals representades amb color blau i les reflectides paral·lelament en color vermell. És precisament la suma integral d'aquest darrer grup d'ones la que provoca l'elevat nivell de soroll en l'extrem de la cavitat que, a efectes de càlcul, s'ha considerat amb simetria cilíndrica.

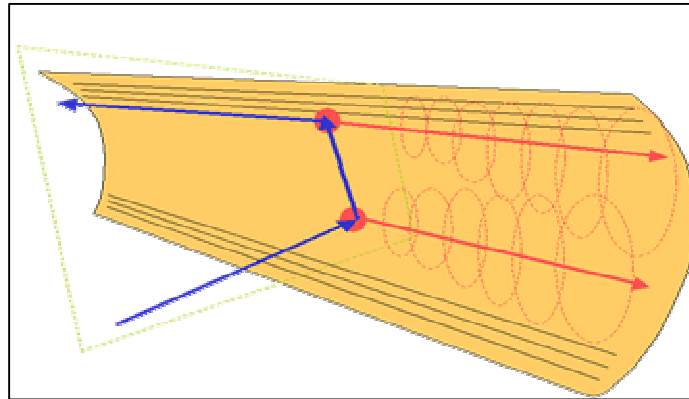


Figura 4.17.- Ones gairebé paral·leles a l'eix del túnel.

Aquestes ones es caracteritzen per:

- La intensitat inicial és la pròpia de l'ona incident en el punt P_i .
- Aquestes ones, mentre es propaguen per l'interior una distància d , estan afectades pel coeficient d'absorció de l'aire, A .
- Experimenten una pèrdua d'intensitat degut a la reflexió ortogonal representada pel coeficient de transmissió ortogonal, B_o , sota l'angle de desviació β . Similarment a l'anterior representa el percentatge d'energia acústica que, després de la reflexió, es propaga en aquesta direcció.

La geometria i les variables que intervenen en la propagació d'aquestes ones en l'interior del cilindre del túnel es representa en la il·lustració que hi ha a continuació.

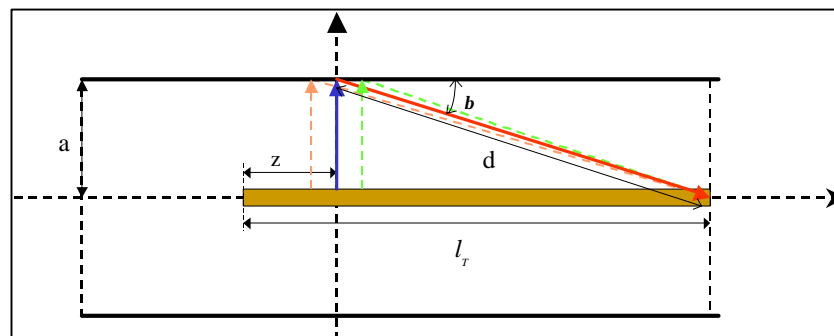


Figura 4.18.- Propagació de les ones paral·leles.

En aquest gràfic, l_T representa la longitud del tren, β l'angle existent entre el raig de l'ona sonora i la paret de la cavitat, a la distància mitjana entre les rodes i la paret del túnel i d la longitud del trajecte que recorre l'ona des de que es reflexa en la paret fins que surt a l'exterior. A efectes d'integració és convenient expressar tots aquests paràmetres en funció d'una única variable; la z .

$$d(z) = \sqrt{(z-l_T)^2 + a^2} \quad i \quad \mathbf{b}(z) = ar \cos \left[\frac{z-l_T}{\sqrt{(z-l_T)^2 + a^2}} \right]$$

En aquestes ones hi intervé el coeficient d'absorció en l'aire, A , i el coeficient de transmissió ortogonal B_o . La seva intensitat inicial ve donada per l'ona ortogonal, L_{Pi} , que incideix en el punt P_i i la seva equació general és:

$$L_i = L_{P_i} - Az - B_o \mathbf{b}$$

Substituint l'expressió de les ones paral·leles i desenvolupant tots els termes, es pot expressar cadascuna d'aquestes equacions en funció d'únicament dos variables: la longitud del ferrocarril segons la direcció axial, z , i l'angle inicial d'elevació de l'ona sonora, α (per simplificar la notació s'ha substituït l'angle inicial, α_0 per α).

- En el punt P_0

$$L_{(e,d)0} = L_0(v) - Az$$

- En el punt P_1

$$L_{(e,d)1}(z, \mathbf{a}) = L_{P_1} - Ad - B_o \mathbf{b} \Rightarrow$$

$$L_{(e,d)1}(z, \mathbf{a}) = L_0(v) - A \left[2R \sin \mathbf{a} + \sqrt{(z-l_T)^2 + a^2} \right] - B_o ar \cos \left[\frac{z-l_T}{\sqrt{(z-l_T)^2 + a^2}} \right]$$

- En el punt P_2

$$L_{(e,d)2}(z, \mathbf{a}) = L_{P_2} - Ad - B_o \mathbf{b} \Rightarrow$$

$$L_{(e,d)2}(z, \mathbf{a}) = L_0(v) - A \left[2R(\sin \mathbf{a} + \cos \mathbf{a}) + \sqrt{(z-l_T)^2 + a^2} \right] - B_p \left(\frac{\mathbf{p}}{2} - 2\mathbf{a} \right) - B_o ar \cos \left[\frac{z-l_T}{\sqrt{(z-l_T)^2 + a^2}} \right]$$

- En el punt P_3

$$L_{(e,d)3}(z, \mathbf{a}) = L_{P_3} - Ad - B_o \mathbf{b} \Rightarrow$$

$$L_{(e,d)3}(z, \mathbf{a}) = L_0(v) - A \left[2R(2\sin \mathbf{a} + \cos \mathbf{a}) + \sqrt{(z-l_T)^2 + a^2} \right] - B_p (\mathbf{p} - 2\mathbf{a}) - B_o ar \cos \left[\frac{z-l_T}{\sqrt{(z-l_T)^2 + a^2}} \right]$$

Aquestes expressions són les que representen el nivell de soroll en la boca del túnel. Corresponen a les ones reflectides i generades per les rodes en ambdós costats del ferrocarril. Els subíndexs (d) i (e) corresponen al costat dret i esquerra respectivament, respecte a la

perspectiva d'un observador situat en l'exterior del túnel. Seguidament es detalla el procés d'anàlisi i integració.

Grup d'ones originat en les rodes més properes a la paret de la cavitat: $L_{di}(z, a)$

Anteriorment, s'ha vist com es consideren tres punts de reflexió, P_i , per cada una de les ones que incideixen sobre la cavitat cilíndrica. Això, suggereix la divisió de la secció transversal del túnel en 3 zones on s'integren les ones $L_{di}(z, a)$ respectives.

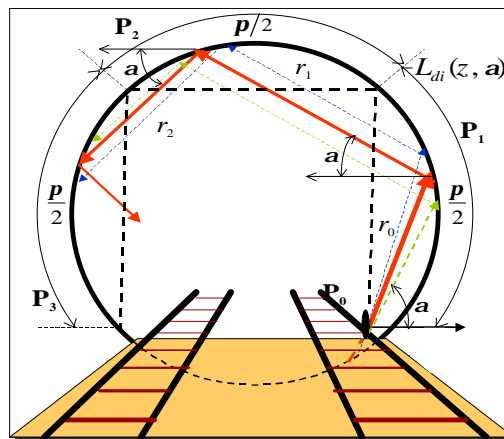


Figura 4.19.- Zones d'integració i amplituds angulars de les ones $L_{di}(z, a)$.

En la taula (4.6) s'identifica cada una de les zones i l'amplitud angular, α , que recorre cada raig d'ona, que per la simetria circular del problema es pot considerar idèntica i igual a un angle recte. La primera ona paral·lela que incideix sobre la paret, L_{P1} , pot fer-ho fins una elevació màxima de 90° , per la qual cosa cal integrar-la només fins aquest angle. Les altres dues ones recorren una amplitud angular idèntica per la qual cosa, malgrat es generin en altres punts de la cavitat (P_2 i P_3), s'integren fins aquest mateix angle al que estan referides.

Cantó Dret	Punt d'incidència	Amplitud angular
Zona 1	P_1	$\alpha = \pi/2$
Zona 2	P_2	$\alpha = \pi/2$
Zona 3	P_3	$\alpha = \pi/2$

Taula 4.6.- Amplituds angulars de les zones d'integració de les ones (costat dret).

Aquests valors de les mesures angulars s'han pres considerant que les ones sonores experimenten fenòmens de difracció gràcies als que segueixen una trajectòria rectilínia tot i que pugui haver-hi obstacles en la seva trajectòria. Evidentment, s'haguessin pogut escollir altres valors angulars amb els que generar un model igualment vàlid. La raó per la qual s'han escollit aquestes amplituds dels angles radica en intentar aprofitar al màxim la simetria circular i simplificar així els càlculs. En la figura que apareix en la pàgina següent s'il·lustra com les ones sonores que incideixen en la part superior i lateral del ferrocarril segueixen una trajectòria rectilínia després d'experimentar el fenomen de la difracció sobre l'estructura metàl·lica del tren. Els fenòmens de difracció s'observen clarament quan una ona passa a través d'una escletxa, tot i que també són propis de les desviacions que experimenten els raigs de so quan impacten en un obstacle. Un clar exemple és l'experiència habitual de poder escoltar el soroll

generat per un cotxe o una persona que parla darrera una cantonada, malgrat que la font acústica no sigui directament visible.

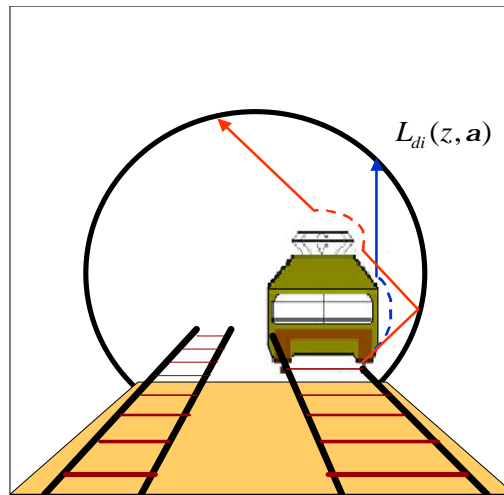


Figura 4.20.- Difracció de les ones $L_{di}(z, a)$ sobre l'estructura del ferrocarril.

En la gràfica les ones difractades en la paret lateral i el sostre del tren es representen com segments curvilinis intermitents de color blau i vermell respectivament.

Grup d'ones originat en les rodes més pròximes al centre del túnel: $L_{ei}(z, a)$

Els mateixos raonaments fets fins ara són aplicables a les rodes de l'altre costat. L'expressió analítica de les ones, $L_{ei}(z, \alpha)$, reflectides en les diferents parts de la cavitat és similar a les del costat dret. En la figura (4.21) s'aprecia que el primer raig, incident en el punt P_1 , pot fer-ho fins una elevació de 90° . Els altres raigs reflectits en les parets, degut a que en aquest model es reflecteixen formant un angle recte respecte el raig incident també recorren la mateixa amplitud angular.

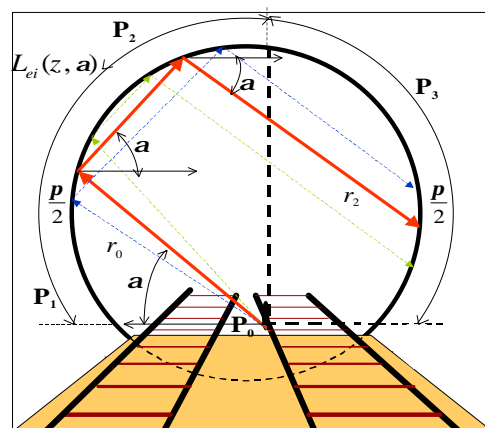


Figura 4.21.- Zones d'integració i amplituds angulars de les ones $L_{ei}(z, a)$.

Com abans, els arcs que delimiten les diferents zones senyalen els punts d'incidència dels diferents grups d'ona i els angles sobre la circumferència corresponen a l'amplitud angular que abasten els raigs de les ones. En la taula (4.7) es recullen els angles, α , que recorren els raigs de les ones en les diferents zones, respecte a les ones de les dues bandes.

Cantó Esquerra	Punt d'incidència	Amplitud angular
Zona 1	P ₁	$\alpha = \pi/2$
Zona 2	P ₂	$\alpha = \pi/2$
Zona 3	P ₃	$\alpha = \pi/2$

Taula 4.7.- Amplituds angulars de les zones d'integració (costat esquerra).

Anàlogament a les ones generades en la part dreta aquest grup d'ones experimenta fenòmens de difracció quan impacten sobre l'estructura del ferrocarril, representats per les línies discontinües de la figura (4.22).

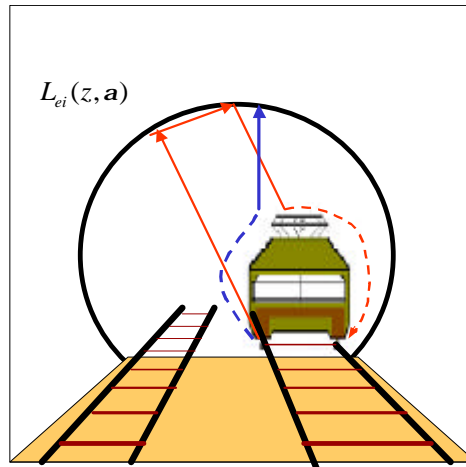


Figura 4.22.- Difracció de les ones $L_{di}(z, a)$ sobre l'estructura del ferrocarril.

Integració de les ones en les respectives zones

Quan un grup d'ones incideixen sobre un mateix punt la intensitat total es calcula amb una suma logarítmica (equació 1.19). En aquest model, però, cal sumar en primer lloc cada un dels grups d'ones que es generen en la paret cilíndrica d'una manera contínua. Aquesta suma, per

tractar-se d'una integració, pot fer-se mitjançant una integral doble cilíndrica, considerant el radi polar constant i prenent com a variables l'angle d'elevació del raig de l'ona, α , i la direcció axial, z . S'integra sobre aquesta distància i no sobre la longitud total del túnel perquè els nivells instantanis (amb un factor d'integració de 125 ms) mostren que les intensitats màximes s'enregistren en el moment que l'extrem capdavanter de la locomotora apareix per la boca del túnel. Així, el nivell acústic corresponent de cada zona s'obté a partir de:

Ones originades en la base de les rodes:

$$L_{(e,d)i}(l_t) = 10 \cdot \log \int_0^{l_t} 10^{\frac{L_{(e,d)i}}{10}} dz \quad (i = 0) \tag{4.25}$$

Grups d'ones generades en la paret del túnel:

$$L_{(e,d)i}(l_t, \pi/2) = 10 \cdot \log \int_0^{l_t} \int_0^{\pi/2} 10^{\frac{L_{(e,d)i}(z, \alpha)}{10}} dz d\alpha \quad (i = 1, 2, 3) \tag{4.26}$$

En total, es calculen 8 integrals que representen els nivells acústics que arriben a la boca del túnel. Per obtenir la intensitat total que es genera en aquest punt, cal sumar-los logàrítmicament.

$$L_T = 10 \text{Log} \sum_{i=0}^3 \left[10^{\frac{L_d(i)}{10}} + 10^{\frac{L_e(i)}{10}} \right] \quad (4.27)$$

Aplicació numèrica

Per poder emprar la fórmula d'integració (4.23), en primer lloc, cal conèixer la intensitat sonora que genera el ferrocarril en la base de les rodes, $L_0(v)$, quan passa per l'interior del túnel. Les mesures s'han fet en la boca del túnel de l'estació de Portbou. La velocitat del tren quan passa per l'interior de la cavitat del túnel, al voltant dels 30 km/h, l'ha facilitat un dels maquinistes que recorre el trajecte.

En primer lloc, s'han fet mesures acústiques quan el ferrocarril arriba a l'estació. Les dades obtingudes, corresponen a mesures enregistrades a 1 m de distància de la via, i són les que s'han utilitzat en el treball donat que a aquesta distància la dissipació de l'ona en l'aire és de l'ordre de dècimes de decibel i negligible a efectes pràctics. Una variable d'interès, relacionada estretament amb el soroll que genera el tren, és la seva velocitat. Per conèixer-la en el moment que s'han enregistrat les mesures acústiques, a partir de nivells equivalents de 10 s de durada, quan la locomotora passa davant del sonòmetre, s'ha emprat la següent metodologia:

- L'origen de referència s'ha pres davant l'estació del ferrocarril, en el punt on para la locomotora.
- S'han determinat prèviament els punts i la distància on s'havien d'enregistrar les dades acústiques.
- S'ha mesurat el temps que tarda en recórrer la distància entre el primer punt de mesura i el lloc on s'atura.

- S'ha suposat, en bona aproximació, una desacceleració constant en els 80 m anteriors al punt d'aturada.

En la figura apareixen aquestes distàncies i intervals de temps.

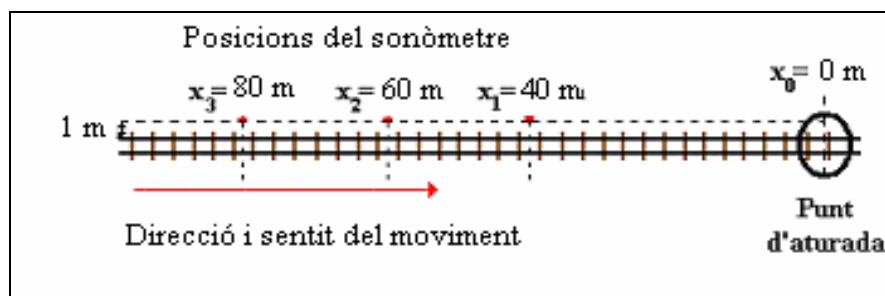


Figura 4.23.- Diferents posicions del sonòmetre.

Essent el temps que triga el tren a aturar-se des de la posició x_3 de 14 s es pot estimar la desacceleració a partir de:

$$\left. \begin{array}{l} v_i = \sqrt{2a\Delta x} \\ v_i = -at \end{array} \right\} \Rightarrow a = \frac{2\Delta x}{t^2} = \frac{2 \cdot (0m - 80m)}{(14s)^2} = -0'82m/s^2$$

Ara coneixent aquest valor i les distàncies on s'ha col·locat el sonòmetre, podem conèixer la velocitat en aquests punts mitjançant la fórmula

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a(x_f - x_i) \Rightarrow v_i = \sqrt{-2a(x_f - x_i)}$$

essent v_i la velocitat inicial i considerant que la velocitat final, v_f , és nul·la en el punt d'aturada. Així mateix, el signe negatiu dins l'arrel quadrada es cancel·la ja que s'ha pres el punt d'aturada com origen de coordenades. Amb la relació entre la velocitat i l'acceleració s'han calculat els intervals de temps, Δt , que el tren triga a desplaçar-se entre dos d'aquests punts. En la taula on es recullen totes aquestes dades s'ha fet servir la següent notació: Δt_{ij} és el temps emprat per anar del punt i al punt j . Idènticament, Δx_{ij} és la distància que separa aquests dos punts. També apareixen els nivells de soroll enregistrats amb el sonòmetre.

Punts de mesura	Δx_{ij} (metres)	Δt_{ij} (segons)	v_i (Km/h)	Soroll (dB)
1	$\Delta x_{01} = 40$ m	$\Delta t_{01} = 9'8$ s	29'16 Km/h	70 dB
2	$\Delta x_{02} = 20$ m	$\Delta t_{02} = 12'12$ s	35'71 Km/h	73 dB
3	$\Delta x_{03} = 80$ m	$\Delta t_{03} = 14$ s	41'24 Km/h	75 dB

Taula 4.8.- Velocitat del ferrocarril en els diferents punts de mesura.

Aquestes dades s'han corroborat a partir de l'equació de la cinemàtica que engloba totes les variables implicades:

$$x_f = x_i + v_i t + \frac{1}{2} a t^2$$

S'observa que el soroll augmenta a mesura que s'incrementa la velocitat, cosa que permet extrapolar el nivell de soroll provocat pel tren en funció d'aquesta variable. Ara, amb els resultats de les dues darreres columnes es pot obtenir una fórmula, utilitzant mètodes de regressió lineal, que relacioni el soroll amb la velocitat i permeti calcular el nivell de perturbació acústica al nivell de les rodes quan circula per l'interior de la cavitat a una velocitat d'aproximadament 30 km/h.

$$S_{so}(v) = 57'97 + 0'41v \Rightarrow L_0(30\text{ km/h}) = 70\text{ dB}$$

D'acord amb el model, aquest soroll representa la intensitat acústica originada pel fregament de les rodes en contacte amb la via. A partir dels càlculs i les dades empíriques s'ha determinat que els valors del coeficient de dissipació atmosfèrica, A , de transmissió paral·lel, B_p , i ortogonal, B_o , són:

A	B_p	B_o
0'58	0'33	0'33

Taula 4.9.- Valors estimats pels coeficients de dissipació.

Aquests coeficients representen que el 42% de l'energia acústica és absorbida per l'aire, mentre que només es transmet en la direcció paral·lela i l'ortogonal a l'eix del túnel el 33% de l'energia incident en el punt d'impacte. Cal remarcar que aquests valors no són fixos i poden variar en funció de la geometria i la composició molecular del material que recobreix les parets del túnel. Una variació d'aquests coeficients en l'ordre de les centèsimes i fins i tot de les dècimes, no afecta de manera significativa als resultats obtinguts amb aquest model que es detallen a continuació. Abans, però, s'indiquen les característiques i composició del ferrocarril, així com la geometria del túnel que es troba en el tram de via entre Colera i Portbou.

Tipus de ferrocarril:	Rodalies R-447
Longitud d'un vagó:	25'45 m
Longitud del ferrocarril	$l_T = 5 \times 25'45 = 127'2$ m
Radi mig del túnel:	R = 4 m
Distància de la via al costat esquerra:	$a_E = 3'5$ m
Distància de la via al costat dret:	$a_D = 1$ m

Taula 4.10.- Composició del ferrocarril i característiques del túnel.

S'ha suposat que el túnel té simetria circular, la qual cosa és exacte en la part superior, però no sobre la superfície plana de les parets laterals. Tenint en compte, però, que els assaigs realitzats amb fórmules similars a les descrites anteriorment, que si descriuen aquesta geometria, mostren resultats gairebé idèntics s'ha optat, davant la major simplicitat de les expressions, treballar amb una simetria perfectament circular. Els càlculs fets amb les fórmules (4.23-24) es mostren en l'apèndix M i donen un resultat final de

$$L_T = 10 \text{Log} \sum_{i=0}^3 \left[10^{\frac{L_{d(i)}}{10}} + 10^{\frac{L_{e(i)}}{10}} \right] = 85'5 \text{ dB} \quad (4.28)$$

valor molt proper al nivell equivalent de 10 segons de durada enregistrat a menys de 1 m de la boca de la cavitat,

$$L_{\text{Aeq}, 10''} = 85'8 \text{ dB}$$

Aquesta mesura s'ha realitzat tenint en compte que:

- El sonòmetre s'ha situat a menys de 1 m de distància de la paret lateral de l'orifici del túnel.
- L'aparell de mesura s'ha connectat en l'instant precís que la locomotora apareix a l'exterior a través de la boca de la cavitat.
- S'ha utilitzat aquest temps de mesura perquè, en aquest rang de velocitats, 10 segons és el temps que tarda el ferrocarril a recórrer una distància aproximadament equivalent a la seva longitud.

Aquest valor correspon a la màxima intensitat mesurable prop de la cavitat i cal tenir present que aquest anàlisi s'ha fet en condicions de baixa velocitat. Quan el tren circula en un entorn urbà, tant si ho fa per un viaducte o un túnel i segons la informació facilitada per maquinistes que cobreixen el trajecte de Portbou a Barcelona, pot desenvolupar velocitats molt superiors, properes als 70 km/h. Així, el ferrocarril manté aquesta velocitat fins uns 5 m abans d'arribar a la zona de l'estació on s'atura o disminueix la marxa. A Girona, davant la possibilitat de soterrar el viaducte, és interessant estudiar el soroll que pot generar un tren, amb aquesta velocitat, en la boca del túnel i, sobretot, en els edificis de les immediacions.

Propagació i dispersió de l'ona sonora

Primerament, cal calcular el nivell de soroll que es genera en la base de les rodes d'un ferrocarril que circula a una velocitat de 70 km/h emprant l'expressió de la funció de soroll s'obté un nivell de soroll equivalent a

$$S_{so}(v) = 57'97 + 0'41v \Rightarrow L_0(70 \text{ km/h}) = 87 \text{ dB}$$

Aquest valor, força superior als 70 dB que s'obtenen a 30 km/h, és força similar a la dada obtinguda en l'origen de la fórmula (3.3). Ara, emprant la mateixa metodologia que en l'apartat anterior es pot conèixer el nivell de soroll en la boca de la cavitat. Sense pèrdua de generalitat, s'ha considerat un túnel i un ferrocarril de les mateixes característiques que les descrites anteriorment, ja que en aquest model, únicament una gran variació d'aquests paràmetres comporta diferències significatives en els resultats. Les dades, obtingudes a partir de les expressions (4.23-24) poden veure's en l'apèndix N on també apareix el resultat final

$$L_r = 10 \text{Log} \sum_{i=0}^3 \left[10^{\frac{L_{d(i)}}{10}} + 10^{\frac{L_{e(i)}}{10}} \right] = 102 \text{ dB} \tag{4.29}$$

Així, aquest nivell de soroll seria el provocat per un tren en la boca d'un túnel de característiques similars a les descrites en la taula (4.10). Per poder conèixer la dispersió d'aquesta ona fora de la cavitat, s'han realitzat unes mesures experimentals. En la figura (4.24) es mostren els punts on s'han enregistrat les mesures acústiques en la boca del túnel que es troba en el tram de via que va de Colera a Portbou, quan els ferrocarrils circulen a 30 km/h. S'han obtingut les dades que figuren en la taula (4.11) a partir de nivells equivalents de 10 segons situant el sonòmetre a diferents distàncies i obertures angulars.

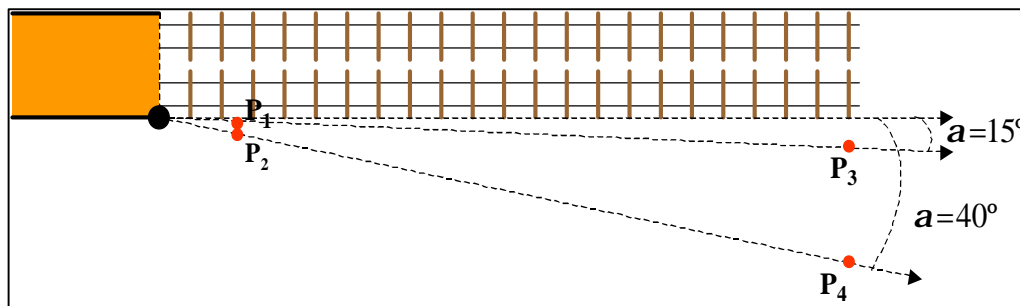


Figura 4.24.- Mesures de soroll en les proximitats de la cavitat d'un túnel.

Punts de mesura	Nivells de soroll (dB/ v= 30 km/h)	Distància (m)	Angle (graus sexagesimals)
P ₁	80'2	1'03	15°
P ₃	77'3	7'25	
P ₂	75'8	1'3	40°
P ₄	68'4	9'15	

Taula 4.11.- Valors de les variables que determinen els punts de mesura.

Mitjançant les eines d'anàlisi del full de càlcul s'ha obtingut la següent fórmula de dispersió en funció de la distància a l'extrem del túnel, r , i l'obertura angular respecte a l'eix de la via, α .

$$D_{so}(r, \mathbf{a}) = 85'39 - 0'75r - 0'23\mathbf{a}$$

Aquesta expressió indica que el nivell de pertorbació en l'origen és de 85'39 dB i els gradients que la intensitat de la pertorbació sonora disminueix a mesura que augmenta la distància i l'angle, dues característiques que concorden perfectament amb les dades experimentals i el resultat obtingut a partir de l'equació (4.26). Ara, donat que no es tenen en consideració variacions de les condicions atmosfèriques, de les quals dependrien els gradients de dispersió, aquests tenen el mateix valor tot i que s'incrementi la intensitat de la pertorbació inicial. Llavors, es pot extrapolar una funció de la pertorbació del soroll en l'exterior de la cavitat per un tren que es desplaci a 70 km/h.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial D_{so}}{\partial r} = -0'75 \\ \frac{\partial D_{so}}{\partial \mathbf{a}} = -0'23 \end{array} \right\} \Rightarrow D_{so} = 102 - \frac{\partial D_{so}}{\partial r} r - \frac{\partial D_{so}}{\partial \mathbf{a}} \mathbf{a} = 102 - 0'75r - 0'23\mathbf{a} \text{ (dB)} \quad (4.30)$$

Les dades que s'obtenen a partir d'aquesta expressió es recullen en la taula (4.12) on s'ha calculat la distància a que es troben del focus de soroll (extrem del túnel) algunes línies isòfones en funció de l'angle respecte a l'eix de la via.

Isòfones:	Focus: 102 dB	70 dB	65 dB	60 dB	55 dB	50 dB	45 dB	Angle °
Distància (m)	0	42,7	49,3	56,0	62,7	69,3	76,0	0°
	0	36,5	43,2	49,9	56,5	63,2	69,9	20°
	0	30,4	37,1	43,7	50,4	57,1	63,7	40°
	0	24,3	30,9	37,6	44,3	50,9	57,6	60°

Taula 4.12.- Distància i angle de les diferents línies isòfones.

En la gràfica s'il·lustra la propagació d'aquesta ona de soroll.

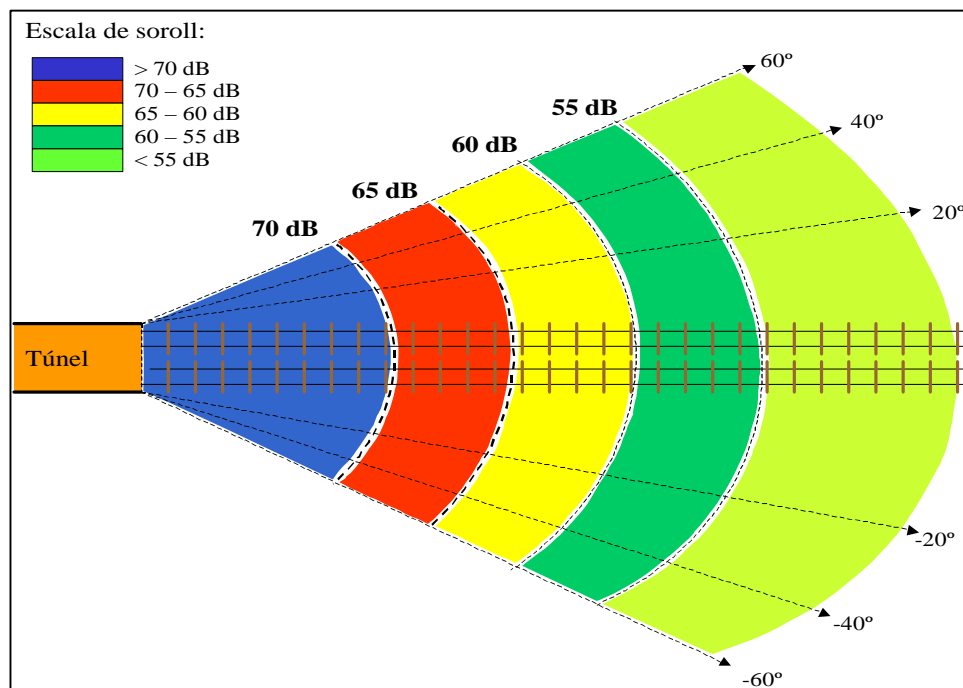


Figura 4.25.- Propagació de l'ona de soroll (Equació 4.28)

En aquesta gràfica es representa la disminució del nivell d'intensitat acústica a mesura que augmenta la distància respecte la boca de la cavitat i l'angle en relació a l'eix de la via. Els arcs amb traçat intermitent representen les línies isòfones que separen les zones de diferent intensitat a les que s'han assignat diferents colors. En la taula (4.12), s'observa que per una desviació de només 20° respecte l'eix de la via i fins una distància de $36'5$ m el nivell de soroll arriba fins els 70 dB. Si l'amplitud angular augmenta, fins 60° per exemple, es pot mesurar aquesta intensitat sonora a $24'3$ m. Per mesurar un soroll "acceptable" de 50 dB ens hauríem de situar a més de 50 m de distància.

Aquests elevats nivells acústics suposen una seriosa molèstia pels habitants dels veïnats situats a poca distància de la cavitat. En els mitjans de comunicació sovint apareixen persones queixoses per aquesta circumstància. Per aquest motiu, si a Girona s'opta per la construcció d'un túnel que travessi el subsòl de la ciutat s'haurà de tenir molta cura en prevenir l'impacte acústic que es genera en l'àrea exterior.

Estimació de l'error

La fórmula amb la que s'ha calculat el soroll en la boca del túnel depèn de factors molt variables entre els que destaquen principalment la velocitat, el tipus de ferrocarril i la textura de les parets de la cavitat. Aquests paràmetres variables influeixen decisivament en els resultats, per la qual cosa estimar l'error absolut a partir de la propagació de la diferencial total de la funció no sembla una opció massa encertada a menys que es disposin de dades més precises i acurades. No obstant, comparant les dades enregistrades empíricament i els resultats que s'obtenen amb el model de predicció (4.29) s'ha estimat que per un túnel d'aquestes característiques i aquest tipus de ferrocarril aquest mètode té associada una incertesa de $\pm 2'6 dB$.

V ANÀLISIS DE GIRONA

5.1.- METODOLOGIA DE DISTRIBUCIÓ DEL TRÀNSIT URBÀ (J.R.)

5.1.1.- Base axiomàtica de la distribució del trànsit.

Donada la complexitat del trànsit urbà s'ha dividit el nucli de la ciutat de Girona en 6 zones diferenciades per poder aplicar millor i amb més eficiència les tècniques de distribució del trànsit que es desenvolupen en aquest estudi. En primer lloc s'exposen uns axiomes de la circulació de vehicles, sobre els que es fonamenta tot el treball, i a partir dels que es deriven uns principis que descriuen el comportament dels conductors i lògicament dels propis vehicles. La pròpia natura d'aquesta base axiomàtica fa impossible la seva demostració, malgrat que ha estat inspirada en els següents punts:

- La teoria matemàtica que vertebra la probabilitat i l'estadística. (*kramer-Kolmogorov*).
- La observació directa i les dades empíriques.
- Els fonaments de la lògica (*Boole*).

Seguidament es detallen aquest conjunt de 5 axiomes:

Axiomes sobre la distribució del trànsit

- 1.-Les àrees urbanes es poden dividir en zones diferenciades d'igual superfície i amb direccions ben definides que vindran donades pels carrers i vies de circulació amb un major flux de vehicles.
- 2.-El flux de vehicles que entra en una zona en un sentit és equivalent al que en surt, segons aquest mateix sentit, durant un període de temps suficientment llarg.
- 3.-Si un conductor ha d'anar del punt A al punt B, podent escollir entre diferents camins i en igualtat de condicions (*cost monetari, seguretat, visibilitat*) triarà, excloent-ne situacions excepcionals, el camí més curt.
- 4.-En els carrers amb doble direcció, i per llargs períodes de temps, passen el mateix nombre de vehicles en ambdós sentits.
- 5.-Si una via, que uneix dues àrees, té un flux de vehicles igual a n i se'n construeix una de nova entre aquestes mateixes zones, en igualtat de condicions (*cost monetari, seguretat, visibilitat, duració del trajecte*), en el límit, quan el nombre de vehicles tendeix a infinit, el flux de vehicles que hi haurà en cada una de les vies s'haurà reduït exactament a $n/2$. Aquest darrer axioma és, de fet, la interpretació geomètrica del teorema de Laplace que defineix el concepte de probabilitat.

Aplicació d'aquests principis i descripció del mètode

Abans de descriure el procés aplicat, cal destacar un tret fonamental: en les zones de la perifèria (1, 2), on encara hi ha espais per construir nous carrers o vies, s'han aplicat tècniques pròpies de la programació lineal amb l'objectiu de minimitzar l'impacte acústic. En les zones interiors (3, 4, 5 i 6), on s'hi troba el nucli central, el casc antic ..., davant la impossibilitat real de fer remodelacions dràstiques del pla urbanístic s'ha optat per restringir-ne l'accés als vehicles a motor i mitjançant una xarxa de transport públic garantir-ne l'accessibilitat.

Cal destacar que aquest és un estudi teòric i que el seu objectiu consisteix en desenvolupar uns mètodes i tècniques generals orientats a minimitzar la contaminació acústica i, malgrat que podrien ser perfectament aplicables a la ciutat, la viabilitat de les obres no s'ha consultat a les autoritats pertinents. Tot seguit es detalla aquest procés general, juntament amb la metodologia aplicada en cada una de les zones.

Anàlisi general de l'àrea urbana

S'identifiquen els carrers més sorollosos, tot dividint l'àrea urbana en zones ben diferenciades. Pel que fa al trànsit, aquestes zones, es correspondran amb les que tinguin un major flux de vehicles.

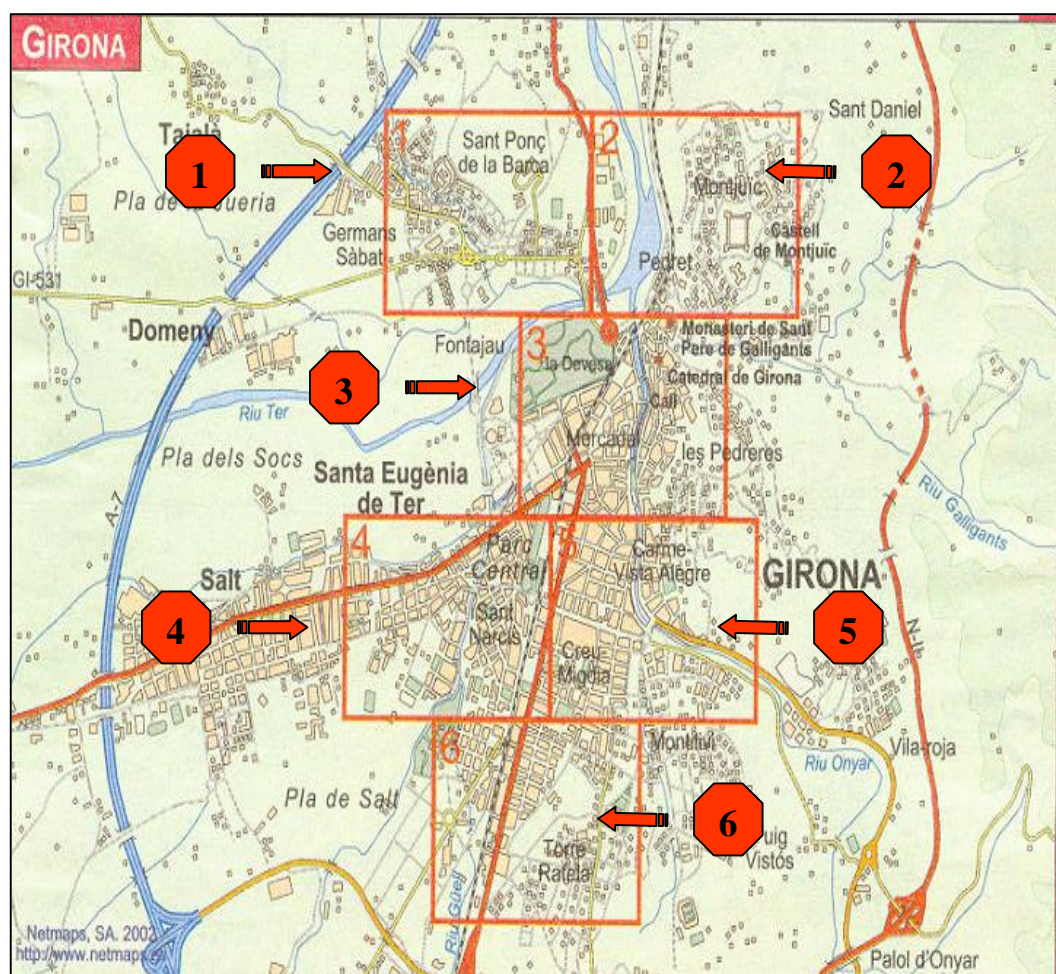


Figura 5.1.- Divisió de Girona en 6 zones

Sense fer mesures sobre el terreny amb el sonòmetre, mitjançant la fórmula de predicció del soroll (4.18), coneixent el nombre i tipus de vehicles que circulen per aquestes vies principals es fa al càlcul estimatiu de la pertorbació acústica. Posteriorment, es fixen els nivells acústics admissibles o desitjables i, emprant la funció inversa, es determina el flux màxim de vehicles lleugers, pesats i motocicletes per tal que no es sobrepassin aquestes cotes prefixades. Els càlculs mostren que el nombre màxim de vehicles per a que no es sobrepassi el límit admissible recomanat per la OMS dins un entorn urbà, 65 dB, és d'aproximadament 72 vehicles (o 36 en ambdós sentits). L'observació directe de la zona pot ajudar a concretar aquests estudis en el sentit que, per exemple, es pot restringir el pas dels vehicles pesats dins els nuclis urbans o àrees residencials i, fins i tot, prohibir l'accés de qualsevol tipus de vehicle amb motor a certes àrees interiors del casc urbà molt congestionades pel trànsit. Aquest tipus d'iniciatives s'han posat en pràctica en molts països d'Europa i arreu del món per pal·liar els efectes derivats de l'emissió de gasos contaminants i pel mateix volum de vehicles, doncs una gran aglomeració de trànsit en carrers no massa amples, que no permeten una circulació fluida, pot provocar embussos i retencions de molt llarga durada. En la taula (5.1) s'inclouen els valors de la pertorbació acústica, calculats sempre amb la fórmula (4.18) i el nombre de vehicles mitjà enregistrats en les següents vies principals:

Zones	CARRERS	% Motoci- cletes	% Vehicles lleugers	% Vehicles pesats	Nombre de vehicles	Soroll (dB)
Zona 1A	1.1.-Avda. Josep Tarradelles	15%	79%	6%	120	69
	1.2.-Carretera de Talaià	6%	89%	5%	158	71
	1.3.-Rambla d'En Xavier Cugat	25%	73%	3%	82	66
Zona 2B	2.1.-Avinguda de França	24%	73%	3%	125	67
	2.2.-Carretera de Palamós	25%	72%	4%	89	64
	2.3.-Carrer Font de l'Abat	6%	87%	8%	164	68
	2.4.-Carrer Pont de la Barca	7%	80%	13%	150	67
Zona 3C	3.1.-Passeig de la Devesa	4%	88%	8%	160	71
	3.2.-Gran Via Jaume I	23%	74%	3%	134	68
	3.3.-Carrer de Santa Eugènia	24%	73%	3%	85	65
	3.4.-Avinguda de Sant Francesc	15%	81%	4%	91	66
Zona 4D	4.1.-Passeig d'Olot	32%	63%	5%	120	70
	4.2.-Carrer de Santa Eugènia	19%	76%	5%	105	69
	4.3.-Avinguda de Sant Narcís	26%	71%	3%	88	65
	4.4.-Carrer Tomàs de Sivil·la	0%	100%	0%	13	50
	4.5.-Carrer R. Massó Valentí	1%	84%	15%	136	71
Zona 5E	5.1.-Carrer Barcelona	22%	74%	4%	181	71
	5.2.-Carrer Emili Grahit	23%	73%	4%	184	72
	5.3.-Carrer de la Creu	16%	84%	0%	74	65
	5.4.-Carrer del Carme	22%	75%	3%	82	66
	5.5.-Carrer Migdia	0%	100%	0%	57	63
Zona 6F	6.1.-Carretera de Santa Coloma	22%	73%	5%	150	71
	6.2.-Avinguda Lluís Pericot	9%	88%	3%	126	68
	6.3.-Carrer Barcelona	22%	74%	4%	230	75
	6.4.-Carrer Migdia	2%	98%	0%	64	63
	6.5.-Pujada Creu de Palau	4%	96%	0%	36	57

Taula 5.1.- Nivell de soroll calculat mitjançant la fórmula de predicció.

Seguidament, en cadascuna d'aquestes zones, s'identifiquen aquests carrers amb uns vectors de flux, proporcionals al nombre de vehicles que hi transiten i es localitzen els encreuaments o vèrtexs on la incidència de trànsit és màxima. A partir d'ara, la descripció del mètode es concentra sobre la primera zona i, posteriorment, s'aplica a la resta seguint el mateix procés.

5.1.2.- Zona 1A

Aquest estudi es du a terme a partir de les mesures acústiques enregistrades amb el sonòmetre i les calculades amb el model de predicció (veure apèndix O). En la figura (5.2) es representen els carrers principals amb fletxes, representatives de la direcció del trànsit i el seu sentit. Les àrees (A_i) representen les zones on s'hi troben actualment habitatges i d'altres edificacions. Els nivells d'intensitat es corresponen amb la següent escala de colors:

	> 70 dB
	70 – 65 dB
	65 – 60 dB
	<60 dB

Correspondència entre els colors i l'escala de decibels (dB).

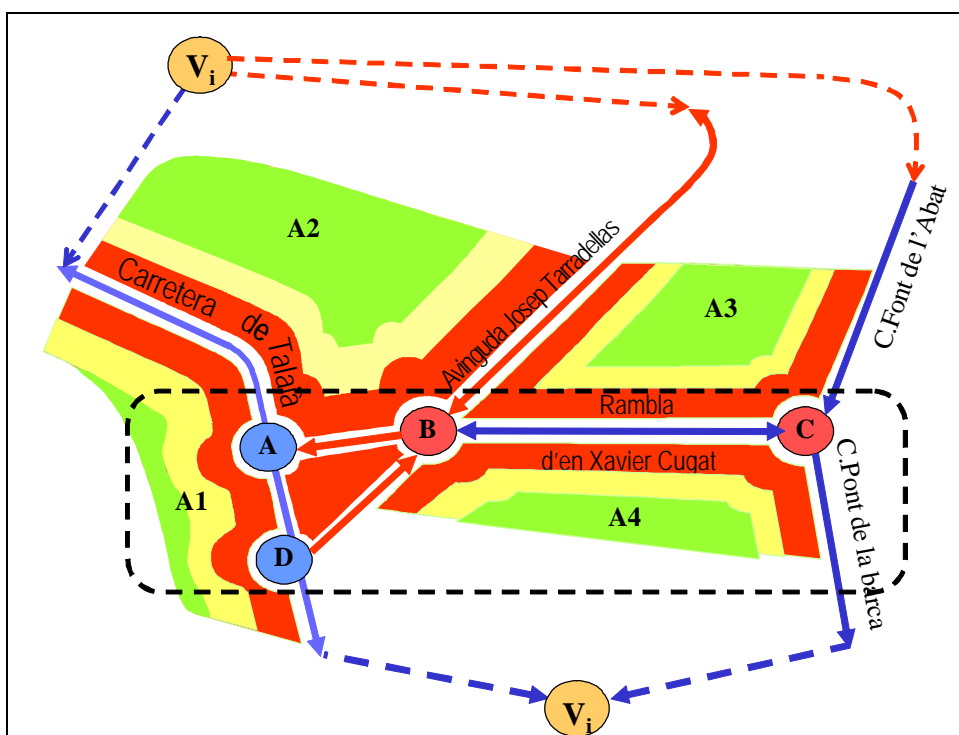


Figura 5.2.- Esquema de la zona 1 que reflexa la situació acústica actual.

En l'apèndix Y està representat el mapa acústic que es correspon amb la part central d'aquesta zona (Rambla d'en Xavier Cugat) fet amb el programa de simulació acústica MITRHA, on apareixen uns nivells de soroll molt similars. Aquestes zones i carrers s'han escollit amb els següents criteris:

- 1.-L'objectiu és estudiar el que succeeix en els carrers interiors (*dins el rectangle amb línia intermitent*), per la qual cosa s'han afegit dos vèrtexs extrems imaginaris, V_i , des d'on es distribueix tot el trànsit de vehicles que circula per la zona.
- 2.-El nombre de vehicles en aquests vèrtexs extrems es suposa invariant, doncs és representatiu del nombre total que travessa la ciutat. Aquesta xifra no es pot canviar a menys que es considerin solucions dràstiques com vies de circumval·lació de tota la ciutat, cosa que ja existeix a Girona (autopista A-7 i la nacional II). Si que es pot contemplar, però, l'opció de construir vies interiors alternatives amb la finalitat de descongestionar el trànsit en punts o zones especialment conflictius. La finalitat d'aquest estudi és aconseguir solucions parcials, però no per això menys efectives, que permetin millorar el confort acústic en determinades àrees.
- 3.-Gairebé tots els carrers tenen dos sentits de circulació, per la qual cosa s'ha fet un doble anàlisi, tot canviant els sentits dels vectors de flux en les vies de doble circulació. Tenint en compte que el màxim nivell acústic recomanat per l'OMS en un entorn urbà es de 65 dB, es desitjable que, en cap lloc, es sobrepassi aquesta cota. És recomanable, també, que en les zones residencials o en les àrees on hi ha un gran nombre d'habitatges els nivells acústics siguin sensiblement inferiors (*al voltant dels 55 dB*). Combinant els resultats que s'obtenen sobre la densitat de trànsit s'ha fet una estimació sobre el nombre de vehicles desitjable (72 durant 10 minuts) per tal de no sobrepassar el llindar acústic predeterminat.
- 4.-En els carrers de doble sentit s'ha suposat que la meitat dels vehicles circulen en una direcció determinada, mentre que la resta ho fan en l'altre sentit. Ara s'està en condicions d'aplicar la teoria de grafs.

La situació real actual es mostra en la figura (5.3) amb el nombre de vehicles mitjà que transita pels carrers durant la franja diürna, en períodes de 10 minuts.

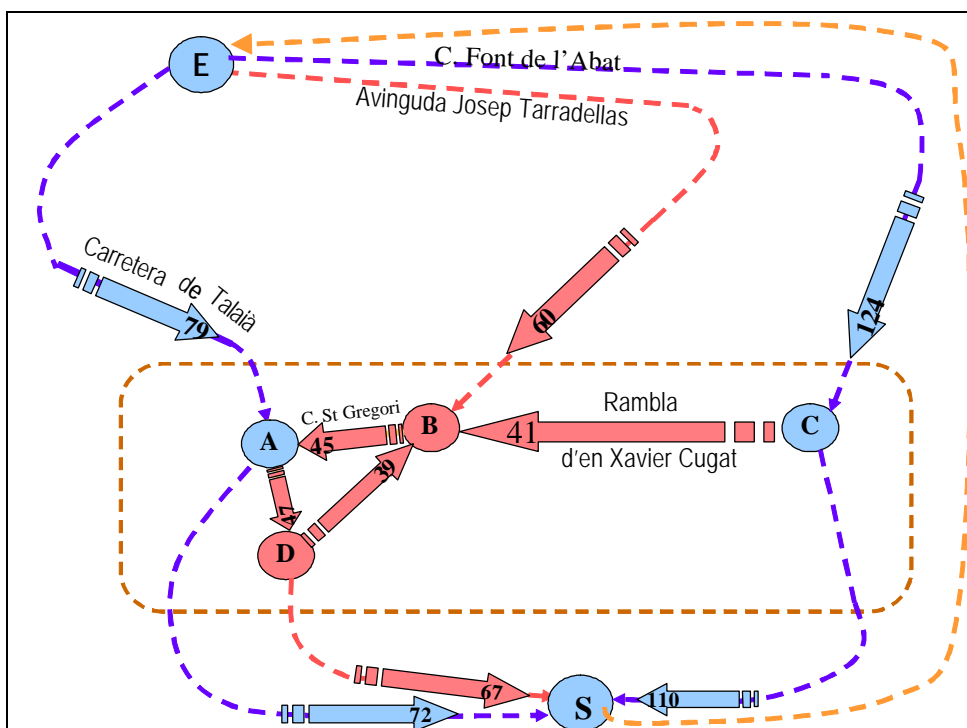


Figura 5.3.- Vectors de flux amb el nombre de vehicles en el sentit de la sageta.

Els vèrtexs extrems, V_i , són ara el nodes d'entrada, e , i de sortida, s , des d'on es ramifica tot el trànsit. Dins el rectangle amb línia intermitent s'aprecia que el flux de vehicles és superior a 36 en tots els vectors i , conseqüentment, el nivell sonor supera els 65 dB. Partint de la base que el flux de vehicles que entra en la zona és invariable, si es suposa que pels carrers interiors circulen com a màxim 36 vehicles en un sentit l'anàlisi de programació lineal aplicat a la teoria de grafs permet desenvolupar la metodologia que s'exposa a continuació.

Segons la teoria exposada en l'apartat (4.1.5) el flux de l'arc imaginari de retorn, $X_{(s,e)}$, ha de ser equivalent a tots els vehicles que arriben a la zona des del node d'entrada, e , fins els nodes a , b i c , d'acord amb el segon axioma, un cop s'ha maximitzat la funció objectiu:

$$\boxed{Z = X_{(s,e)}} \tag{5.1}$$

subjecte a les restriccions

$$S_1 \cdot \vec{X} = \vec{0} \Rightarrow \begin{matrix} & (e,a) & (e,b) & (e,c) & (a,d) & (d,b) & (b,a) & (d,s) & (c,s) & (c,b) & (a,s) & (s,e) \\ \begin{matrix} e \\ a \\ b \\ c \\ d \\ s \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} & \cdot \vec{X} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

on els parèntesis (i,j) d'aquesta matriu d'incidència representen els arcs orientats. El vector de flux, \vec{X} , es correspon amb el nombre de vehicles que circulen per cadascun dels arcs o carrers,

$$\vec{X} = (x_{(e,a)}, x_{(e,b)}, x_{(e,c)}, x_{(a,d)}, x_{(d,b)}, x_{(b,a)}, x_{(d,s)}, x_{(c,s)}, x_{(c,b)}, x_{(a,s)}, x_{(s,e)})$$

Igualar el producte de la matriu, S_1 , per aquest vector columna, \vec{X} , a zero, indica que en els nodes a , b , c i d ., el flux de vehicles que entra és igual al que en surt. Les restriccions relatives al nombre màxim de vehicles que poden transitar per un carrer o via són:

$$S_2 \cdot \vec{X} = \vec{R} \Rightarrow \begin{matrix} & (e,a) & (e,b) & (e,c) & (a,d) & (d,b) & (b,a) & (d,s) & (c,s) & (c,b) & (a,s) \\ \begin{matrix} (e,a) \\ (e,b) \\ (e,c) \\ (a,d) \\ (d,b) \\ (b,a) \\ (d,s) \\ (c,s) \\ (c,b) \\ (a,s) \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \cdot \vec{X} \leq \begin{pmatrix} 79 \\ 60 \\ 124 \\ 36 \\ 36 \\ 36 \\ 67 \\ 110 \\ 36 \\ 72 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Els resultats que s'obtenen amb el full de càlcul són:

ARCS	RESTRICCIONS	FLUX
Variables X_{e,a}	79	79
Variables X_{e,b}	60	60
Variables X_{e,c}	124	110
Variables X _{a,d}	36	31
Variables X _{d,b}	36	36
Variables X _{b,a}	36	-24
Variables X _{d,s}	67	67
Variables X _{c,s}	110	110
Variables X _{c,b}	36	0
Variables X _{a,s}	72	72
Variables X_{s,e}	0	249

Taula 5.2.- Nombre de vehicles en cada carrer.

Amb aquesta disposició matricial la funció objectiu coincideix en fer màxim el flux de la via de retorn X_(s,e), que en aquestes condicions té un valor de 249, i cal que coincideixi amb la suma dels valors originals dels fluxos dels carrers que entren dins la zona (*condició exigida pel segon axioma*):

$$\sum_{i=a,b,c} X_{(e,i)} = X_{(e,a)} + X_{(e,b)} + X_{(e,c)} = 263$$

Aquest darrer valor és superior, per la qual cosa s'estudia la inserció de noves vies dins la zona. Malgrat que existeixen algorismes matemàtics, aquests es fonamenten en la intuïció. El sistema més ràpid i fiable segueix essent la programació lineal, tot incloent amb criteri, els nous carrers en la matriu d'incidència. Després de diverses proves i assaigs s'ha trobat una solució que minimitza l'impacte ambiental en la zona. S'aconsegueix afegint una nou tram, (b,s), i convertint l'arc (b,d) en una via de doble circulació (figura 5.4)

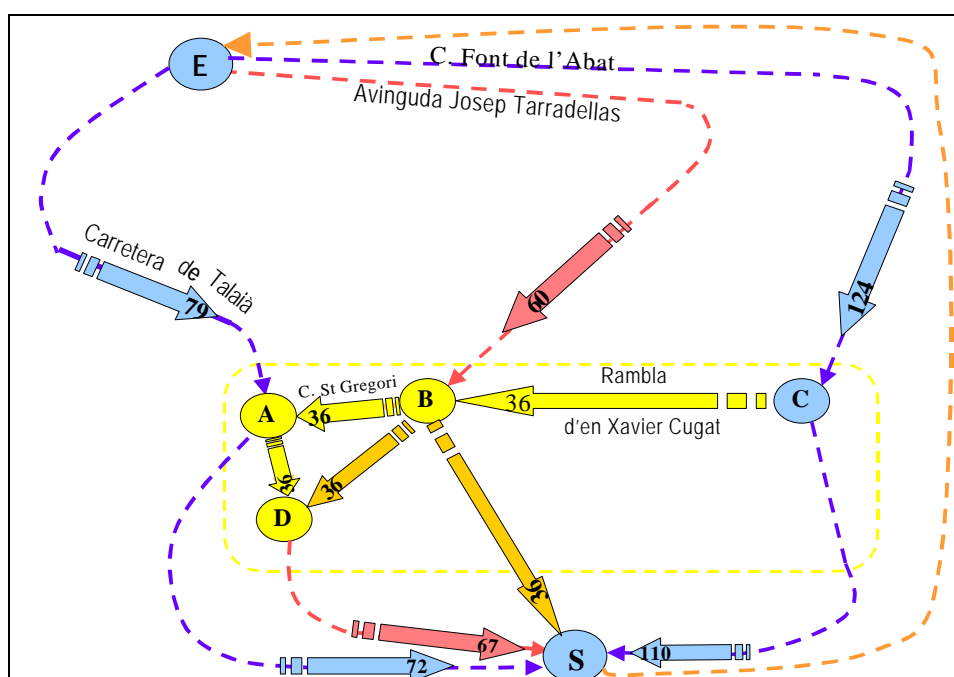


Figura 5.4.- Noves vies (color taronja) que s'afegeixen a la primera zona.

En les matrius d'incidència i les restriccions apareixen ara dues noves variables: $X_{(b,d)}$ i $X_{(b,s)}$. El primer representa simplement invertir el sentit de la circulació, en un carrer que actualment és de direcció única, mentre que el segon significaria construir una nova via de sortida. El primer, pel fet de representar un arc de doble sentit que es troba dins el perímetre habitable el nombre de vehicles màxim que pot circular en un sentit està limitat a 36, mentre que el segon carrer és una via de direcció única. Les vies d'accés i de sortida a l'interior de la zona tenen valors del flux molt superiors, doncs aquest estudi s'ha fet considerant invariant aquest nombre. Les matrius d'incidència, S_i , i les restriccions són ara:

$$S_1 \cdot \vec{X} = \vec{0} \Rightarrow \begin{matrix} & (e,a) & (e,b) & (e,c) & (a,d) & (d,b) & (b,a) & (d,s) & (c,s) & (c,b) & (a,s) & (s,e) & (b,d) & (b,s) \\ \begin{matrix} e \\ a \\ b \\ c \\ d \\ s \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} & \cdot \vec{X} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

anàlogament al cas anterior, aquesta igualtat matricial representa que el flux incident en els nodes és equivalent al que en surt. Pel que fa a les restriccions, que limiten el nombre de vehicles en els carrers, les inequacions esdevenen,

$$S_2 \cdot \vec{X} = \vec{R} \Rightarrow \begin{matrix} & (e,a) & (e,b) & (e,c) & (a,d) & (d,b) & (b,a) & (d,s) & (c,s) & (c,b) & (a,s) & (b,d) & (b,s) \\ \begin{matrix} (e,a) \\ (e,b) \\ (e,c) \\ (a,d) \\ (d,b) \\ (b,a) \\ (d,s) \\ (c,s) \\ (c,b) \\ (a,s) \\ (b,d) \\ (b,s) \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \cdot \vec{X} \leq \begin{pmatrix} 79 \\ 60 \\ 124 \\ 36 \\ 36 \\ 36 \\ 67 \\ 110 \\ 36 \\ 72 \\ 36 \\ 36 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

i en el vector de fluxos s'inclouen dos nous arcs

$$\vec{X} = \left(x_{(e,a)}, x_{(e,b)}, x_{(e,c)}, x_{(a,d)}, x_{(d,b)}, x_{(b,a)}, x_{(d,s)}, x_{(c,s)}, x_{(c,b)}, x_{(a,s)}, x_{(s,e)}, x_{(b,d)}, x_{(b,s)} \right)$$

En aquestes condicions si es maximitza la funció objectiu (equació 5.1), els resultats que s'obtenen són:

ARCS	RESTRICCIONS	FLUX
Variables X_{e,a}	79	79
Variables X_{e,b}	60	60
Variables X_{e,c}	124	124
Variables X _{a,d}	36	36
Variables X _{b,d}	36	31
Variables X _{b,a}	36	29
Variables X _{d,s}	67	67
Variables X _{c,s}	110	88
Variables X _{c,b}	36	36
Variables X _{a,s}	72	72
Variables X _{b,s}	36	36
Variables X_{s,e}	0	263

Taula 5.3.- Valors de l'anàlisi de la programació lineal sobre la figura 5.4.

El valor de la funció objectiu és ara: $z = X_{(s,e)} = 263$ que, per construcció, té el mateix valor que el flux eixint, representat per l'arc de retorn, $X_{(s,e)}$. En aquest cas, però, aquest valor coincideix amb la suma dels fluxos entrants a la zona, tal com s'exigeix en els axiomes

$$\sum_{i=a,b,c} X_{(e,i)} = X_{(e,a)} + X_{(e,b)} + X_{(e,c)} = 79 + 60 + 124 = 263$$

Paral·lelament, la densitat mitjana de la circulació en els carrers interiors (color blau en la taula 5.3), no sobrepassa les 36 unitats. Lògicament, el que és vàlid en un sentit, cal que també ho sigui en l'altre. En el gràfic (5.5) s'inverteixen els nodes d'entrada i sortida, així com la direcció dels arcs, respectant el sentit actual dels carrers.

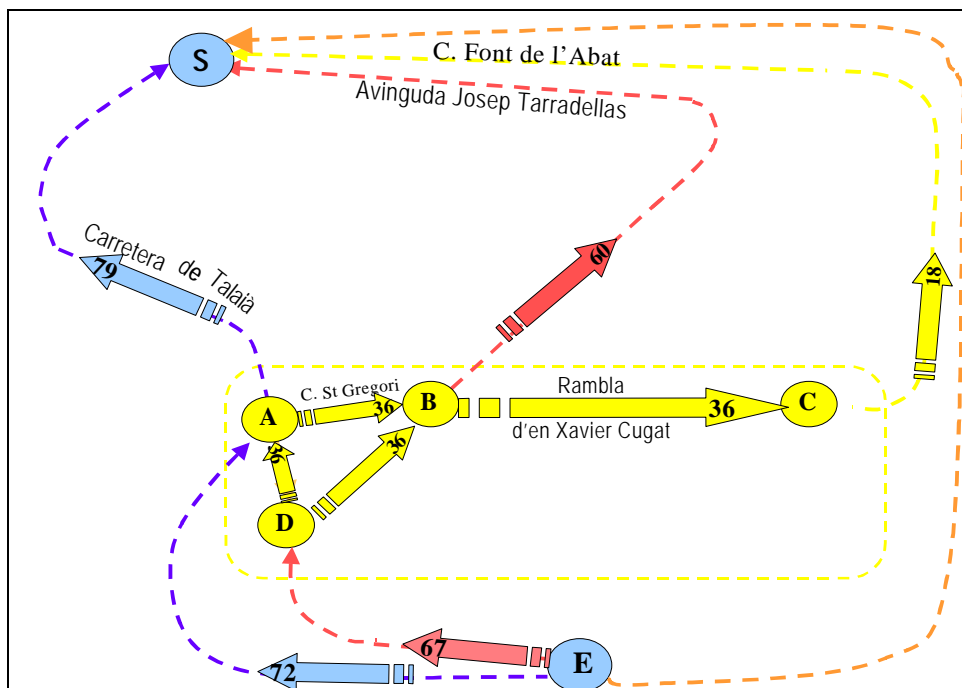


Figura 5.5.- Plànol de la zona 1, on s'han invertit els vèrtex extrems i les direccions.

En el darrer plànol cal destacar que no apareix l'arc (s,b), doncs es tracta d'una via de direcció única. Tampoc apareix l'arc (s,c) perquè es tracta d'una via de direcció única. L'arc (c,e) no forma una via de doble direcció amb l'arc (e,c), es tracta de vies de direcció única diferents i amb una densitat de circulació sensiblement diferent. Les matrius d'incidència són similars en valor absolut a les equacions anteriors, però amb els signes, representatius de les direccions dels arcs, invertits.

$$S_1 \cdot \vec{X} = \vec{0} \Rightarrow \begin{matrix} & (a,s) & (b,s) & (d,a) & (d,b) & (ab) & (e,d) & (bc) & (e,a) & (c,s) & (s,e) \\ \begin{matrix} e \\ a \\ b \\ c \\ d \\ s \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \vec{X} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

i les restriccions dels carrers són ara,

$$S_2 \cdot \vec{X} = \vec{0} \Rightarrow \begin{matrix} & (a,s) & (b,s) & (d,a) & (d,b) & (ab) & (e,d) & (bc) & (e,a) & (c,s) \\ \begin{matrix} (a,s) \\ (b,s) \\ (d,a) \\ (d,b) \\ (a,b) \\ (e,d) \\ (b,c) \\ (e,a) \\ (c,s) \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \vec{X} = \begin{pmatrix} 79 \\ 60 \\ 36 \\ 36 \\ 36 \\ 67 \\ 36 \\ 72 \\ 18 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Maximitzant la funció objectiu, representada per l'arc de retorn $X_{(s,e)}$, tal com s'aprecia en la taula (5.4), s'obtenen uns resultats compatibles amb les condicions i restriccions del problema.

ARCS	RESTRICCIONS	FLUX
Variables Xa,s	79	79
Variables Xb,s	60	60
Variables Xd,a	36	36
Variables Xd,b	36	31
Variables Xa,b	36	29
Variables Xe,d	67	67
Variables Xb,c	36	0
Variables Xe,a	72	72
Variables Xc,s	18	0
Variables Xs,e	0	139

Taula 5.4.- Valors de l'anàlisi de la programació lineal sobre els vectors de la figura 5.5.

El valor de la suma dels fluxos d'entrada equival al de l'arc de retorn.

$$\sum_{i=a,b} X_{(e,i)} = X_{(e,a)} + X_{(e,b)} = 67 + 72 = X_{(s,e)} = 139$$

i en els carrers interiors (color blau en la taula 5.4) no s'excedeix el límit de 36 vehicles en un únic sentit. Així, la solució proposada inicialment verifica els requeriments exigits i en aquestes condicions el nivell acústic de l'àrea interior disminuiria tal com es reflexa en el següent plànol:

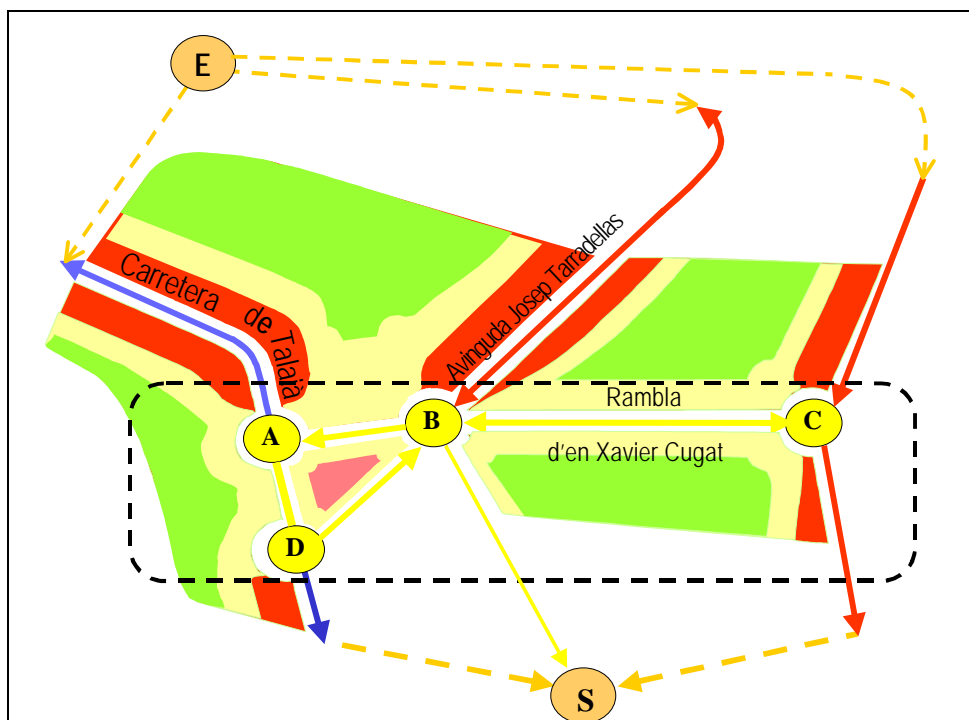


Figura 5.6.- Realitat acústica hipotètica després de la construcció de les noves vies.

S'aprecia que, segons aquest model, l'àrea habitada en l'interior del perímetre gaudiria d'un nivell acústic inferior als 65 dB. Aquesta teoria, tot i que pot considerar-se certa, està subjecte a certes limitacions i cal matisar-la acuradament.

Significat i limitacions dels resultats obtinguts

La situació, que està representada en la figura 5.6, representa una realitat acústica estimada a partir de les mitjanes dels nivells equivalents, $L_{eq,10}$. Això significa que aquesta distribució dels fluxos de trànsit és possible si es verifiquen els 5 axiomes, la qual cosa en la realitat no sempre succeeix ja que sovint hi ha vies, que per diferents motius (qualitat de l'asfalt, rapidesa, amplada, visibilitat...) són les preferides pels conductors. En cas que es construïssin aquestes noves vies la realitat no sempre seria la que es representa en el gràfic. Molt probablement, la major part del temps, els nivells acústics es correspondrien amb uns valors oscil·lants entre la realitat actual i aquesta situació hipotètica. El que és segur però, només pel fet de descongestionar el trànsit en certes vies actualment massa atapeïdes, és que el confort acústic de la zona milloraria sensiblement i que, en virtut del cinquè axioma i després de molt de temps, els valors mitjans de les mesures, enregistrades en el mateix punt, es correspondrien amb els nivells de la darrera il·lustració.

5.1.3.- Zona 2B

La situació actual ja és admissible, doncs el C.Bellaire i la part habitada de la crta. de Palamós estan per sota els 65 dB. Cal esmentar que l'Avinguda de França, malgrat no aparegui en el gràfic, supera lleugerament aquesta xifra.

Per reduir-ne la intensitat, però, s'hauria de construir una nova via que comunicés l'exterior amb la rotonda del Pont del Pedret, tot travessant el Ter. En la crta. de Palafrugell, malgrat es superin els 37 vehicles en un sentit, el traçat característic d'aquesta via (no massa ràpida en l'àrea propera a Girona), fa que rarament es superin els 65 dB. L'arc (a,s) es correspon amb la via d'accés al nucli de Girona. En el plànol que hi ha a continuació s'il·lustren els nivells acústics existents en aquesta zona.

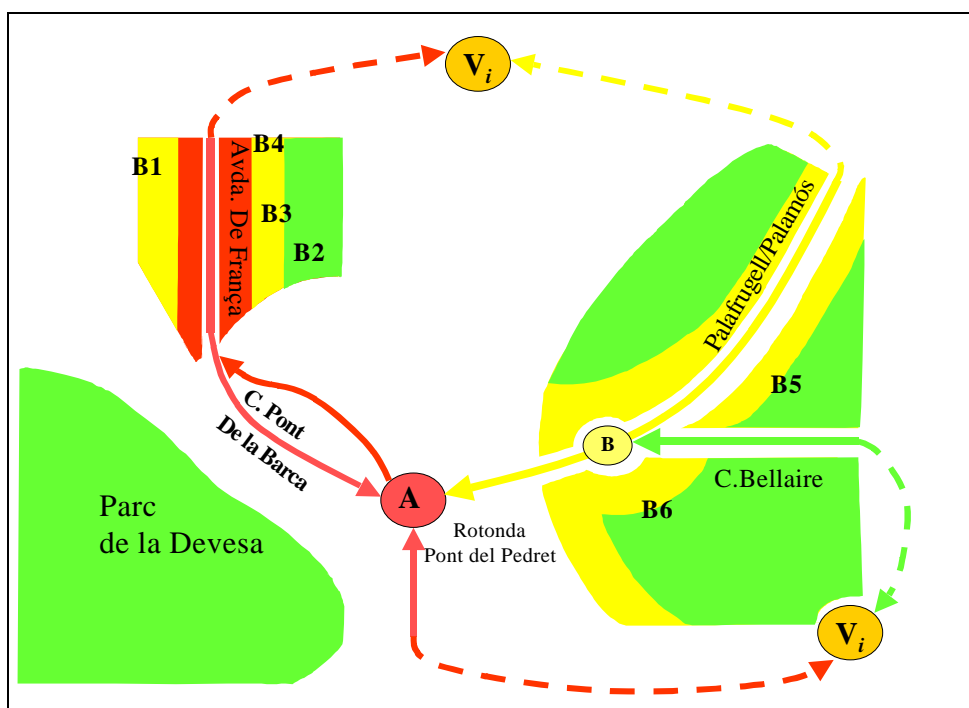


Figura 5.7.- Esquema de la zona 2 que reflexa la situació acústica actual.

En la part dreta del gràfic s'observa que la part habitada es troba dins els nivells sonors admissibles. L'anàlisi fet amb les tècniques d'optimització mostra que, lògicament, el flux de vehicles que circula per la zona és compatible i coherent amb els postulats dels axiomes. Les dades d'aquesta zona es recullen en la taula de l'apèndix O.

Anàlogament al procediment seguit en la zona 1, l'anàlisi es duu a terme suposant que, en les vies de doble circulació, la meitat dels vehicles circulen en un únic sentit i que la circulació es canalitza a través d'un node d'entrada, e , i un altre de sortida, s .

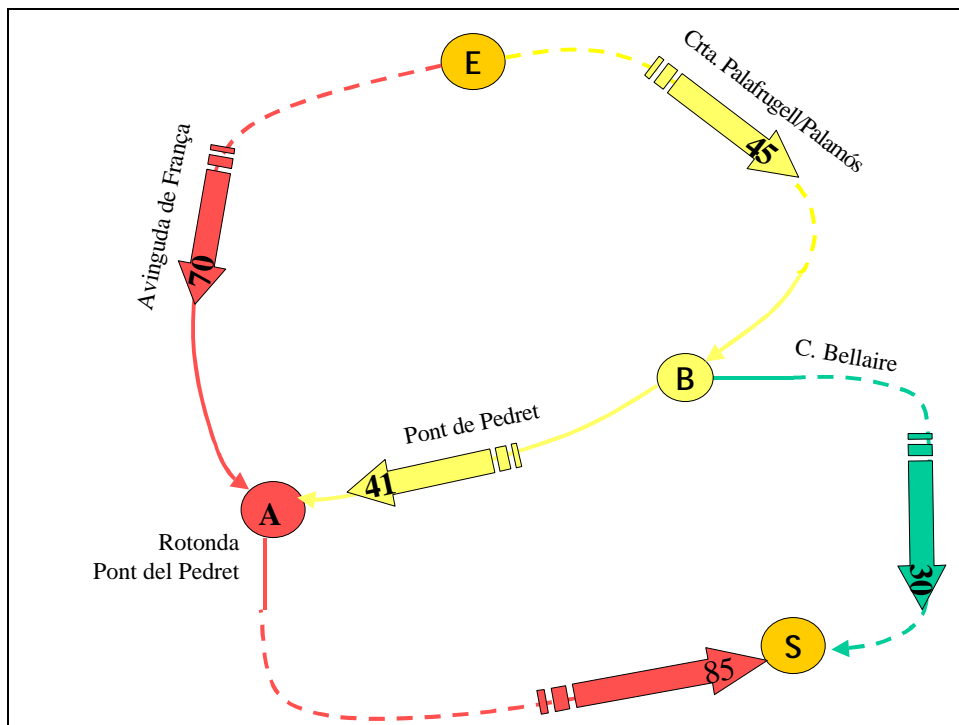


Figura 5.8.- Vectors de flux amb el nombre de vehicles en el sentit de la sageta.

Segons el principi d'aquesta metodologia, la funció objectiu a maximitzar, correspon al flux de vehicles de l'arc de retorn i és:

$$Z = X_{(s,e)}$$

subjecte a les igualtats dels fluxos que travessen els nodes i al nombre de vehicles màxim que pot circular per un carrer. Aquestes restriccions matricials estan representades respectivament per:

$$S_1 \cdot \vec{X} = \vec{0} \Rightarrow \begin{matrix} & (e,a) & (e,b) & (b,a) & (b,s) & (a,s) & (s,e) \\ \begin{matrix} e \\ a \\ b \\ s \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} & \cdot \vec{X} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$S_2 \cdot \vec{X} = \vec{R} \Rightarrow \begin{matrix} & (e,a) & (e,b) & (b,a) & (b,s) & (a,s) \\ \begin{matrix} (e,a) \\ (e,b) \\ (b,a) \\ (b,s) \\ (a,s) \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \cdot \vec{X} \leq \begin{pmatrix} 70 \\ 45 \\ 41 \\ 30 \\ 85 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

i el vector de flux, representatiu dels vehicles que circulen pels carrers és:

$$\vec{X} = (x_{(e,a)}, x_{(e,b)}, x_{(b,a)}, x_{(a,s)}, x_{(b,s)}, x_{(s,e)})$$

en la taula següent es mostren els resultats obtinguts,

ARCS	RESTRICCIONS	FLUX
Variables X_{e,a}	70	70
Variables X_{e,b}	45	45
Variables X _{b,a}	41	15
Variables X _{b,s}	30	30
Variables X _{a,s}	85	85
Variables X_{s,e}	0	115

Taula 5.5.- Resultats de la programació lineal.

El valor de la funció objectiu, que coincideix amb el flux de la via de retorn $X_{(s,e)}$, és equivalent al nombre de vehicles que entra i surt de la zona en un període de 10 minuts, d'acord amb la condició imposada pel segon axioma.

$$\sum_{i=a,b} X_{(e,i)} = 70 + 45 = \sum_{i=a,b} X_{(i,s)} = 30 + 85 = X_{(s,e)} = 115$$

Cal que també es verifiqui l'anàlisi en sentit contrari, invertint el sentit dels vectors de flux, d'acord amb aquest plànol.

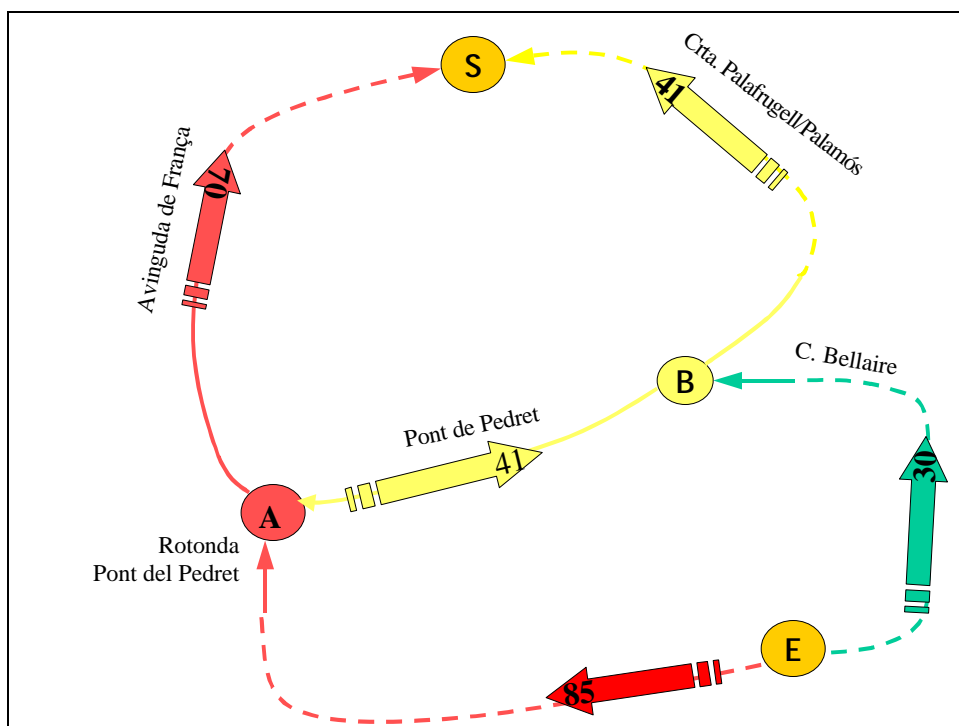


Figura 5.9.- Representació de la zona 2 amb els sentits dels vectors de flux invertits.

Les matrius d'incidència, S_i , i les equacions de restricció són ara:

$$S_1 \cdot \vec{X} = \vec{0} \Rightarrow \begin{matrix} & (e,a) & (e,b) & (a,b) & (b,s) & (a,s) & (s,e) \\ \begin{matrix} e \\ a \\ b \\ s \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} & \cdot \vec{X} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad S_2 \cdot \vec{X} = \vec{R} \Rightarrow \begin{matrix} & (e,a) & (e,b) & (b,a) & (b,s) & (a,s) \\ \begin{matrix} (e,a) \\ (e,b) \\ (b,a) \\ (b,s) \\ (a,s) \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \cdot \vec{X} \leq \begin{pmatrix} 85 \\ 30 \\ 41 \\ 45 \\ 70 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Donada la simetria del graf, aquestes equacions són pràcticament idèntiques a les expressions inicials, doncs només canvia el sentit de l'arc (a,b). Per això, els valors obtinguts quan es maximitza la funció objectiu són vàlids i molt similars als d'abans.

ARCS	RESTRICCIONS	FLUX
Variables Xe,a	85	85
Variables Xe,b	30	30
Variables Xa,b	41	15
Variables Xb,s	45	45
Variables Xa,s	70	70
Variables Xs,e	0	115

Taula 5.6.- Dades de l'anàlisi de programació lineal.

S'aprecia que, en aquest cas, també es compleix la condició exigida, ja que el flux entrant coincideix amb el de la via de retorn.

$$\sum_{i=a,b} X_{(e,i)} = 85 + 30 = \sum_{i=a,b} X_{(i,s)} = 70 + 45 = X_{(s,e)} = 115$$

5.2.- PROPOSTA DE XARXA DE TRANSPORT PÚBLIC

5.2.1. Anàlisi del tancament de l'àrea central: xarxa de transport públic (J.R.)

La gran densitat de vehicles que circulen per les zones centrals de les ciutats d'arreu del món, provoca greus problemes mediambientals entre els que destaca el que ja s'anomena contaminació acústica. Els esforços dels ajuntaments per minimitzar el seu impacte es concreten en solucions del tipus:

- Implantació de bandes sonores en els carrers.
- Restringir l'accés de determinats tipus de vehicles dins determinades zones.
- Millorar la xarxa de transport públic.

Malgrat que totes aquestes propostes són vàlides, la seva eficàcia, sovint, és mínima. La qualitat de vida de la gent en termes de confort acústic gairebé no varia i els seus efectes en els punts on la densitat de població és màxima són inapreciables. La proposta que es fa en aquest treball per les zones interiors de la ciutat, i per qualsevol àrea amb una elevada densitat de vehicles, és una solució radical però sempre efectiva: el tancament de la zona al trànsit urbà.

Vies d'accés a Girona	Nombre de vehicles/10' (x_i)	Pàrkings (P_i)
Carretera de Talaià	158	P₁
Avinguda de França	125	
Carrer de Santa Eugènia	86	P₂
Passeig d'Olot	120	
Carrer Barcelona	142	P₃
Avda. Lluís Pericot	85	
Carrer del Carme	136	P₄
Crta. Palamós	89	

Taula 5.7.- Principals vies d'accés i fluxos mitjans diürns de vehicles.

Es suposa que aquestes densitats de vehicles es refereixen a la franja horària diürna estàndard que s'estén des de les 7.00 am fins les 10.00 pm. perquè es vol estimar el nombre de vehicles i persones màxim que poden arribar diàriament a Girona. És clar que aquesta xifra no pot ser mai superada durant les 11 hores que comprèn el període nocturn entre les 10.00 pm. i les 7.00 am. El nombre de vehicles, N_i , que entren diàriament a Girona per aquestes vies i en virtut del segon axioma del trànsit, també dels que surten, es calcula a partir de la meitat d'aquest fluxos.

$$N_i = \left[\frac{x_i}{2} \frac{1}{10'} \right] \cdot \left(\frac{60''}{1h} \right) \cdot \left(\frac{15h}{Dia} \right) = 45x_i \text{ (vehicles / dia)}$$

Llavors una estimació del volum diari de vehicles que circulen en un sentit per cadascuna de les vies i que arribarien als aparcaments diàriament és:

Vies d'accés a Girona	Núm. vehicles/15h (N_i)	Núm. vehicles/15h (<i>Places de pàrking</i>)	Pàrking (P_i)
Carretera de Talaià	7.110	13.000	P₁
Avinguda de França	5.625		
Carrer de Santa Eugènia	3.870	9.500	P₂
Passeig d'Olot	5.400		
Carrer Barcelona	6.390	10.500	P₃
Avda. Lluís Pericot	3.825		
Carrer del Carme	6.120	10.200	P₄
Crta. Palamós	4.005		

Taula 5.8.-Aproximació per excés del nombre de vehicles.

A partir d'aquí pot fer-se un càlcul aproximat de la capacitat que haurien de tenir aquestes zones d'aparcament. Un dia és un curt període de temps, per la qual cosa no és vàlid suposar que diàriament surten el mateix nombre de vehicles que entren, en totes les franges horàries. A partir de les observacions enregistrades, en la ciutat de Girona, durant el treball de camp on s'ha realitzat el comptatge dels vehicles, s'ha estimat que la probabilitat acumulada, representativa del percentatge de vehicles que arriben a cada una de les zones al llarg de la jornada es de

Percentatges i franges horàries de la funció d'entrada: e(t)					
7.00 am - 9.00 am	9.00 am - 1.00 pm	1.00 pm - 2.00 pm	2.00 pm - 7.00 pm	7.00 pm - 8.30 pm	8.30 pm - 10.00 pm
25%	50%	60%	85%	90%	100%

Taula 5.9.- Probabilitat acumulada de e(t).

Lògicament, també en surten. El ritme de sortida s'ha descrit amb els percentatges que ara representen la probabilitat que tenen de sortir els vehicles que han arribat dins l'aparcament en les respectives franges horàries.

Percentatge estimant dels vehicles que surten en cada franja horària					
7.00 am - 9.00 am	9.00 am - 1.00 pm	1.00 pm - 2.00 pm	2.00 pm - 7.00 pm	7.00 pm - 8.30 pm	8.30 pm - 10.00 pm
4%	45%	60%	40%	90%	95%

Taula 5.10.- Percentatge estimat, respecte als vehicles que hi ha dins, dels vehicles que surten.

Aquests percentatges es refereixen al nombre total dels vehicles que han entrat, els valors dels quals es recullen en la taula (5.12). Els criteris a partir dels quals s'han desenvolupat les fórmules corresponents s'han dissenyat a partir de les respostes fetes al personal del pàrking de la plaça Major de Vic i el pàrking de la plaça Catalunya de Girona. Els càlculs en cada una de les zones d'aparcament es fan a partir de gràfiques de probabilitat acumulada i tècniques d'interpolació polinòmica.

5.2.2.- Càlcul del nombre de places d'aparcament

A continuació es desenvolupa una metodologia sobre una única zona d'aparcament, P_1 , tot i que el mètode exposat és extrapolable a qualsevol àrea d'estacionament. Les dades relatives al nombre de vehicles que entren passat un cert temps són:

Temps/s	Núm. vehicles
7.200	3.250
25.200	7.800
46.800	11.700
54.000	13.000

Taula 5.11.- Nombre de vehicles de l'aparcament P_1 .

Mitjançant la interpolació polinòmica es pot trobar una funció del temps que s'ajusti a aquestes dades i que permetrà conèixer el nombre de vehicles que han entrat en qualsevol instant. Amb el programa *Derive* s'obté el polinomi que verifica aquestes condicions:

$$e(t) = \frac{t^3 - 126.000 \cdot t^2 + 9.700.560.000 \cdot t + 1.971.216.000.000}{25.660.800.000}$$

Aquesta funció descriu com els vehicles s'acumulen dins l'aparcament a mesura que passa el temps. Al final del dia, però, no s'acumulen 13.000 vehicles, doncs es tracta d'una situació

dinàmica on contínuament entren nous vehicles, però alhora també en surten. El nombre de vehicles que hi ha dins l'aparcament s'ha estimat a partir de les diferències entre els fluxos entrants i sortints. Els que surten s'han estimat amb els percentatges de la taula (5.10) respecte al total acumulat dels que han entrat en cada franja horària. Aquestes xifres apareixen en la darrera columna de la taula següent.

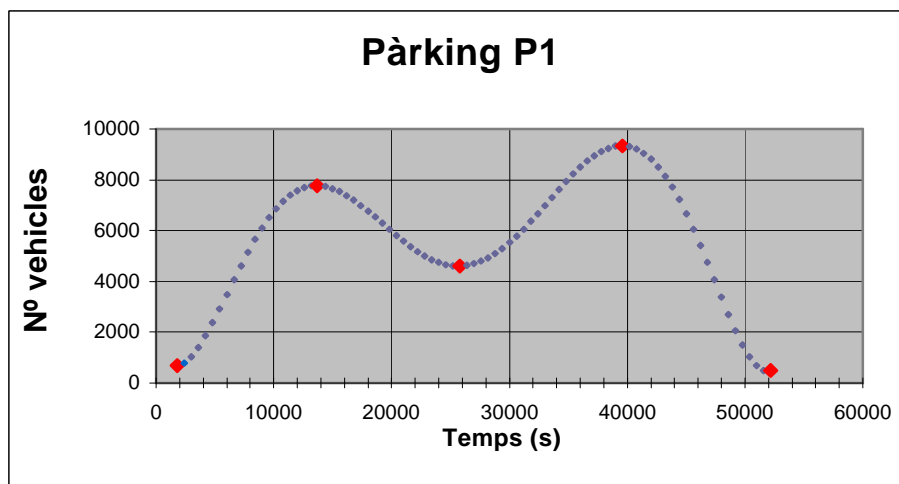
Franges horàries	Temps (segons)	HAN ENTRAT	SURTEN	Nº vehicles/ franja horària
7.00 am - 9.00 am	7.200	3.250	130	3.120
9.00 am - 1.00 pm	21.600	7.035	3.166	3.870
1.00 pm - 2.00 pm	25.200	7.800	4.680	3.120
2.00 pm -7.00 pm	43.200	11.077	4.431	6.646
7.00 pm -8.30 pm	48.600	12.016	10.815	1.202
8.30 pm -10.00 pm	54.000	13.000	12.350	650

Taula 5.12.- Nombre i fluxos de vehicles en les respectives franges horàries.

Emprant un mètode d'interpolació polinòmica s'ha trobat una expressió, $N_{P_1}(t)$, que representa nombre de vehicles en funció del temps. En el càlcul d'aquesta funció, però, s'han afegit 1.500 vehicles, 14.500 en total, representatius dels que hi podrien accedir per altres vies que no fossin les principals.

$$\begin{aligned}
 N_{P_1}(t) = & \frac{3001127 \cdot t^6 - 477289204200 \cdot t^5 + 28045740620160000 \cdot t^4}{184518219884544000000000000000} + \\
 & + \frac{-740620397588544000000 \cdot t^3 + 82773301182069888000000000 \cdot t^2}{184518219884544000000000000000} + \\
 & + \frac{-22963202318633011200000000000 \cdot t + 36903643976908800000000000000000}{184518219884544000000000000000}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

i la seva representació gràfica és:



Gràfic 5.1.- Gràfica de la funció $N_{P_1}(t)$.

L'origen del temps es refereix a les 7.00 am. Els valors dels extrems locals es recullen en la taula que es mostra a continuació. Aquestes dades s'han calculat diferenciant l'equació (5.2).

EXTREMS LOCALS	t₁(Mínim)	t₂(Màxim)	t₃(Mínim)	t₄(Màxim)	t₅(Mínim)
Temps	1.772	13.659	25.679	39.528	51.889
Núm. vehicles	695	7773	4608	9349	459

Taula 5.13.- Valors dels extrems locals de la funció $N_{P1}(t)$.

Els mínims es corresponen al principi de la jornada i al vespre, mentre que els màxims tenen lloc en entorns centrats en les 10h 48min. i les 17h 58 min. S'observa també que entre aquests dos màxims hi ha un mínim local al voltant de les 14h i 10min. Evidentment, aquest comportament és típic d'un dia laborable i pot diferir sensiblement entre les ciutats. Malgrat que aquest perfil sigui susceptible de variacions en funció de la localitat, la dada rellevant en aquest estudi és precisament la capacitat màxima. Aquesta xifra ens la dona precisament el màxim de la funció $N_{P1}(t)$ amb un valor de 9349 vehicles o gairebé el 65% dels vehicles estimats que arriben a l'àrea d'aparcament durant un dia.

Zones d'aparcament P₂, P₃ i P₄

En la taula (5.14) s'ha calculat el nombre de vehicles que arriben diàriament per les vies d'accés principals als que s'afegeixen també 1.500 que hi podrien accedir per altres camins. El 65% del nombre total dels vehicles que arriben indicarien els nivells d'ocupació màxima. Abans d'aplicar aquesta metodologia a Girona, però, seria necessari un treball de camp en la mateixa ciutat més acurat i representatiu.

Vies d'accés a Girona	Nº de vehicles/ dia (N_i)	Capacitat màxima	Pàrking (P_i)
Carretera de Talaià	14.500	9.425	P₁
Avinguda de França	11.000	7.150	P₂
Carrer de Santna Eugènia	12.000	7.800	P₃
Passeig d'Olo	10.200	6.630	P₄
Carrer Barcelona			
Avda. Lluís Pericot			
Carrer del Carme			
Crta. Palamós			

Taula 5.14.- Capacitats màximes de cada una de les zones d'aparcament.

Significat i reflexió sobre aquestes dades

Sens dubte, davant el gran nombre de vehicles que arriben i circulen per Girona en un dia laborable (40.000 aproximadament) no és viable la construcció de zones d'aparcament que puguin absorbir aquest flux de trànsit. Davant d'aquesta realitat si es considerés la possibilitat d'aïllar totes o alguna d'aquestes zones, a més de la construcció de grans zones d'aparcament

s'hauria de fer un estudi acurat de mobilitat de la gent que arriba diàriament a Girona i potenciar alhora la construcció de noves infraestructures de transport que poguessin absorbir tot el volum de persones que arriben a la ciutat.

Proposta de xarxa de transport públic

En cas que aquest tancament al trànsit fos possible es presenta un model de xarxa de transport que permet estudiar l'impacte acústic sobre la ciutat en aquesta situació hipotètica. La idea d'aquest estudi consisteix en dissenyar una xarxa d'autobusos amb les estacions localitzades en les zones d'aparcament per garantir l'accés dels usuaris a la part central de la ciutat. En primer lloc caldria localitzar els punts on es concentra una major densitat de població. Tanmateix, a partir de l'observació directa dels carrers de Girona, s'ha vist que aquesta densitat és força uniforme en les zones centrals. No obstant, pot dissenyar-se una xarxa de rutes que cobreixi els nuclis principals alhora que els carrers més transitats. En el plànol de la figura (5.11) estan representats aquests punts principals, juntament amb les trajectòries que els comuniquen amb les estacions d'autobusos.

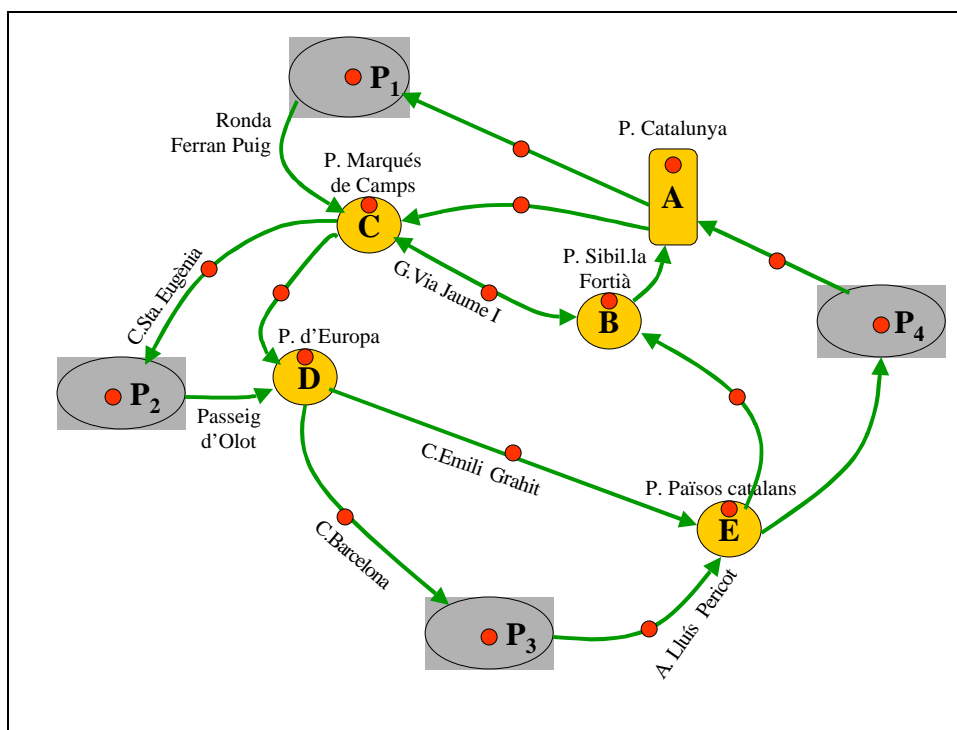


Figura 5.11.- Disseny de la xarxa de transport públic.

En aquest plànol estan representades les trajectòries dels autobusos així com les principals parades (*punts vermells*). La simetria del graf suggereix la possibilitat que de cada zona d'aparcament, P_i , podrien sortir periòdicament autobusos que, en sentit antihorari, recorrerien consecutivament les 5 places o nodes (A, B, C, D i E), començant pel més proper, i després retornarien al punt d'origen.

En principi, els ocupants dels vehicles es repartirien de manera uniforme per tota l'àrea gironina. Una estimació del nombre mig d'ocupants, 3, s'ha fet considerant la mitjana aritmètica entre el nombre de passatgers màxim i el mínim. En la taula apareix el nombre mig

de persones que podrien arribar als pàrkings i el nombre d'autobusos (60 places) necessaris per distribuir-los en la franja diürna de 900 minuts.

Pàrking	Núm. d'usuaris	Autobusos/dia	Periodicitat (minuts)
P1	43.500	725	1'24 min.
P2	33.000	550	1'63 min.
P3	36000	600	1'5 min.
P4	24000	400	2'25 min.

Taula 5.15.- Periodicitat dels autobusos.

Ara, cal fer una previsió del soroll que generarien en els carrers. Això pot fer-se emprant la fórmula de predicció de soroll. En primer lloc, cal fer un càlcul estimatiu del nombre mig d'autobusos que circularien pels carrers de la ciutat durant 10 minuts, als que cal afegir els aproximadament 150 que cada dia arriben i surten de l'actual estació. Es fa referència a aquest interval de temps perquè el model de predicció s'ha generat a partir de nivells equivalents de 10 minuts de durada. Tenint en compte que la xarxa de transport estaria formada per 12 vies (figura 5.11) el nombre mitjà d'autobusos que circularien per un carrer en aquest interval de temps és:

$$2425 \text{ autobusos} \frac{\text{Franja horària}}{15 \text{ h}} \frac{1 \text{ h}}{6 \cdot (10 \text{ min.})} \frac{1}{12 \text{ carrers}} \approx 3 \text{ (bus/10')}$$

Tot i que realment passarien pels carrers aquests autobusos (2425), donat que les trajectòries seguirien cicles tancats, el nombre real efectiu seria molt inferior. De fet, un càlcul estimatiu dóna una xifra inferior a les 80 unitats. En aquestes condicions no hi hauria cap vehicle lleuger ni motocicleta, per la qual cosa el nombre total de vehicles coincidiria amb els pesats, N_{vp} , essent igual a 3. Cal tenir en compte, però, l'inevitable trànsit de vehicles de servei: ambulàncies, càrrega i descàrrega, correus i escombraries. També, cal tenir en compte els propietaris de places de pàrking en l'interior de la zona. Així s'estima que aquesta xifra s'incrementaria fins arribar a un flux aproximat per cada carrer de 5 vehicles cada 10 minuts. En aquesta franja de vehicles la fórmula de predicció (4.18) i els valors dels coeficients de l'apèndix K donen el següent resultat:

$$S_{so} = 10 \text{Log} \left[10^{\frac{L_{LL}(N_{LL})}{10}} + 10^{\frac{L_P(N_P)}{10}} \right] + C_0 \cdot C_{LL}^{N_{LL}} \cdot C_P^{N_P} = 50 \text{ dB}$$

on les constants del factor de correcció corresponen a un flux equivalent de 4 vehicles pesats (autobusos) i 1 de lleuger en 10 minuts i es redueixen a:

Nombre de vehicles:N	C _P	C _{LL}	C ₀
2-5	1	1,055115222	3,811405792

A aquests 50 dB cal afegir el soroll provocat pel ferrocarril quan passa pel viaducte que travessa la ciutat. D'acord amb les fórmules desenvolupades en l'apartat (3.2.1) s'ha estimat que els nivells acústics mitjos que genera el pas del ferrocarril en un punt situat a una distància

de 15 m i durant un interval de 10 s són de l'ordre dels 79 dB. Així, aplicant la fórmula de composició de nivells (1.19) pot calcular-se el soroll que puntualment produiria el pas del tren

$$S_{so} = 10 \text{Log} \left[10^{49/10} + 10^{79/10} \right] \approx 79 \text{ dB}$$

Evidentment, aquest problema desapareixeria si es portés a terme el soterrament del ferrocarril. En cas de considerar aquesta opció, però, caldria tenir en compte els elevats nivells de soroll que es generen en la boca de la cavitat, tal com s'exposa en l'apartat (4.2.3) del capítol anterior.

Aquest projecte, tot i que representaria un cost considerable per la ciutat alhora que un canvi radical de la cultura viària dels ciutadans, suposaria un guany enorme en termes de confort acústic i de la qualitat de vida en general. Cal remarcar que la proposta d'aquest treball de tesis és teòrica. Probablement una solució parcial, on l'àrea restringida al trànsit fos menor, seria menys efectiva, però més realista. En aquest estudi només es pretén desenvolupar mètodes per avaluar l'impacte acústic provocat pel trànsit i presentar una hipotètica solució, la viabilitat de la qual estaria subjecte a varis estudis geològics i d'impacte mediambiental previs.

Malgrat tots els inconvenients, els nivells sonors de la ciutat experimentarien una reducció considerable. En aquesta àrea central, més sorollosa, la reducció seria de gairebé 20 dB en promig. En els plànols acústics de l'apèndix P està representada la situació actual. Si només estigués en circulació la xarxa de transport es reduirien considerablement els nivells d'emissió. En l'apèndix Q es mostren aquestes mateixes zones amb els nivells de soroll corresponents a aquesta situació hipotètica.

5.3.- ANÀLISI ESTADÍSTIC (J.R.)

Aquest estudi estadístic s'enfoca des d'una perspectiva descriptiva per tal d'abastar i entendre la realitat acústica de Girona. Es divideix fonamentalment en quatre fases:

- I- Valoració de les dades experimentals
- II- Mostra exhaustiva del territori: anàlisi de normalitat
- III- Estadística descriptiva de les mesures reals
- IV- Valoració conjunta dels resultats experimentals i els estimats amb diferents models de predicció.

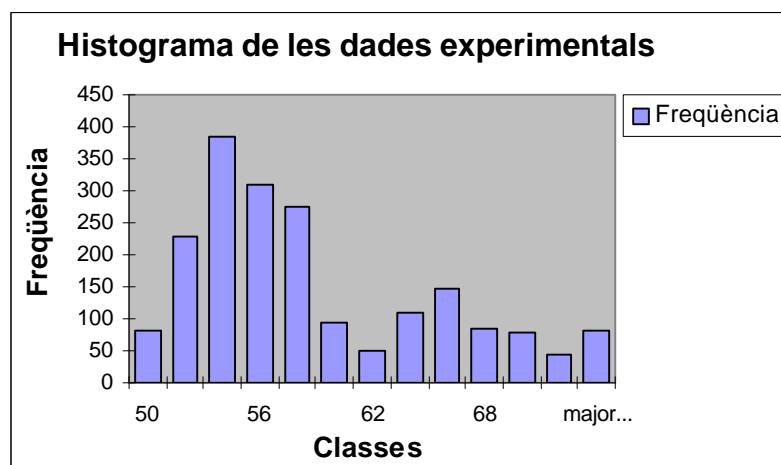
5.3.1.- Valoració de les dades experimentals

Els paràmetres estadístics que es recullen en la taula (5.16) s'han calculat a partir de tota la població de dades que es disposa del territori. Conseqüentment, els resultats i conclusions que se'n poden extreure difereixen força dels que s'obtenen a partir d'una mostra estadísticament representativa del territori. Els principals paràmetres estadístics que descriuen aquesta conjunt de dades són:

<i>Paràmetres Estadístics</i>	<i>Valors Experimentals</i>
Mitjana	57,97
Error típic	0,15
Mediana	55,90
Moda	53,60
Desviació estàndard	6,61
Variança de la mostra	43,65
Curtosis	-0,15
Coefficient d'asimetria	0,90
Rang	29,60
Valor mínim	47,60
Valor màxim	77,20

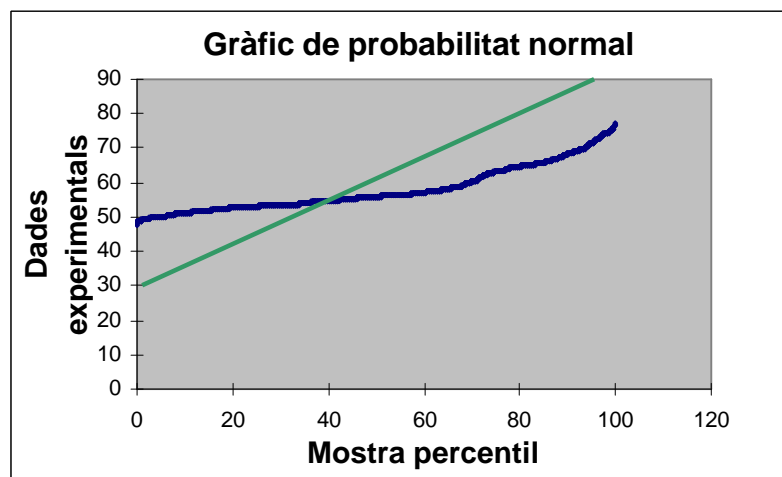
Taula 5.16.- Paràmetres estadístics de la població o conjunt de dades.

Entre aquests valors destaca el fet d'una mitjana, 57'97 dB, força baixa pels nivells de soroll que s'acostuma a suportar dins de Girona i un valor del coeficient d'asimetria, 0'90, força elevat. Aquestes dades es comentaran àmpliament en els següents apartats. D'altra banda, l'histograma on es representen les freqüències de les dades calculades experimentalment i les estimades amb el model de predicció respecte als intervals de classe que agrupen les mesures acústiques és:



Gràfic 5.2.- Histograma de les mesures experimentals.

El perfil d'aquest gràfic no s'ajusta massa al propi de la corba normal o de Gauss. Aquest fet atípic, no ho és tant si es considera el criteri amb que es van prendre aquest conjunt de dades, doncs s'enregistraren principalment amb la intenció d'esbrinar els punts acústicament conflictius de Girona i no per fer un anàlisi exhaustiu del territori. Aquesta característica també es pot apreciar en el gràfic de probabilitat normal, en el que una distribució s'ajusta a la normal en la mesura que els seus punts s'apropin a una línia diagonal.



Gràfic 5.3.- Gràfic de probabilitat normal de les dades experimentals.

En la figura anterior es ratifica aquesta observació. Els punts representatius de la distribució s'allunyen força de la línia diagonal. Tanmateix, aquest gran banc de dades ha estat de gran utilitat per poder desenvolupar el model de predicció fet per l'autor.

$$S_{so} = 10 \text{Log} \left[10^{\frac{L_{LL}(N_{LL})}{10}} + 10^{\frac{L_M(N_M)}{10}} + 10^{\frac{L_P(N_P)}{10}} \right] + C_0 \cdot C_{LL}^{N_{LL}} \cdot C_M^{N_M} \cdot C_P^{N_P}$$

Una descripció més acurada, però, del nivell de soroll global de la ciutat cal que es faci a partir d'una mostra de mesures més representativa.

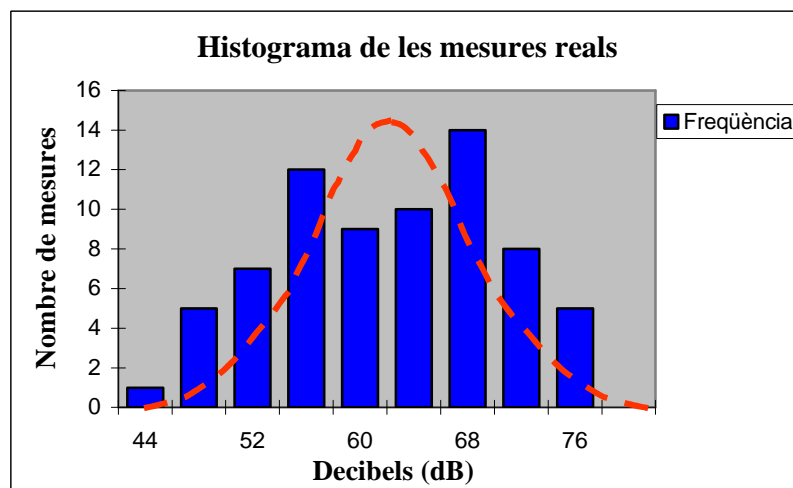
5.3.2.- Mostra exhaustiva del territori: anàlisi de normalitat

Per tenir una idea general dels nivells acústics de qualsevol territori, en primer lloc, cal fer una divisió del terreny en zones d'igual superfície. Els criteris en base als quals s'han escollit les mesures en cadascuna d'aquestes zones són:

- S'ha escollit l'àrea metropolitana de la part central del territori (apèndixs T i U) excloent-ne les zones perifèriques on la densitat de població, el flux de vehicles i els nivells de soroll són menors. S'ha dividit la zona en 36 quadrats idèntics, el costat dels quals té una longitud de 418 metres i cadascun cobreix una superfície de 174.724 m².
- El conjunt de mesures que s'han realitzat dins cadascun dels quadrats que cobreixen el territori s'han dividit en dues parts segons la mediana. D'aquesta manera s'obtenen dos grups de mesures corresponents als nivells acústics majors i menors. Seguidament s'ha calculat la mitjana aritmètica de cadascun d'aquests grups de dades per tenir dues mesures representatives dels nivells de soroll existent en cada zona durant la franja diürna. S'ha seguit aquesta metodologia per tenir un conjunt de mesures representatives i objectives dels nivells de so existents en el territori.

En certa manera, s'ha aplicat un mostreig intencionat seguint la teoria desenvolupada inicialment per Gallup, doncs s'han escollit com valors representatius dues mitjanes aritmètiques enlloc de només una que englobés totes les dades enregistrades en cada una de les àrees considerades. De fet, però, si

s'exceptuen les zones perifèriques del perímetre analitzat i es fa un mostreig aleatori escollint aquests punts, dins cada zona, aleatòriament s'obtenen resultats molts similars als que apareixen en la taula de l'apèndix T. Aquestes mesures, com gairebé qualsevol conjunt de dades d'un experiment empíric s'ajusten força al perfil de la corba normal, tal com s'aprecia en l'histograma, tot i que en aquest cas es tracta d'una distribució bimodal:



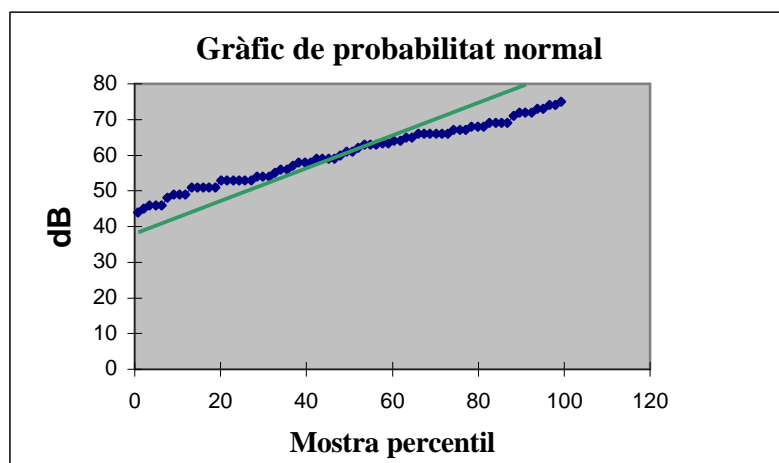
Gràfic 5.4.- Histograma de les mesures reals a partir d'una mostra de dades exhaustiva.

Els paràmetres estadístics més característics es recullen en la taula:

<i>Paràmetres Estadístics</i>	<i>Valors Experimentals</i>
Mitjana	60,30
Error típic	0,99
Mediana	61,00
Moda	53,00
Desviació estàndard	8,38
Variança de la mostra	70,17
Curtosis	-1,05
Coefficient d'asimetria	-0,13
Rang	31,00
Valor mínim	44,00
Valor màxim	75,00

Taula 5.17.- Paràmetres estadístics corresponents a l'anterior histograma.

Ara, la mitjana ha augmentat fins 60'3 dB, xifra aquesta molt més representativa dels alts nivells sonors de Girona. La curtosis, amb un valor de $-1'05$, indica que és una distribució força menys punxeguda que la normal, però el valor del coeficient d'asimetria, gairebé igual a zero, reflexa com les dades es reparteixen quasi equitativament al voltant de la moda. El perfil de normalitat, tot i la millora, no s'ajusta exactament al gràfic de probabilitat normal, perquè tot i que el coeficient d'asimetria és ara proper al zero, la curtosis és més acusada que en els dos casos anteriors, la qual cosa influeix sobre la probabilitat dels valors percentils desviant-los de la diagonal.



Gràfic 5.5.- Corba de probabilitat normal de la mostra.

Cal esmentar el fet que mentre la mitjana dels nivells de soroll és d'uns 60 dB, el nombre de vehicles mitjà és d'uns 75. Aquests valors mitjans, aparentment no es corresponen amb els predits per la fórmula de predicció. Això s'explica perquè en aquesta mostra s'han restringit o exclòs algunes vies perifèriques d'accés amb un volum de trànsit important (l'avinguda de França per exemple).

5.3.3.- Estadística descriptiva de les mesures reals

En aquest apartat s'analitzen els paràmetres estadístics de la mostra normal alhora que s'exposa el seu significat.

La mitjana aritmètica: m

Aquesta variable representa el valor mitjà al voltant del que s'agrupen les dades o observacions i és, sens dubte, la variable principal i vertebradora de qualsevol anàlisi estadístic. La seva expressió matemàtica és:

$$m = \sum_{i=1}^n \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

n representa el nombre total d'observacions i x_i el seu valor. El valor de la mitjana, proper als 60 dB, indica que el nivell de soroll general de la ciutat està només 5 punts per sota els 65 dB, la qual cosa sembla satisfactòria. Cal matisar, però, aquesta afirmació que, tot i ser certa, no discrimina entre les diferents zones de la ciutat. El que succeeix realment és que alguns barris, situats principalment en la perifèria, tenen uns nivells acústics força baixos, inferiors als 55 dB, mentre que en la majoria de carrers de l'àrea central es supera àmpliament la cota dels 65 dB. Tenint en compte que és precisament on s'hi concentra la major part de la població està clar que aquest valor mitjà no és representatiu, en absolut, d'una situació idònia ni desitjable.

L'error típic: S_e

És indicatiu de l'error associat als valors estimats en un anàlisi de regressió i és una mesura de la desviació associada al pronòstic d'una variable. El seu valor és igual a 0'99 i es calcula a

partir de

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n(n-2)} \left[n \sum y^2 - (\sum y)^2 - \frac{[n \sum xy - (\sum x)(\sum y)]^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \right]}$$

x seria la variable original o observació, mentre que la y representa el valor pronosticat a partir d'un anàlisi de regressió. Aquest valor força alt ho és perquè les dades provenen d'una mostra de la població on conseqüentment la variabilitat és menor. En la taula (5.16), corresponent a la base de dades de tot el conjunt de dades pot veure's que a aquest paràmetre estadístic li correspon un valor força menor i igual a 0'15.

Mediana: M_e

Dóna el valor central d'una sèrie ordenada de nombres. Divideix la sèrie estadística ordenada, en dues parts iguals, havent-hi tants valors per sobre com per sota d'ella, situant-se el seu valor entre en els 61 dB. Això significa que exactament la meitat de les observacions estan per sota i l'altra meitat es troben per sobre aquest valor, la qual cosa descriu un ambient urbà força sorollós. Quan el nombre de dades és parell (1962 en aquest treball) la mediana no queda definida i es pren la mitjana dels valors que ocupen el lloc $(n/2)$ i $(n/2)+1$.

Moda: M_0

S'anomena moda al valor (o valors) de la variable al que correspon una major freqüència. Altrament dit, representa el valor del que s'han enregistrat un major nombre d'observacions. En la taula de la mostra (5.17) s'aprecia que aquesta xifra té un valor de 53 dB, molt similar al de la població.

Desigualtat de Pearson

Per distribucions unimodals més freqüents consisteix que la mediana es trobi entre la moda i la mitjana. Empíricament s'ha comprovat que per distribucions moderadament asimètriques es verifica:

$$|m - M_0| \geq 3|m - M_e|$$

les dades corresponents a la població no verifiquen aquesta llei empírica, mentre que les calculades a partir de la mostra normal sí.

$$\text{Població': } |57'97 - 53'60| \geq 3|57'97 - 55'90| \Rightarrow 4'37 < 6'21 \text{ no ho compleix.}$$

$$\text{Mostra: } |60'30 - 53'00| \geq 3|60'30 - 61'00| \Rightarrow 7'13 > 2'61 \text{ efectivament ho verifica.}$$

Variança, s^2

Aquesta variable considera la suma dels quadrats de les desviacions respecte a la mitjana i es defineix com:

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (x_i - m)^2 n_i$$

els valors de la població i la mostra, 43'65 i 70'17 respectivament, no signifiquen massa cosa. Permeten, però, per calcular altres paràmetres que si tenen un significat molt més clar i permeten extrapolar hipòtesis i conclusions sobre les respectives distribucions.

Desviació típica, s

És l'arrel quadrada de la variança i tampoc té un significat massa clar per si mateixa. Només en té si es tracta de distribucions simètriques o moderadament asimètriques on es compleix aproximadament que:

- El 68% de les observacions es troben dins l'interval $[m - s, m + s]$.
- El 95% de les observacions estan entre $[m - 2s, m + 2s]$.
- El 98% de les observacions es troba entre $[m - 3s, m + 3s]$

Així, per la distribució de la mostra, podem afirmar en bona aproximació que el 68% de les observacions es troben en l'interval de mesures comprès entre els 51,92 dB i el 68'68 dB. Realment, a partir de l'observació directe de l'histograma (gràfic 5.4) s'aprecia que el nombre d'observacions comprès entre aquest rang és només d'aproximadament un 60%, doncs cal tenir en compte que aquests percentatges només són aplicables a distribucions similars a la corba normal (simètriques). El valor de la desviació típica es calcula a partir de

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (x_i - m)^2 n_i}$$

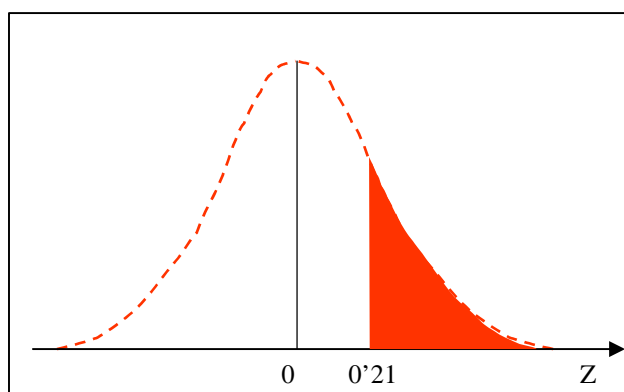
Dividint les respectives desviacions típiques es pot conèixer quantes vegades una distribució és més dispersa que l'altre. El quocient d'aquests valors corresponent a les respectives distribucions, 8'38 i 6'61, proper a la unitat indica que tenen un grau de dispersió molt similar.

Corba normal tipificada

La simetria de l'histograma suggereix la possibilitat de tipificar la variable i estudiar la probabilitat de mesurar un determinat nivell de soroll en aquesta zona. Un valor interessant d'estudiar és, sens dubte, la cota dels 65 dB. Llavors,

$$z = \frac{65 - m}{s} = \frac{65 - 60'3}{8'38} = 0'5608$$

en qualsevol taula de la corba normal tipificada es veu que a aquest valor de z li correspon una probabilitat de 0'21. La corba normal tipificada es caracteritza per tenir la mitjana igual a zero i la desviació típica 1, essent l'àrea sota la corba normal igual a la unitat.



Gràfic 5.6.- Valor de la variable sota la corba normal tipificada.

Llavors, la probabilitat d'observar un valor superior és:

$$0'5 - 0'21 = 0'29 \%$$

Considerant l'asimetria i per les mateixes consideracions exposades en l'apartat anterior aquest resultat és inferior al que s'obté a partir de l'observació directa de l'histograma de la mostra, on gairebé un 40% de les mesures superen la cota dels 65 dB. Tenint en compte que aquesta distribució de dades no és exactament normal, sinó que presenta una certa asimetria envers els valors més alts, aquesta probabilitat pot ser més alta.

Curtosis, g_2

Es defineix com el quocient entre el moment de quart ordre respecte la mitjana i la quarta potència de la desviació estàndard menys tres unitats,

$$g_2 = \frac{m_4}{s^4} - 3 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (x_i - m)^4 n_i}{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (x_i - m)^2 n_i \right)^2} - 3$$

El seu valor és indicatiu del seu grau de punxament respecte la distribució normal, la qual té un moment de quart ordre igual a $3s^4$, i conseqüentment el seu valor de curtosis és igual a zero (leptocúrtica). Pel que fa a la mostra, en la taula (5.17) s'aprecia que un resultat negatiu amb un valor de $-1'05$ indica que es tracta d'una distribució platicúrtica ($(g_2 < 0)$) menys punxeguda que la normal. Observació reforçada pel fet que es tracta d'una distribució bimodal, doncs al voltant dels 56 i els 68 dB aproximadament, apareixen dues modes (figura 5.4)

Coefficient d'asimetria, g_1

Serveix per estudiar la simetria dels valors de la distribució al voltant de la mode, M_0 . En els dos casos que ens ocupen s'aprecia que els valors de la població i la mostra (0'90 i 0'13 respectivament) difereixen força i mentre que el primer és força superior a zero la qual cosa indica que els rangs de classes als que es correspon una major freqüència s'agrupen a l'esquerra

de la mode, el segon valor d'altra banda és proper al zero (*característic d'una distribució simètrica*). Aquest fet es visualitza clarament en els respectius histogrames (gràfics 5.16-17). L'expressió matemàtica emprada en el càlcul d'aquest coeficient és molt similar a l'índex d'asimetria de Fisher, que divideix el moment de tercer ordre entre la tercera potència de la desviació típica, segons

$$g_1 = \frac{m_3}{s^3} \square \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - m}{s} \right)^3$$

Rang, valor mínim i valor màxim

El rang representa l'interval que abasten les variables dependents, en aquest cas les mesures de soroll. Els valors mínims i màxims es corresponen amb els extrems d'aquest interval. Efectivament, pot veure's que

$$\text{Rang de la mostra: } 31'00 = |44'00 - 75'00|$$

$$\text{Rang de la població': } 29,60 = |47,60 - 77,20|$$

Així, segons aquest conjunt de mesures, la via menys sorollosa de la mostra de dades és la que comunica amb les Instal·lacions Esportives (46 dB) al costat del Parc de la Devesa, mentre que en la crta. de Barcelona s'han enregistrat els nivells d'intensitat màxima (74 dB).

5.3.4.- Valoració conjunta dels resultats experimentals i els estimats amb el model

Ara es fa un anàlisi conjunt dels resultats experimentals i els teòrics tant pel que fa a les variable dependent (nivells de soroll) com pel que fa a les variables independents (nombre i tipus de vehicle). S'han emprat tècniques numèriques pròpies de l'anàlisi multivariant, la qual cosa ha permès calcular els coeficients i paràmetres més característics.

Coefficient de correlació generalitzat, r

Aquesta variable es fa servir per estimar el nivell de relació o interdependència entre dos conjunts de dades. Aquí, el seu significat s'aplica a avaluar la relació existent entre les dades enregistrades experimentalment i les estimades mitjançant un model de predicció i és una mesura de la qualitat d'aquest ajust. Aquest ajust tindrà una dependència funcional de la forma:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + e$$

Y és la variable de predicció del model, independent, mentre que les variables x_i són les dependents i ϵ és l'error o desviació associada a cada mesura teòrica respecte el valor experimental. Aquest coeficient de correlació es calcula dividint la variança explicada amb el model de predicció entre la variança total pròpia dels resultats experimentals.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [y_i(\text{teórica}) - m]^2}{\sum_{i=1}^n [y_i(\text{exp.}) - m]^2} = 0'99$$

En aquesta expressió les dades teòriques corresponen a les calculades amb el model, les experimentals són el resultat de les mesures empíriques i la mitjana, μ , ho és d'aquestes dades experimentals. Significa que el 99% de les observacions poden explicar-se amb aquest model *no lineal* i aquest resultat, proper a la unitat, indica l'alt grau d'ajustament de la corba del model de predicció (4.18) respecte a les dades experimentals. Cal remarcar que aquest model s'ha generat a partir d'un coeficient de correcció logarítmic que s'allunya de la linealitat. Sempre és interessant, però, fer un estudi de linealitat i extreure'n conclusions de les relacions entre totes les variables. El coeficient de correlació lineal es defineix com:

$$r^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}} = 0'97$$

Aquest valor de r^2 s'ha calculat amb el full de càlcul i aquesta definició és precisament la funció que utilitzen la majoria de programes informàtics per estimar aquest paràmetre. Aquest valor, també molt alt, suggereix que hi ha una molt bona relació *lineal* entre les variables.

Matriu de correlacions lineals, M_{ij}

Aquesta matriu resumeix les correlacions lineals existents entre tots els parells de variables del model. Els coeficients de la matriu representen el grau d'associació lineal entre dues variables i es determinen segons,

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - m_y)^2}} = \frac{COV(x, y)}{s_x s_y}$$

La matriu resultant és

	<i>Núm. Motos</i>	<i>Núm. Cotxes</i>	<i>Núm. Bus-camió</i>	<i>Total Vehicles</i>	<i>dB(A)</i>
<i>Núm. Motos</i>	1,00				
<i>Núm. Cotxes</i>	0,75	1,00			
<i>Núm. Bus-camió</i>	0,68	0,68	1,00		
<i>Total Vehicles</i>	0,84	0,98	0,73	1,00	
<i>Dades experimentals</i>	0,86	0,92	0,72	0,95	1,00

Taula 5.18.- Matriu de correlacions amb les dades experimentals i el model.

Donada la simetria respecte la diagonal (els valors igual a la unitat representen la perfecta correlació d'una variable amb si mateixa), el full de càlcul només emplena la part inferior de la matriu.. S'observa una forta correlació positiva entre cadascuna de les variables independents i les dades experimentals (fila inferior), i també entre les mateixes variables independents. Aquestes fortes

correlacions lineal positives suggereixen la possibilitat de fer un anàlisi de regressió lineal simple respecte a una única variable alhora que un altre de múltiple respecte a totes les variables independents.

Regressió lineal simple

Aquesta forta interdependència entre les variables, suggereix la possibilitat de reduir el nombre de variables independents a un: el nombre total de vehicles, per exemple, i la variable dependent seran les dades experimentals. L'equació de la fórmula de predicció seria ara de la forma:

$$Y_R = I_0 + I_1 X_N \text{ amb } I_0 = 51,96 \text{ i } I_1 = 0,12$$

En aquest cas, per tractar-se d'una regressió lineal, el coeficient de correlació general, ρ , i el lineal, r^2 , coincideixen essent ambdós iguals a 0'90.

Regressió lineal múltiple: valoració global dels anàlisis

Amb aquesta mètode es pretén trobar una relació multilinear entre la variable dependent, Y_R (valor experimental) i les variables independents, X_i (nombre de motos, cotxes i camions), segons una equació del tipus:

$$Y_R = b_0 + b_1 X_{N_M} + b_2 X_{N_{LL}} + b_3 X_{N_P}$$

en la que els valors d'aquests coeficients són:

	<i>Coefficients</i>
Intercepció: b_0	51,70
Núm. Motos: b_1	0,21
Núm. Cotxes: b_2	0,09
Núm. Bus-camió: b_3	0,14

Taula 5.19.- Coeficients, b_i , de la funció de regressió multilinear.

S'obté així un bon model de predicció on el coeficient de correlació general, ρ , té un valor de 0'92, mentre que el valor corresponent al de correlació lineal és també de 0'92. Si es tracta de regressions lineals (múltiples o simples) el coeficient de correlació generalitzat i el lineal coincideixen doncs les dues expressions matemàtiques són, de fet, la mateixa.

Valoració conjunta del model de predicció i els anàlisis de regressió

Tots aquests coeficients són representatius del percentatge de mesures experimentals explicades amb els respectius models. Mentre que amb el coeficient general, r , s'expressa el percentatge de relació no lineal entre les variables, el coeficient de correlació lineal, r^2 , és proporcional al nombre de dades relacionades linealment. Les equacions dels tres models de predicció de soroll estudiats són:

$$S(\text{Model}) = 10 \text{Log} \left[10^{\frac{L_{V_{LL}}(N_{V_{LL}})}{10}} + 10^{\frac{L_M(N_M)}{10}} + 10^{\frac{L_{V_P}(N_{V_P})}{10}} \right] + C_0 \cdot C_{V_{LL}}^{N_{V_{LL}}} \cdot C_M^{N_M} \cdot C_{V_P}^{N_{V_P}} \quad (\text{dB})$$

$$S(\text{Regressió multilíneal}) = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 X_{N_M} + \mathbf{b}_2 X_{N_{V_{LL}}} + \mathbf{b}_3 X_{N_P}$$

$$S(\text{Regressió lineal}) = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_1 X_N$$

En la taula (5.20) es recullen els respectius coeficients de correlació general i lineal entre els valors obtinguts a partir d'aquestes expressions i el banc de dades experimentals.

MODELS DE PREDICCIÓ	Coefficient de correlació general (r)	Coefficient de correlació lineal (r ²)
S(model de predicció)	0'99	0'97
S(regressió multilíneal)	0'92	0'92
S(regressió lineal)	0'90	0'90

Taula 5.20.- Coeficients de correlació corresponents als diferents models de predicció.

s'observa que el model de predicció de soroll té els coeficients de correlació general i lineal més alts. Això és degut a que el factor de correcció logarítmic s'ajusta, en bona aproximació, a la curvatura de les dades experimentals (veure el gràfic 4.8), malgrat que gairebé el 1% de la variació total queda inexplicada. Aquest fet pot ser degut a fluctuacions aleatòries o a una variable addicional i desconeguda que no s'ha considerat en el model.

La regressió multilíneal és un hiperpla en l'espai dels tipus de vehicles, X_i ($i= 1,2,3$) lineal en cadascuna de les variables independents. És precisament aquesta linealitat la que no permet un bon ajust de la corba de regressió, malgrat que no deixa de ser un model de predicció força bo.

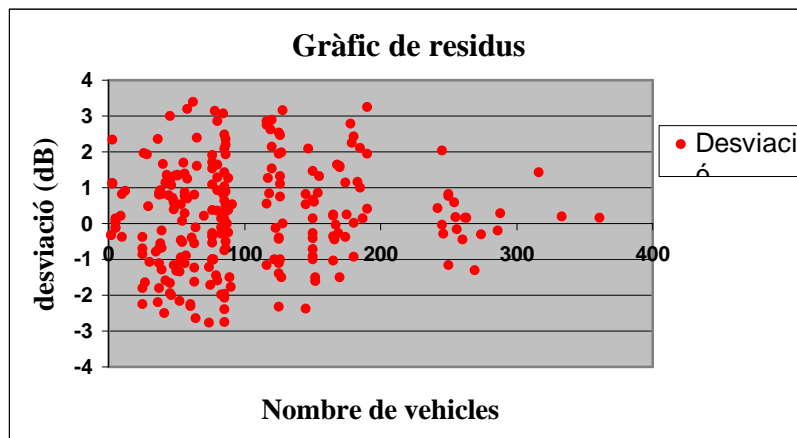
Finalment, la regressió lineal és la que presenta els coeficients de correlació més baixos, doncs, tal com s'observa en la matriu de correlacions lineals (taula 5.18), la relació lineal entre les variables independents, tot i ser elevada, no és perfecte. Així, quan es redueix el model a una única variable s'està perdent capacitat de predicció.

Gràfic de residus

La fiabilitat del model de predicció (4.18) desenvolupat per l'autor també pot apreciar-se en el gràfic de la pàgina següent on es representen els residus, o diferència entre els valors reals (experimentals) i els estimats amb el model de predicció (teòric), en funció del nombre total de vehicles. Hi ha molts autors que anomenen error al terme corresponent al residu que es defineix com:

$$\hat{y}_{\text{Residus}} = \hat{y}_{\text{Experimental}} - \hat{y}_{\text{Teoric}}$$

A partir d'aquest terme pot apreciar-se la fiabilitat de qualsevol model. Pot fer-se representant el residu, o desviació respecte el valor experimental, en funció de la variable independent, el nombre total de vehicles en aquest cas.

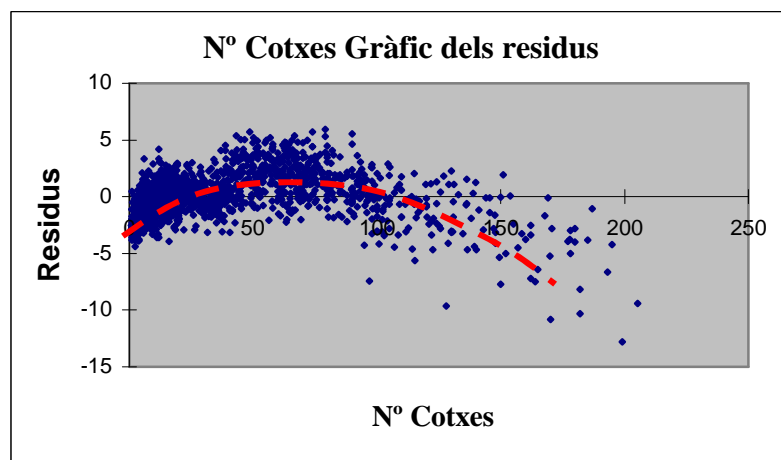


Gràfic 5.7.- Valors dels residus a partir d'una mostra aleatòria de 241 punt.

En aquest gràfic s'aprecia que les diferències rarament superen els 3 dB. S'ha escollit una mostra de 241 mesures d'una forma totalment aleatòria per apreciar millor aquest fet, doncs si es representen els 1962 punts total resulta un núvol de punts massa dens.

Residus i linealitat

El residu es defineix com la diferència entre el valor real i el calculat amb la fórmula de predicció. Els gràfics de residus, respecte a cadascuna de les variables independents, permeten estudiar l'incompliment dels supòsits subjacents en aquest tipus d'anàlisi: la linealitat del model i la variança constant de l'error. A continuació està representada la gràfica corresponent al nombre de cotxes. Les corbes dels residus corresponents a les altres dues variables independents es recullen en l'apèndix R.



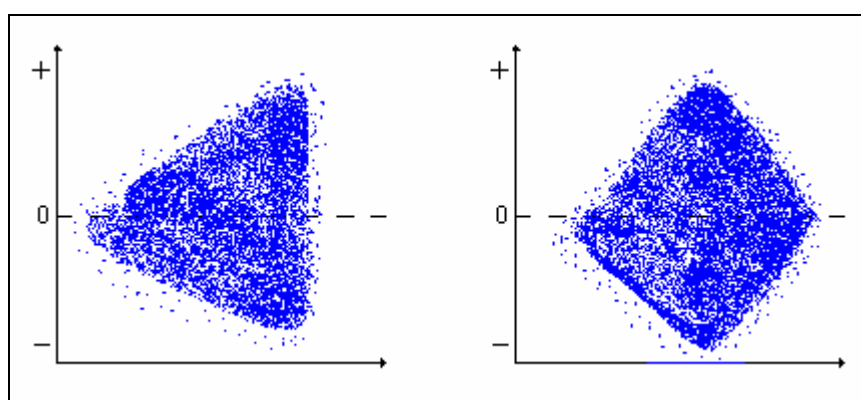
Gràfic 5.8.- Residus de la variable "Núm. de cotxes" respecte a ella mateixa.

La línia vermella amb traç intermitent és representativa de la curvatura del conjunt de punts. Qualsevol model amb una tendència curvilíneal dels residus és indicatiu d'una relació no lineal. En els tres gràfics de residus s'aprecia una lleugera curvatura en la dispersió dels punts, la qual cosa indica que la relació lineal no és la millor opció per descriure aquestes dades, cosa que

corroborar el fet que el coeficient de correlació general del model de predicció (*estimat a partir d'un factor de correcció logarítmic*) és superior als corresponents a les regressions multilineals i lineals.

Anàlisi d' heterocedasticitat

La presència de variàncies desiguals o **heterocedasticitat** és precisament una de les hipòtesis que s'incompleix més habitualment. Un mètode per detectar aquest tipus de problemes consisteix en representar el gràfic de cada variable independent contra els valors predits amb el model, tot i que també pot veure's a partir dels gràfics de residus de l'anterior apartat. La situació ideal es dona quan totes aquestes gràfiques presenten una estructura completament aleatòria en el núvol de punts. A continuació s'il·lustren dos gràfics de residus típics on es detecta la presència d' heterocedasticitat.



Gràfic 5.9.- Gràfics de residus representatius de la presència d' heterocedasticitat.

Pot apreciar-se que la forma del gràfic de residus d'aquest anàlisi (5.7 de la pàgina anterior) difereix força de les gràfiques (5.9) la qual cosa indica que la variable dependent verifica, en bona aproximació, que té uns nivells similars de variància en els rangs de les variables independents. Aquest fet, imprescindible per garantir la bonança del model, es coneix amb el nom d'homocedasticitat i significa que la variància de la variable independent no es concentra en un interval determinat, la qual cosa és un supòsit implícit en aquest tipus d'anàlisi.

Prova F

Dóna la probabilitat que les variàncies de dos grups de dades no presentin diferències significatives. Serveix per comparar els marges dels resultats a partir de dos conjunts de dades. En aquest cas s'ha aplicat aquest anàlisi als dos conjunts de valors que són objecte d'estudi d'aquest anàlisi: els valors experimentals i els teòrics calculats a partir del model de predicció.

En aquest tipus de proves cal introduir l'anomenat nivell de confiança (comunament es defineix com *alfa*). Cal que aquest valor estigui comprès en el rang 0-1. El nivell *alfa* és un nivell relacionat amb la probabilitat que existeixi un error de tipus I (rebutjar una hipòtesis certa). En la taula (5.21) es recullen les variables i dades més rellevants, que a partir d'aquest nivell de confiança són representatius de la igualtat de les variàncies entre grups de dades diferents.

Prova F per variàncies de dues mostres		
	<i>dB(A)</i>	<i>Resultat model</i>
<i>Mitja</i>	57,9890979	58,0816357
<i>Variància</i>	43,9967506	43,2807418
<i>Observacions</i>	1962	1962
<i>Graus de llibertat</i>	1961	1961
<i>F</i>	1,01654336	
<i>P(F<=f) una cua</i>	0,35820867	
<i>Valor crític per F (una cua)</i>	1,07713638	

Taula 5.21 Dades estadístiques relatives a la prova F.

Aquest anàlisi es fonamenta en prendre una decisió prenent com a base un nivell de confiança ($\alpha=0'05$ en aquest cas). Això significa que s'accepta el supòsit que les variàncies són iguals o similars dins el rang determinat pel nivell de confiança si es verifica en una cua:

- El valor crític de F (1,07713638) és major que el valor de l'estadístic F (1'01654336).
- La probabilitat (0'35820867) és major que el nivell de confiança exigida (0'05).

Veient que es verifiquen les dues condicions exigides, pot afirmar-se que les variàncies corresponents als dos conjunts de dades són força similars, la qual cosa reafirma la bonança del model i ratifica la presència d'homocedasticitat.

Prova xi-quadrat, c

S'utilitza fonamentalment per determinar si els resultats esperats d'un model de predicció s'ajusten a les dades experimentals. L'anàlisi s'ha fet sobre 1962 mesures reals o graus de llibertat, dels que s'han descartat prèviament unes cinquanta dades que no s'ajustaven a les ja esmentades condicions experimentals. Aquesta prova, a partir d'una estadística *xi-quadrat*, suma les diferències entre les freqüències dels valors actuals, A_{ij} , i els esperats, E_{ij} , segons,

$$c^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(A_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} = 1$$

que el resultat d'aquest test sigui igual a la unitat (*valor màxim*) significa que la capacitat de predicció d'aquest model és molt bona. Cal destacar, però, que donat la natura aleatòria i el caràcter impredecible dels fenòmens acústics aquest model no té, en absolut, una fiabilitat del 100%, tot i que si es compleixen les condicions en que s'han fet les mesures, sense la presència d'altres focus de soroll externs, els resultats que s'obtenen amb aquest model s'ajusten amb força exactitud als valors enregistrats experimentalment amb el sonòmetre.

5.4.- VALORACIÓ GLOBAL DE L'IMPACTE ACÚSTIC

Actualment, en alguns punts de Girona que es troben en les immediacions del viaducte del ferrocarril i d'una via principal amb un elevat flux de vehicles, es poden generar puntualment nivells acústics força elevats quan passa un ferrocarril durant la franja horària diürna. Aquest seria el cas, per exemple, de la zona que es troba prop l'encreuament del C. Sta. Eugènia i el pont del viaducte, entre la Travessera carril i el C. Bernat Tomàs Mieres.

Així, per exemple, situats sobre el nivell del terra a una distància de 8 m del viaducte que es troba a una alçada d'aproximadament 6'5 m correspon un angle d'elevació respecte l'horitzontal de

$$\cos^{-1}\left(\frac{6'5}{8}\right) = 35'6^{\circ}$$

ara, aplicant la fórmula (3.3) que descriu el soroll provocat pels trens més sorollosos resulta que en aquest punt s'enregistraria un nivell sonor amb una intensitat de

$$F_{so}(r, q) = 88'286 - 0'286 \cdot (8m) - 0'114 \cdot (35'6^{\circ}) = 82 \text{ dB}$$

D'altra banda pel C. Sta. Eugènia una de les vies més transitades, i conseqüentment sorolloses de Girona, s'han arribat a comptabilitzar durant una mesura de 10 minuts 160 vehicles (11% motocicletes, 88% vehicles lleugers i 1% vehicles pesats). Amb aquestes xifres i aplicant l'expressió (4.19) resulta que aquest flux de trànsit provoca un nivell equivalent de

$$S_{so} = 10 \text{Log} \left[10^{\frac{L_{LL}(141)}{10}} + 10^{\frac{L_M(17)}{10}} + 10^{\frac{L_P(2)}{10}} \right] + C_0 \cdot C_{LL}^{141} \cdot C_M^{17} \cdot C_P^2 = 70 \text{ dB}$$

els nivells de soroll generats pels diferents tipus de vehicles, L_i , i les constants C_i es determinen d'acord amb la metodologia descrita en l'apartat (4.2.1). En aquesta àrea coexisteixen dos focus de soroll principals: el ferrocarril i el trànsit viari. El nivell sonor global que generen pot calcular-se a partir de la fórmula de composició de nivells i és igual a

$$S_{TOTAL} = 10 \text{Log} \left[10^{\frac{82}{10}} + 10^{\frac{70}{10}} \right] = 82'2 \text{ dB}$$

s'observa que no hi ha una diferència significativa entre el valor corresponent al soroll que generen únicament els trens i aquest nivell total, doncs només s'aprecia una diferència de 0'2 dB. Aquesta diferència mínima és deguda al caràcter logarítmic d'aquesta fórmula. Pot concloure's que durant els 10 s que dura aproximadament el pas del tren per un punt donat genera un nivell de soroll superior al del trànsit rodat. convertint-se en la principal font de soroll i, conseqüentment, de molèstia.

VI CONCLUSIONS

Dels resultats obtinguts en base a les diferents observacions i anàlisis fets en la ciutat de Girona es desprèn que es tracta d'una ciutat de grandària mitjana, el nucli central de la qual està afectat per nivells de soroll massa elevats, provocats fonamentalment per un únic factor: el trànsit viari. Tot i que en la perifèria de la ciutat hi ha zones amb una baixa densitat de població on

sovint s'enregistren valors acústics que es poden catalogar sota l'epígraf d'admissible, hi ha una extensa àrea interior, que ocupa una superfície de 6'29 Km² on en quasi el 40% d'aquest territori, i al llarg de la franja diürna, es superen els 65 dB recomanats per la OMS. Hi ha vies principals, la crta. De Barcelona per exemple, que travessen la ciutat amb un flux de vehicles gairebé uniforme i continu, que genera uns nivells equivalents superiors als 70 dB i ,malauradament, no és un cas aïllat ni excepcional, degut a la massiva afluència de trànsit que diàriament circula per la ciutat. A partir de les xifres relatives al nombre i tipus de vehicles recollides durant el treball de camp, s'estima que en un dia circulen per la ciutat un volum de vehicles no inferior a les 20.000 unitats.

La presència del viaducte , per on passa el ferrocarril, contribueix a empitjorar aquesta situació en els punts situats en les immediacions de la via, ja que els efectes combinats de les pertorbacions acústiques provocades pel tren i el trànsit viari poden generar uns nivells superiors als 82 dB en les zones que es troben, simultàniament, a menys de 8 m de distància ambdues vies de comunicació. Així la realitat acústica de Girona pot concretar-se en aquests dos punts:

- 1.- L'elevada densitat de trànsit genera uns nivells sonors massa alts que afecten una àrea força extensa.
- 2.- El pas del ferrocarril pel viaducte , combinat amb l'efecte del trànsit viari, provoca nivells de soroll puntuals intolerablement elevats (en les vies principals sovint superen els 70 dB).

Davant d'aquesta situació gens favorable, no hi ha una solució fàcil que, amb un cost raonable, pugui resoldre el problema. En aquest treball de tesis, però, s'han desenvolupat mètodes que poden contribuir a millorar aquest estat de coses. Val a dir que en zones menys densament poblades resultarien, sens dubte, molt més efectius. Aquestes propostes són bàsicament:

- En les zones perifèriques, on encara hi ha terreny sense edificar o pavimentar, es proposa la construcció de vies alternatives amb la finalitat de descongestionar-ne d'altres per on transita un excessiu nombre de vehicles. Amb la finalitat d'optimitzar els resultats, la planificació i el disseny d'aquestes noves rutes s'ha fet integrant mètodes pròpies de la programació lineal i la teoria de grafs i xarxes.

- Per reduir la densitat de vehicles, i conseqüentment el soroll, en les zones interiors es suggereix prohibir la circulació dels vehicles en una gran àrea de la ciutat. S'ha plantejat aquesta proposta radical i fins i tot agosarada, en front l'alternativa consten en restringir l'accés a zones més reduïdes (casc antic, plaça Catalunya ...), perquè s'ha estimat que donada la particular configuració urbanística de Girona, el tancament de certes àrees interiors provocaria un excessiu increment del flux de vehicles en les vies principals, les quals ja estan actualment força atapeïdes. A més de la construcció d'aquestes zones d'aparcament, i davant el gran nombre de persones que arriben diàriament a la ciutat, s'hauria de millorar i augmentar el nombre de vehicles de la xarxa de transport públic que comuniquen la ciutat amb la perifèria. Així mateix es podria estudiar la viabilitat de noves línies de ferrocarril.
- Soterrar el viaducte del ferrocarril amb la construcció d'un túnel planteja seriosos problemes tècnics. A més, cal tenir en consideració els elevats nivells de soroll que es generen en les boques de la cavitat. L'altra alternativa que es presenta, col·locar apantallaments acústics, tot i ser força efectiva, suposaria un cost monetari considerable. La viabilitat del túnel, però, està subjecte als dictàmens de l'estudi geològic (densitat del subsòl, capes freàtiques...) i, sobretot, en tenir cura que els extrems de la cavitat es situïn en punts aïllats de la perifèria, lluny de les àrees habitades.

Les dades estadístiques corroboren una realitat que hom pot constatar a partir de l'experiència quotidiana tot passejant pel carrer, i sense emprar aparells de mesura: Girona és una ciutat de grandària mitjana massa sorollosa. Les propostes que es plantegen resoldrien el problema si es desenvolupessin en la seva totalitat, tot i que malauradament es tracta de tasques costoses i difícils. No obstant solucions parcials, o menys ambicioses, que es poden derivar d'aquests estudis sí són factibles i, de ben segur, que contribuirien a millorar el "confort acústic" de Girona.

Apèndixs

Apèndix A

Nivells acústics recomanats en diferents habitatges i dependències.

TIPUS D'EDIFICI	LOCAL	NIVELL L_{EQ} MÀXIM D'INMISIÓ RECOMANAT EN DB	
		PEL DIA (8-22 H)	PER LA NIT (22-8 H)
Residencial privat	Sales	45	40
	Dormitoris	40	30
	Serveis	50	-
	Zones comuns	50	-
Residencial públic	Dependències	45	30
	Dormitoris	40	-
	Serveis	50	-
	Zones comuns	50	-
Administratiu/ oficines	Despatxos	40	-
	Oficines	45	-
	Zones comuns	50	-
Sanitari	Habitacions	45	-
	Dormitoris	30	25
	Zones comuns	50	-
Facultats de medicina	Aules	40	-
	Sales de lectura	35	-
	Zones comuns	50	-

(El símbol (-) , durant la nit, significa que els nivells recomanats són mínims)

Apèndix B

Coeficients d'absorció per diferents materials i freqüències.

MATERIALS ABSORBENTS	128	256	512	1024	2048	4096
Suru						
Tipus Corkoustic de 25 mm sobre paret	0'04	0'09	0'39	0'76	0'46	0'55
Tipus Corkoustic amb 2'5 cm de cambra d'aire	0'14	0'25	0'61	0'43	0'52	0'54
Tipus Absorphon de 13 mm amb cambra d'aire	0'15	0'45	0'55	0'35	0'30	0'25
Suru aglomerat de 25 mm amb cambra d'aire ..	0'14	0'25	0'40	0'25	0'34	0'21
Pintures						
Faserit	0'05	0'04	0'07	0'10	0'12	0'18
Fibres minerals						
Fibra de vidre sobre paret de 30 mm	0'32	0'46	0'66	0'70	0'69	0'68
Fibra de vidre sobre paret de 40 mm	0'35	0'51	0'70	0'82	0'83	0'79
Fibra de vidre sobre paret de 50 mm	0'38	0'63	0'78	0'87	0'83	0'77
Fibra de vidre sobre paret de 100 mm	0'75	0'95	0'96	0'90	0'83	0'74
Llana de roca de 25 mm	0'26	0'45	0'61	0'72	0'75	–
Fibra de vidre afieltrada de 50 mm	0'41	0'60	0'99	0'99	0'84	0'81
Filtre de llana de roca de 25 mm sobre paret	0'12	0'45	0'85	0'87	0'90	0'83
Filtre de llana de roca de 25 mm amb cambra ..	0'52	0'70	0'82	0'72	0'78	–
Llosetes acústiques						
Plaques fisurades minerals Perfocoustic	0'41	0'50	0'65	0'79	0'77	0'65
Plaques mineralitzades Viroterm	0'09	0'24	0'94	0'29	0'55	–
Plaques fibro-cimentades Durisol	0'12	0'30	0'60	0'54	0'55	0'60
Plaques d'aglomerat mineral Permacoustic	0'56	0'64	0'77	0'92	0'99	0'89
Escumes sintètiques						
Llàmina d'Espandex de 15 mm amb cambra	0'51	0'63	0'60	0'42	0'40	0'90
Capa d'Isoschaum sobre paret de 30 mm	0'12	0'35	0'62	0'78	0'85	0'76
Capa d'Isoschaum sobre paret de 40 mm	0'17	0'52	0'80	0'88	0'92	0'83
Capa d'Isoschaum sobre paret de 50 mm	0'22	0'66	0'86	0'55	0'95	0'92
Teixits						
Teixit de cotó de 330 g/m sobre paret	0'03	0'04	0'11	0'17	0'24	0'35
Teixit de cotó de 420 g/m sobre paret	0'05	0'07	0'13	0'22	0'32	0'36
Teixit de cotó de 475 g/m sobre paret	0'07	0'31	0'49	0'81	0'66	0'54
Fieltre de 55 mm de gruix	0'13	0'41	0'56	0'69	0'65	0'49
Públic i cadires						
Músic amb instrument	0'40	0'85	1'15	1'40	1'20	1'20
Persona adulta	0'23	0'33	0'39	0'42	0'47	0'47
Públic mixt	0'30	0'32	0'37	0'44	0'36	0'36
Butaca de fusta	0'01	0'02	0'02	0'04	0'04	0'04
Butaca de plàstic	0'20	0'20	0'25	0'30	0'30	0'30

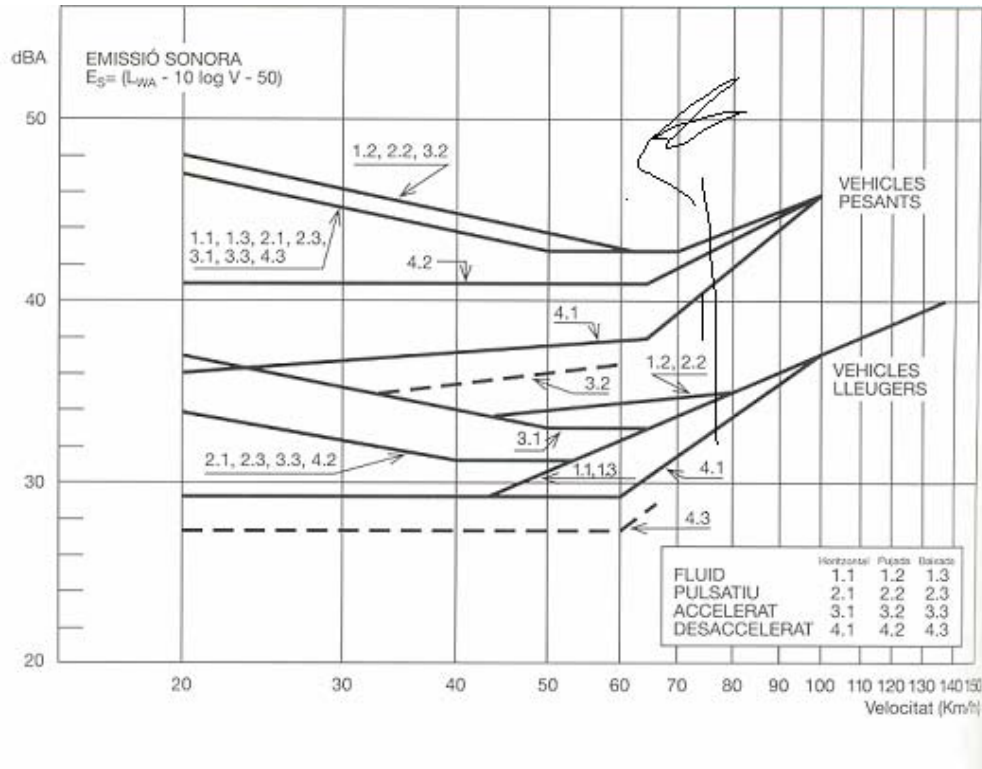
Apèndix C

Taula on es recullen els coeficients d'absorció de materials emprats en el condicionament de qualsevol local.

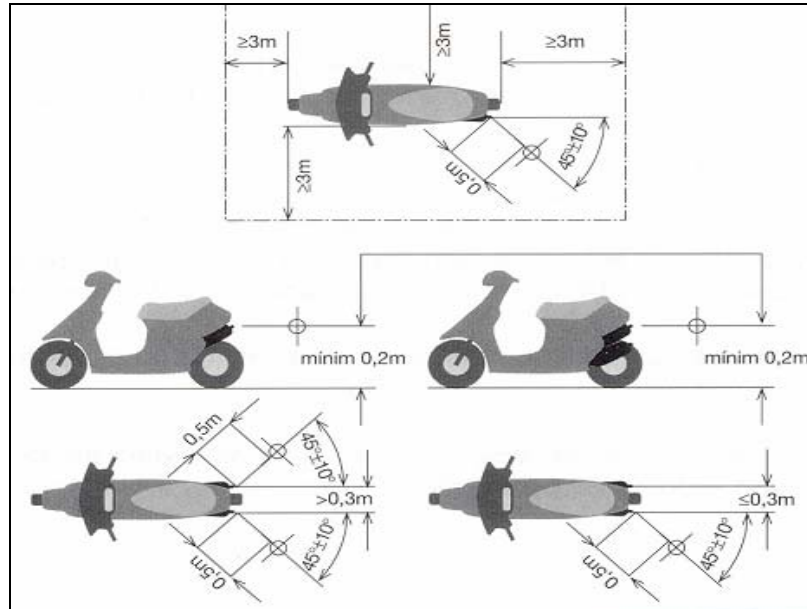
MATERIALS ABSORBENTS	128	256	512	1024	2048	4096
Blocs de formigó	0'3	0'45	0'3	0'25	0'4	0'25
Formigó normal	0'01	0'12	0'02	0'02	0'023	0'035
Formigó pintat	0'01	0'01	0'01	0'02	0'02	0'02
Mur amb rajoles	0'013	0'015	0'020	0'028	0'04	0'05
Mur pintat	0'012	0'014	0'017	0'020	0'023	0'025
Catifa de goma	0'04	0'04	0'08	0'12	0'03	0'10
Moqueta	0'12	0'10	0'18	0'20	0'46	0'72
Aigua	0'01	0'01	0'01	0'01	0'02	0'02
Aire 50% humitat relativa	0'00	0'00	0'00	0'00	0'0012	0'008
Arena seca	0'15	0'35	0'40	0'50	0'55	0'80
Suro	0'12	0'27	0'72	0'79	0'76	0'77
Fusta	0'09	0'09	0'08	0'09	0'10	0'07
Fibra de vidre	0'75	0'96	0'96	0'90	0'84	0'74
Parquet	0'04	0'04	0'07	0'06	0'06	0'07

Apèndix D

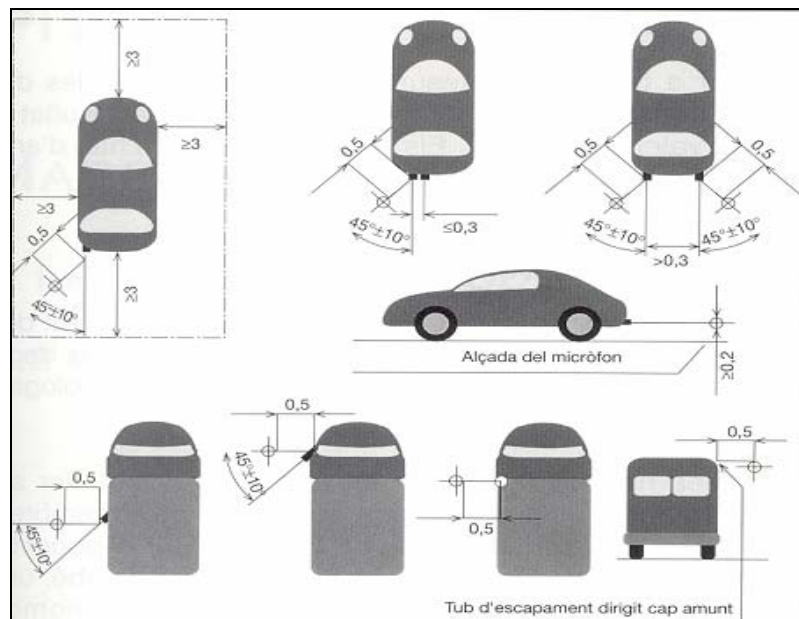
Àbac que permet calcular els nivells d'emissió sonora.



Apèndix E



- Emplaçament del micròfon respecte dels tubs d'escapament per motocicletes.



- Emplaçament del micròfon respecte dels tubs d'escapament per vehicles de quatre rodes.

Apèndix F

Ferrocarrils: freqüència de pas

Tipus de tren	Freqüència de pas (1 dia)	Nivell de soroll
REGIONAL	2	Baix
CATALUNYA EXPRES	26	Alt
DELTA	18	Baix
ARCO	2	Baix
TALGO	4	Baix
COSTA BRAVA	2	Alt
MERCADERIES	4	Alt

Aquestes dades, que s'han extret de les pàgines *web* de RENFE on es recullen els horaris dels trens els mateixos dies que s'han pres les mesures. Aquestes xifres corresponen als ferrocarrils que passen per Girona i que provenen de Portbou o Barcelona. Hi ha una freqüència de 54 trens de passatgers per dia fixa, a la qual cal afegir-hi un nombre de trens variable de mercaderies: 4 aproximadament.

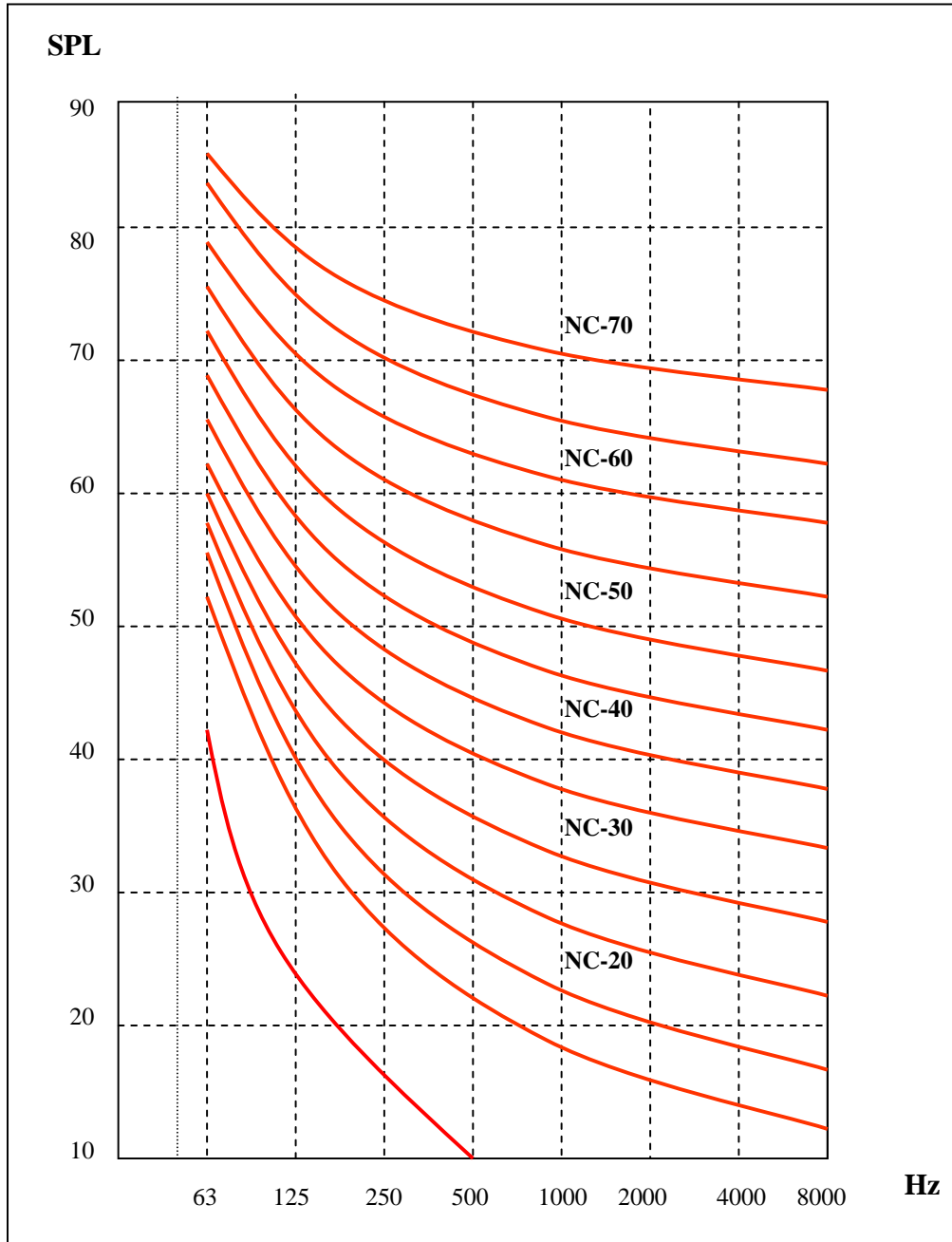
Apèndix G

Bandes d'octava i terç d'octava.

Octaves			terç d'octava		
Freqüència inferior	Freqüència central	Freqüència superior	Freqüència inferior	Freqüència central	Freqüència superior
11	16	22	14'1	16	17'8
			17'8	20	22'4
			22'4	25	28'2
22	31'5	44	28'2	31'5	33'5
			35'5	40	47'7
			44'7	50	56'2
44	63	88	56'2	63	70'8
			70'8	80	89'1
			89'1	100	112
88	125	177	112	125	141
			141	160	178
			178	200	224
177	250	355	224	250	282
			282	315	355
			355	400	447
355	500	740	447	500	562
			562	630	708
			708	800	891
700	1.000	1.420	891	1.000	1.122
			1.122	1.250	1.413
			1.413	1.600	1.773
1.420	2.000	2.840	1.773	2.000	2.239
			2.239	2.500	2.818
			2.818	3.150	3.548
2.840	4.000	5.680	3.548	4.000	4.467
			4.467	5.000	5.623
			5.623	6.300	7.079
5.680	8.000	11.300	7.079	8.000	8.913
			8.913	10.000	11.220
			11.220	12.500	14.180
11.360	16.000	22.720	17.780	20.000	22.890

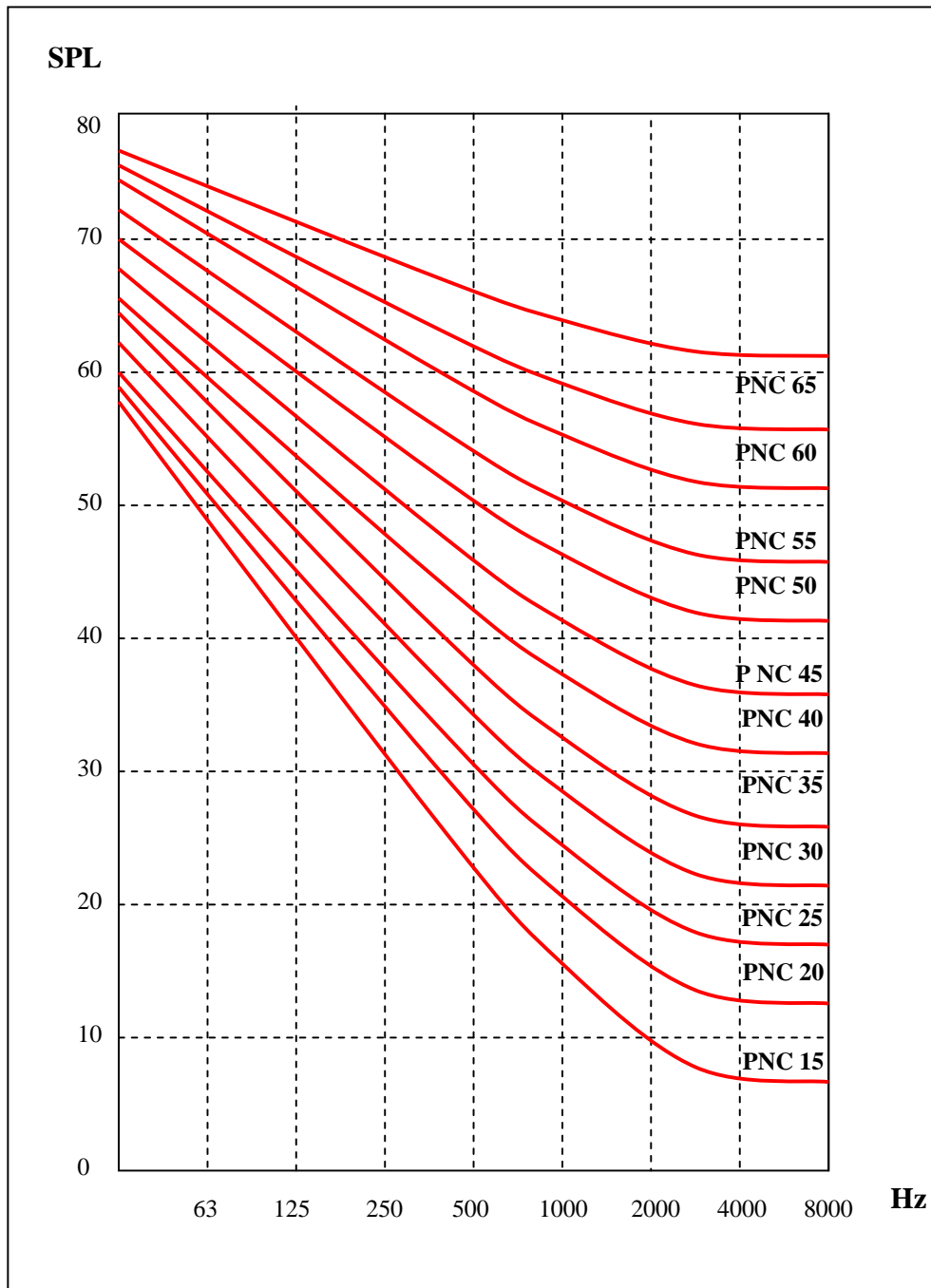
Apèndix H

Corbes NC



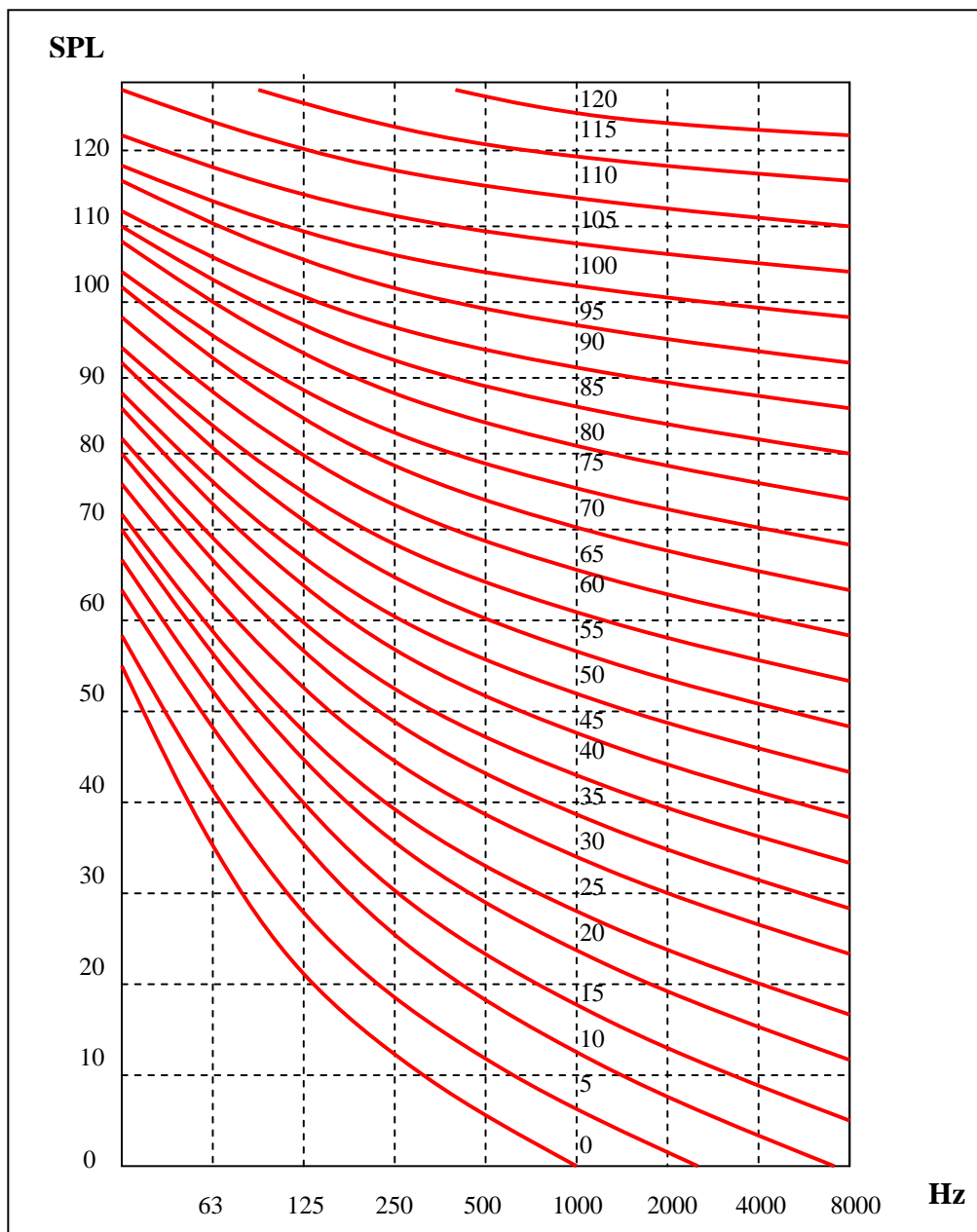
Nivells de pressió sonora de les corbes NC i valors de les freqüències centrals de les bandes d'octava referida a 0'0002 microbar.

Corbes PNC



Nivells de pressió sonora per les corbes PNC i valors de les freqüències centrals de les bandes d'octava

Corbes ISO



Nivells de pressió sonora per les corbes PNC i valors de les freqüències centrals de les bandes d'octava.

A continuació es mostren les taules amb els valors en decibels corresponents a les freqüències centrals de les bandes:

Corbes NC	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NC - 70	83	79	75	72	71	70	69	68
NC - 65	80	75	71	68	66	64	63	62
NC - 60	77	71	67	63	61	59	58	57
NC - 55	74	67	62	58	56	54	53	52
NC - 50	71	64	58	54	51	49	48	47
NC - 45	67	60	54	49	46	44	43	42
NC - 40	64	57	50	45	41	39	38	37
NC - 35	60	52	45	40	36	34	33	32
NC - 30	57	48	41	35	31	29	28	27
NC - 25	54	44	37	31	27	24	22	21
NC - 20	51	40	33	26	22	19	17	16
NC - 15	47	36	29	22	17	14	12	11

Valors de l'anàlisi en banda d'octava per les freqüències centrals (NC).

Corbes PNC	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
PNC - 15	43	35	28	21	15	10	8	8
PNC - 20	46	39	32	36	20	15	13	13
PNC - 25	49	43	37	31	25	20	18	18
PNC - 30	52	46	41	35	30	25	23	23
PNC - 35	55	50	45	40	35	30	28	28
PNC - 40	59	54	50	45	40	35	33	33
PNC - 45	63	58	54	50	45	41	38	38
PNC - 50	66	62	58	54	50	46	43	43
PNC - 55	70	66	62	59	55	51	48	48
PNC - 60	73	69	66	63	59	56	53	53
PNC - 65	76	73	70	67	64	61	58	58

Nivells SPL de les freqüències centrals de les bandes d'octava (PNC).

Corbes ISO	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ISO - 20	51	39	31	24	20	17	14	13
ISO - 25	55	44	35	29	25	22	19	18
ISO - 30	59	48	40	34	30	27	25	23
ISO - 35	63	52	44	38	35	32	30	28
ISO - 40	67	57	49	44	40	37	35	33
ISO - 45	71	61	54	49	45	42	40	38
ISO - 50	75	65	58	53	50	47	45	43

Espectres de les corbes ISO i nivells màxims admissibles per la banda d'octava.

Apèndix I

Els valors dels enregistraments corresponents a les 10 mesures dels nivells equivalents de 10 s de durada, $L_{Aeq, 10 s}$, són:

Tipus de vehicles	$L_{Aeq, 10 s}$ (dB)										Valors mitjans
Lleugers (LL)	63'2	64'3	70'5	67'2	59'9	66'7	68'7	65'4	68'3	60'1	65'4
Motocicletes (M)	70'4	73'6	75'7	68'6	73'9	72'0	69'1	76'7	71'4	72'2	72'3
Pesats (P)	83'2	75'9	83'5	76'0	81'3	79'6	84'3	79'2	78'0	79'6	80'0

Nota: Malgrat que la precisió del sonòmetre és de l'ordre decimal, en els treballs d'acústica urbanística s'acostuma a precisar fins l'ordre enter únicament.

Els valors del L_{AE} i el $L_{Aeq, 0'1 s}$, s'han calculat a partir de:

$$L_{AE} = \langle L_{Aeq, 10 s} \rangle + 10 \log T - 10 \log N = \langle L_{Aeq, 10 s} \rangle + 10 \log(10) - 10 \log(1)$$

i

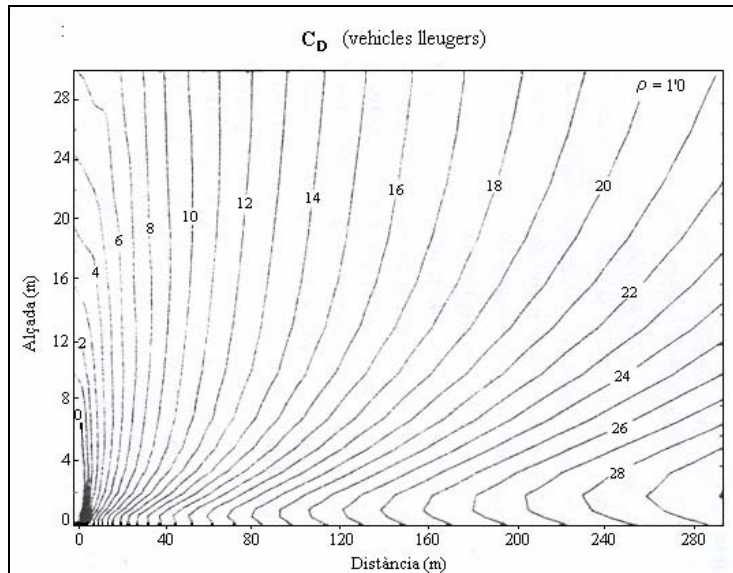
$$L_{Aeq, 0'1 s} = L_{AE} - 10 \log T + 10 \log N = L_{AE} - 10 \log(0'1) + 10 \log(1)$$

i les dades que s'obtenen a partir dels valors mitjans dels nivells equivalents referits a 10 s són:

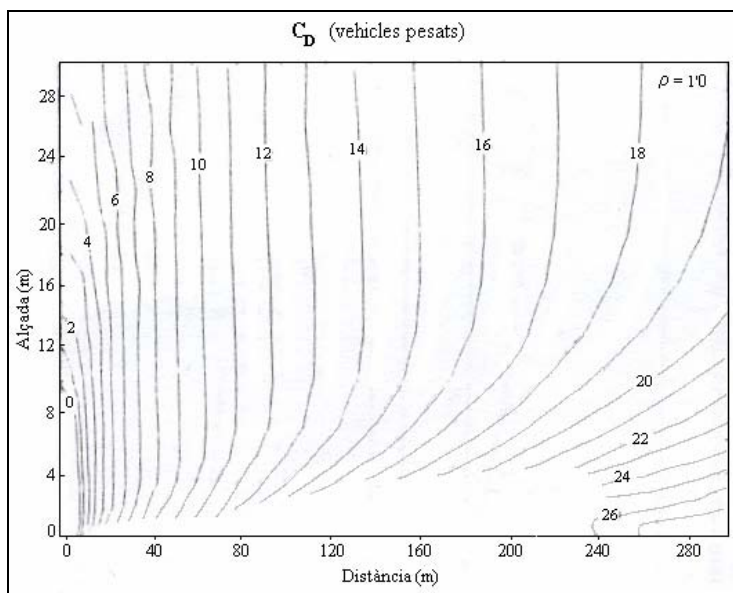
Tipus de vehicles	Valors mitjans $L_{Aeq, 10 s}$ (dB)	$L_{AE} = L_{Aeq, 1 s}$ (dB)	$L_{Aeq, 0'1 s}$ (dB)
Lleugers (LL)	65	75	85
Motocicletes (M)	72	82	92
Pesats (P)	80	90	100

Les dades de la darrera columna coincideixen, gairebé exactament, amb els valors de "peak" (pic) enregistrats amb el sonòmetre durant la mesura

Apèndix J



Gràfic 4.3.- Corbes de nivell relatives al coeficient C_D per a vehicles lleugers.



Gràfic 4.4.- Corbes de nivell relatives al coeficient C_D per a vehicles pesats.

Apèndix K

Valors dels coeficients C_i en funció del nombre de vehicles N , corresponents a cada interval.

Nombre de vehicles: N	C_P	C_{LL}	C_M	C_0
2-5	1	1,055115222	1,351346962	3,811405792
6-10	1	0,998019482	1,14292339	5,907639638
11-15	1	1,009860614	1,094233642	5,762039933
16-20	1	0,98847299	1,029595782	9,099202379
21-25	1	0,997041321	1,024557742	8,22556651
26-40	1	1,003053454	1,020607618	7,140344721
41-55	1	0,998083382	1,007976429	9,402296767
56-60	1	0,971679347	0,974334602	46,93018739
61-80	1	0,983926414	0,978403391	21,68666297
81-100	1	0,991615657	0,988526434	12,87503149
100-130	1	0,98726702	0,993677716	13,87467945
131-200	1	0,98572357	0,988044842	28,19161544
> 200	1	0,99405956	1,003589412	4,620978864

Aquests coeficients, depenent del nombre i tipus de vehicles N_i ($i = LL, M, P$), són els que s'apliquen al factor corrector:

$$F_C = C_0 \cdot C_{LL}^{N_{LL}} \cdot C_M^{N_M} \cdot C_P^{N_P} \quad C_0, C_{LL}, C_M, C_P \text{ constants}$$

Apèndix L

En aquest apèndix es detallen els càlculs obtinguts i les dades enregistrades en entorns urbans similars a Girona. S'ha aplicat el model de predicció del soroll del trànsit de J. Ruiz en les ciutats de Vic i Figueres, amb els següents resultats:

Figueres

S'han escollit a l'atzar dos carrers interiors de la localitat: el C. Pujades i el C. Monturiol en els que s'han comptabilitzat el següent nombre de vehicles durant 10 minuts i s'han mesurat els respectius nivells equivalents (reals) amb el sonòmetre:

Carrers	Nombre total de vehicles	% Vehicles lleugers	% Motocicletes	% Vehicles pesats	L _{Aeq,10'} (real)
C. Pujades	69	83%	17%	0%	61 dB
C. Monturiol	77	79%	20%	1%	64 dB

El nombre de decibels és el que s'ha mesurat amb l'aparell de mesura en un temps de 10 minuts. Ara, d'acord amb el mètode exposat en el quart capítol i emprant l'equació del model donada per

$$S_{so} = 10 \text{Log} \left[10^{\frac{L_{LL}(N_{LL})}{10}} + 10^{\frac{L_M(N_M)}{10}} + 10^{\frac{L_P(N_P)}{10}} \right] + C_0 \cdot C_{LL}^{N_{LL}} \cdot C_M^{N_M} \cdot C_P^{N_P}$$

que per aquests rangs de vehicles li corresponen uns coeficients C_i equivalents a:

Rang de vehicles	C _P	C _{LL}	C _M	C ₀
61-80	1	0,983926414	0,978403391	21,68666297
81-100	1	0,991615657	0,988526434	12,87503149

i s'obtenen en els respectius carrers uns nivells de soroll estimats teòricament, iguals a:

Carrers	L _{Aeq,10'} (teòric)
C. Pujades	61 dB
C. Monturiol	63 dB

Vic

Seguint el procés descrit anteriorment, les dades obtingudes en dos carrers de Vic són:

Carrers	Nombre total de vehicles	% Vehicles lleugers	% Motocicletes	% Vehicles pesats	L_{Aeq,10'} (real)
C. Verdaguer	86	87%	11%	2%	63 dB
C. Arquebisbe Alemany	54	90%	10%	0%	58 dB

mentre que els valors calculats amb la fórmula de predicció són:

Carrers	L_{Aeq,10'} (teòric)
C. Verdaguer	64 dB
C. Arquebisbe Alemany	57dB

En la realització d'aquests enregistraments s'han respectat curosament les condicions de mesura esmentades en l'apartat (4.2.1), fent especial atenció als focus de soroll externs i diferents del propi brogit del trànsit.

Apèndix M

Càlculs de les integrals a cada costat de la cavitat per una velocitat del ferrocarril de 30 km/h. Els límits de les variables són l'angle recte per l'angle i la longitud del tren, l_T , per la distància al llarg del túnel. El costat esquerra i el dret es diferencien pel paràmetre a que representa la distància mitjana de les rodes a la paret de la cavitat. En el costat esquerra s'ha pres $a_E = 3'5$ m, mentre que el dret s'ha estimat un valor de $a_D = 1$ m.

Cantó esquerra

- Punts P_0 :

$$L_{e0} = \int_0^{127'2} 10^{(70-0'58z)} dz = 79 \text{ dB}$$

- Punts P_1 :

$$L_{e1} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left[70-0'58 \left[2 \cdot (4m) \sin \alpha + \sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}\right] - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z-127'2m}{\sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}} \right] \right]} dz d\alpha = 76 \text{ dB}$$

- Punts P_2 :

$$L_{e2} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left[70-0'58 \left[2 \cdot (4m) (\sin \alpha + \cos \alpha) + \sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}\right] - 0'33 \left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha\right) - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z-127'2m}{\sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}} \right] \right]} dz d\alpha = 73 \text{ dB}$$

- Punts P_3 :

$$L_{e3} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left[70-0'58 \left[2 \cdot (4m) (2 \sin \alpha + \cos \alpha) + \sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}\right] - 0'33 (\pi - 2\alpha) - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z-127'2m}{\sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}} \right] \right]} dz d\alpha = 70 \text{ dB}$$

Cantó dret

- Punts P_0 :

$$L_{d0} = \int_0^{127'2} 10^{(70-0'58z)} dz = 79 \text{ dB}$$

- Punts P_1 :

$$L_{d1} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left(70 - 0'58 \left[2 \cdot (4m) \sin \alpha + \sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2} \right] - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z - 127'2m}{\sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2}} \right] \right)} dz d\alpha = 77 \text{ dB}$$

- Punts P_2 :

$$L_{d2} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left(70 - 0'58 \left[2 \cdot (4m) (\sin \alpha + \cos \alpha) + \sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2} \right] - 0'33 \left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha \right) - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z - 127'2m}{\sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2}} \right] \right)} dz d\alpha = 74 \text{ dB}$$

- Punts P_3 :

$$L_{e3} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left(70 - 0'58 \left[2 \cdot (4m) (2 \sin \alpha + \cos \alpha) + \sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2} \right] - 0'33 (\pi - 2\alpha) - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z - 127'2m}{\sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2}} \right] \right)} dz d\alpha = 71 \text{ dB}$$

Aquests càlculs han estat realitzats amb el programa matemàtic *Derive*. Pot observar-se que els valors de la intensitat acústica associats al soroll generat en les rodes de la part dreta (exceptuant les mateixes rodes) són 1 decibel superiors als propis de la part esquerra. Malgrat que aquest model no pretén explicar els complexos i nombrosos fenòmens acústics que ocorren en l'interior de la cavitat (interferència constructiva, destructiva, dispersió ...) i només constitueix una eina de càlcul, aquesta lleugera diferència de nivells en els càlculs finals es deu a que les fórmules recullen l'efecte de les reflexions acústiques de major intensitat en la paret més propera a les rodes. El càlcul final en la boca del túnel s'obté fent una suma logarítmica:

$$\begin{aligned} L_T &= 10 \text{Log} \sum_{i=0}^3 \left[10^{\frac{L_{d(i)}}{10}} + 10^{\frac{L_{e(i)}}{10}} \right] = \\ &= 10 \text{Log} \left[10^{79/10} + 10^{78/10} + 10^{75/10} + 10^{72/10} + 10^{79/10} + 10^{77/10} + 10^{74/10} + 10^{71/10} \right] = 85'5 \text{ dB} \end{aligned}$$

Aquest nivell acústic és genera en la boca de la cavitat de manera uniforme durant tot el temps que el ferrocarril n'està sortint.

Apèndix N

Càlculs de les integrals a cada costat de la cavitat per una velocitat del ferrocarril de 70 km/h. Tots els raonaments i supòsits fets en l'apèndix anterior són aplicables ara que el nivell de pressió acústica en la base de les rodes del ferrocarril és de 87 dB.

Cantó esquerra

- Punts P_0 :

$$L_{e0} = \int_0^{127'2} 10^{(87-0'58z)} dz = 96 \text{ dB}$$

- Punts P_1 :

$$L_{e1} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left(87-0'58 \left[2 \cdot (4m) \sin \alpha + \sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}\right] - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z-l_T}{\sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}} \right] \right)} dz d\alpha = 93 \text{ dB}$$

- Punts P_2 :

$$L_{e2} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left(87-0'58 \left[2 \cdot (4m)(\sin \alpha + \cos \alpha) + \sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}\right] - B_p \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha\right) - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z-l_T}{\sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}} \right] \right)} dz d\alpha = 90 \text{ dB}$$

- Punts P_3 :

$$L_{e3} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left(87-0'58 \left[2 \cdot (4m)(2 \sin \alpha + \cos \alpha) + \sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}\right] - B_p \cdot (\pi - 2\alpha) - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z-l_T}{\sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (3'5m)^2}} \right] \right)} dz d\alpha = 87 \text{ dB}$$

Cantó dret

- Punts P_0 :

$$L_{e0} = \int_0^{127'2} 10^{(87-0'58z)} dz = 96 \text{ dB}$$

- Punts P_1 :

$$L_{e1} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{127'2} 10^{\left(87-0'58 \left[2 \cdot (4m) \sin \alpha + \sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (1m)^2}\right] - 0'33 \cdot \arccos \left[\frac{z-l_T}{\sqrt{[z-(127'2m)]^2 + (1m)^2}} \right] \right)} dz d\alpha = 94 \text{ dB}$$

- Punts P_2 :

$$L_{e2} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{127'2} 10 \left(87 - 0'58 \left[2 \cdot (4m)(\sin \alpha + \cos \alpha) + \sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2} \right] - B_p \left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha \right) - 0'33 \cdot ar \cos \left[\frac{z - l_r}{\sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2}} \right] \right) dz d\alpha = 91 \text{ dB}$$

- Punts P_3 :

$$L_{e3} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{127'2} 10 \left(87 - 0'58 \left[2 \cdot (4m)(2 \sin \alpha + \cos \alpha) + \sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2} \right] - B_p \cdot (\pi - 2\alpha) - 0'33 \cdot ar \cos \left[\frac{z - l_r}{\sqrt{[z - (127'2m)]^2 + (1m)^2}} \right] \right) dz d\alpha = 88 \text{ dB}$$

Anàlogament a les integrals calculades anteriorment s'observa que els valors obtinguts a partir del soroll generat en les rodes del costat dret són una mica superiors als corresponents de la paret esquerra. El càlcul final en la boca del túnel s'obté fent una suma logarítmica:

$$L_r = 10 \text{Log} \sum_{i=0}^3 \left[10^{\frac{L_{d(i)}}{10}} + 10^{\frac{L_{e(i)}}{10}} \right] =$$

$$= 10 \text{Log} \left[10^{\frac{96}{10}} + 10^{\frac{93}{10}} + 10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{87}{10}} + 10^{\frac{96}{10}} + 10^{\frac{94}{10}} + 10^{\frac{91}{10}} + 10^{\frac{88}{10}} \right] = 102 \text{ dB}$$

Apèndix O

Les dades d'aquestes taules corresponen als enregistraments de les mesures dels nivells equivalent de 10 minuts de durada, $L_{Aeq,10}$. El nombre total de vehicles, així com les dades reals, mesurades amb el sonòmetre (reals), i les estimades amb el model de predicció es refereixen a aquest període de temps. En les àrees s'ha escollit el punt més representatiu de cada zona, tot i que durant el treball s'ha disposat d'un banc de dades amb moltes més mesures.

Zona 1A

Carrers	% Motos	% Vehicles lleugers	% Bus-Camió	Total vehicles	Model (dB)	Dades Reals (dB)
1.1.-Avda. J. Tarradelles	15%	79%	6%	120	69	68
1.2.-Crta. de Talaià	6%	89%	5%	158	71	71
1.3.-Rambla d'en X. Cugat	25%	73%	3%	82	66	67
1.4.-C. St. Gregori	13%	74%	13%	94	68	65
1.5.-C. Font de l'Abat	1%	89%	10%	124	71	70
1.6.-C. Pont de la Barca	9%	73%	18%	110	71	69
Àrees						
A1: Sud Crta. de Talaià	0%	100%	0%	2	56	53
A2: C. Bosquet	0%	100%	0%	1	53	51
A3: C. E.Adroher Pascual	9%	91%	0%	11	50	51
A4: Avinguda Fontajau	20%	80%	0%	5	51	51
A4: C. Bluefields	33%	2/3	0%	3	50	48
A4: C. Dr.Estela	0%	100%	0%	2	46	46

Zona 2B

Carrers	% Motos	% Vehicles lleugers	% Bus-Camió	Total vehicles	Model (dB)	Dades Reals (dB)
2.1.-Avda. de França	24%	73%	3%	125	67	66
2.2.-Crta. de Palamos	25%	72%	4%	89	64	63
2.3.-C. Font de l'Abat	6%	87%	8%	164	68	70
2.4.-C. Pont de la Barca	7%	80%	13%	150	67	69
2.5.-C. Bellaire	0%	85%	15%	60	54	57
Àrees						
B1: Parking cinema	0	1	0	22	59	61
B2: Manuel de Pedrolo	27%	73%	1%	15	48	51
B3: C. Esport	0%	100%	0%	3	58	58
B4: C. J.Trueta	0%	100%	0%	16	60	61
B5: Plaça Sant Pere	0%	100%	0%	3	58	59
B6: C. Portal de la Barca	0%	1	0%	1	53	55

Zona 3C

Carrers	% Motos	% Vehicles lleugers	% Bus-Camió	Total vehicles	Model (dB)	Dades Reals (dB)
3.1.-Passeig de la Devesa	4%	88%	8%	160	71	69
3.2.-Gran Via Jaume I	23%	74%	3%	134	68	67
3.3.-C. de Santa Eugènia	24%	73%	3%	85	65	63
3.4.-Avda. Sant Francesc	15%	81%	4%	91	66	69
3.5.-C. Riu Güell	5%	93%	2%	194	71	68
3.6.-C. R. Massó Valentí	1%	84%	15%	136	71	72
3.7.-C. Barcelona	22%	74%	4%	142	70	68
3.8.- C. Joan Maragall	3%	97%	0%	85	66	66
3.9.- P. General Mendoza	5%	92%	3%	60	62	64
3.10.- C. del Carme	22%	75%	3%	82	65	64
Àrees						
C1: C. Anselm Clavé	29%	70%	1%	19	54	54
C1: C. Nou	.....	.....	.....	Peatonal		60
C1: Pl. Josep Pla	27%	72%	1%	18	54	54
C2: C. Sta. Eugènia	19%	76%	5%	105	69	71
C2: C. Riu Güell	16%	79%	5%	76	65	63
C2: C. Impressors Bro	19%	75%	6%	89	66	68
C2: Rda. Ferran Puig-1	5%	92%	3%	282	73	75
C2: Rda. Ferran Puig-2	21%	75%	3%	104	68	65
C2: Avda. Pau Casals	24%	74%	2%	59	60	59
C2: C. Caterina Albert	27%	70%	3%	53	58	59
C3: C. Tomàs de Sibil·la	17%	83%	0%	24	54	57
C3: Avda. St. Narcís	26%	71%	3%	88	65	63
C3: Parc Central	.....	.....	.....	Peatonal		67
C4: C. Pierre Vilar	18%	82%	0%	165	70	68
C4: Trav. Carrilet	24%	74%	1%	19	55	54
C5: C. Juli Garreta	22%	76%	2%	100	66	64
C5: C. Ciurana	16%	82%	2%	82	65	66
C6: C. Fontanillas	0%	100%	0%	10	51	53
C7: C. Ultònia	7%	92%	1%	194	70	68
C8: C. St. A. M ^a Claret	12%	87%	1%	96	64	66

Zona 4D

Carrers	% Motos	% Vehicles lleugers	% Bus-Camió	Total vehicles	Model (dB)	Dades Reals (dB)
4.1.-C. Santa Eugènia-1	26%	73%	1%	94	65	68
4.2.-C. Santa Eugènia-2	19%	76%	5%	105	69	71
4.3.-Passeig d'Olot	32%	63%	5%	120	70	67
4.4.-Avda. St. Narcís	26%	71%	3%	88	65	63
4.5.-C. Tomàs de Sivil·la	0%	100%	0%	13	50	53
4.6.-C. R. Massó Valentí	1%	84%	15%	136	71	72
4.7.-C. Barcelona	22%	74%	4%	181	72	71
4.8.-C.Emili Grahit	23%	73%	4%	184	73	73
Àrees						
D1: Parc Central	.....	.....	.....	Peatonal		58
D2: Avda. St. Narcís	26%	71%	3%	88	65	63
D3: C. Maçana	30%	70%	0%	12	53	52
D4: C. M. Déu la Salut	7%	87%	6%	152	70	72
D4: C. Santander	6%	94%	0%	123	66	66
D4: C. M. Déu de Fàtima	0%	100%	0%	1	43	44
D4: Rbla.Catalunya	26%	71%	3%	68	63	61
D4: Sant Sebastià	26%	72%	2%	45	58	57
D5: C. Oviedo	24%	73%	3%	65	63	61
D6:C. J. M ^a Gironella	16%	84%	0%	74	62	64
D7: C.Saragossa	24%	73%	3%	54	59	59

Zona 5E





Carrers	% Motos	% Vehicles lleugers	% Bus-Camió	Total vehicles	Model (dB)	Dades Reals (dB)
5.1.-C. Barcelona	22%	74%	4%	181	72	71
5.2.-C. Joan Maragall	3%	97%	0%	62	65	66
5.3.-C. Migdia-1	0%	100%	0%	57	60	63
5.4.-C. Migdia-2	2%	98%	0%	64	63	63
5.5.-C. Ultònia	7%	92%	1%	194	72	71
5.6.-P. General Mendoza	3%	97%	0%	85	66	66
5.7.-C. del Carme	22%	75%	3%	82	66	64
5.8.-C. de la Creu	16%	84%	0%	74	65	65
5.9.-C. Emili Grahit	23%	73%	4%	184	73	73
5.10.-C.Barcelona	22%	74%	4%	181	72	71
5.11.-Gran Via Jaume I	23%	74%	3%	134	68	67
5.12.-C. A. Maria Claret	26%	72%	0%	74	66	68
Àrees						
E1: Travessia Canaders	3%	94%	3%	21	55	55
E2: C. Bacià	20%	71%	9%	72	63	64
E3: C. Saragossa	27%	72%	1%	54	59	59
E4: C. St. A. Maria Claret	17%	80%	3%	78	64	64
E5: Carrer Rutlla	17%	84%	0%	50	58	59
E6: C. Bisbe Lorenzana	24%	75%	1%	110	67	67
E7: Avda. Dr. Pericot	20%	76%	4%	115	68	67
E8: Pont Font del Rei	25%	73%	2%	120	69	70
E9: C. Príncep	32%	67%	1%	69	63	63
E10: C. Juli Garreta	16%	82%	2%	79	64	63
E11: P. Catalunya (dins)	.....	.....	.....	.....	.....	61
E12: Vista Alegre	7%	93%	0%	24	56	55

Zona 6F

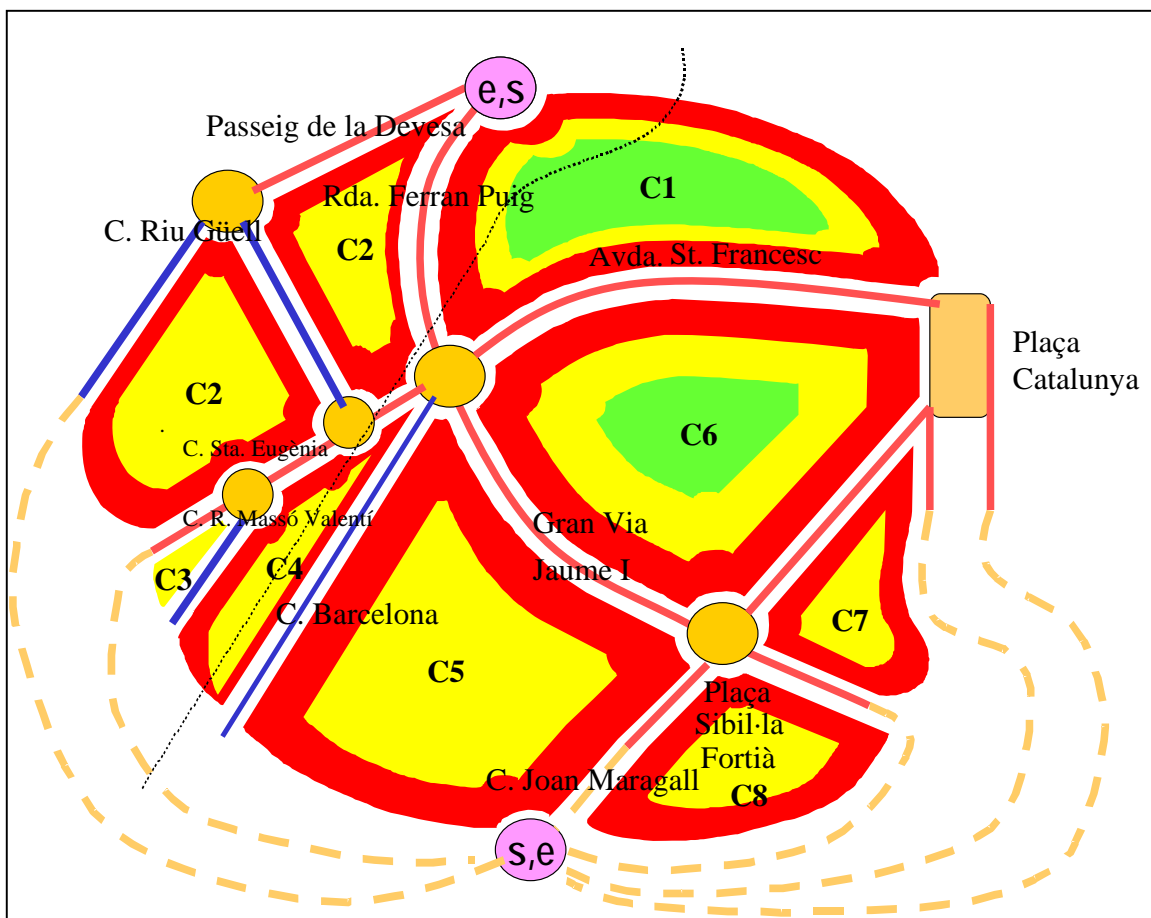
Carrers	% Motos	% Vehicles lleugers	% Bus-Camió	Total vehicles	Model (dB)	Dades Reals (dB)
6.1.-Avda. St.Narcís	26%	69%	5%	175	72	72
6.2.-Crta. Sta. Coloma	22%	73%	5%	150	71	71
6.3.-Crta. Barcelona	22%	74%	4%	230	75	74
6.4.- C. Emília Reggio	7%	90%	3%	109	67	66
6.5.- C. Migdia	2%	98%	0%	64	63	63
6.6.- Avda. Lluís Pericot	9%	88%	3%	126	68	66
6.7.- P. Creu de Palau	4%	96%	0%	36	57	57
6.8.-C. Emili Grahit	26%	73%	1%	184	71	73
6.9.-C.Rutlla	23%	75%	2%	88	64	64
Àrees						
F1:C.Oviedo	17%	89%	4%	93	66	65
F2:C.Príncep	32%	67%	1%	69	63	63
F3:	23%	75%	2%	88	64	64
F4:C. J.Ametller i Vinyes	11%	88%	1%	36	57	58
F5:C. E.Claudi Girbal	14%	86%	0%	30	54	55
F6:C.Albi	20%	77%	3%	39	58	56
F7:C.Saragossa	23%	76%	1%	19	55	54

Apèndix P

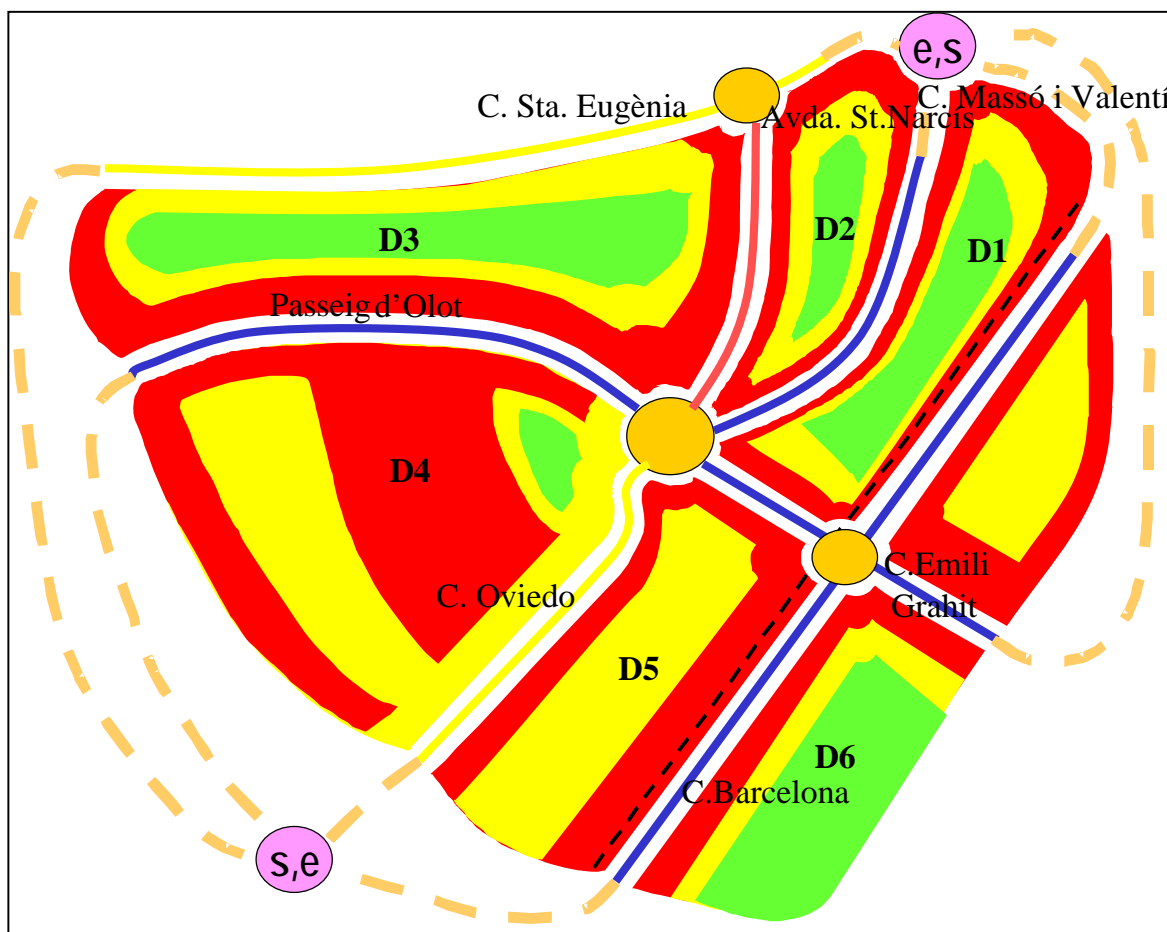
Els nivells de soroll (decibels) es corresponen amb la realitat actual de Girona i s'han elaborat a partir de les taules de l'apèndix O (àrees i carrers amb la nomenclatura: *lletra-nombre*). El trànsit es ramifica des dels nodes d'entrada i sortida, alternativament *e* i *s*, però davant la impossibilitat de construir noves vies, no s'ha aplicat la metodologia desenvolupada en les dues primeres zones i s'ha optat per restringir el trànsit. Els carrers pintats en color blau, igualen o superen lleugerament els 70 dB per la qual cosa, i donat l'elevat gradient d'absorció atmosfèrica, les àrees circumdants s'han representat en vermell, d'acord amb la següent escala de colors:

	$\geq 70 \text{ dB}$
	70 – 65 dB
	65 – 60 dB
	< 60 dB

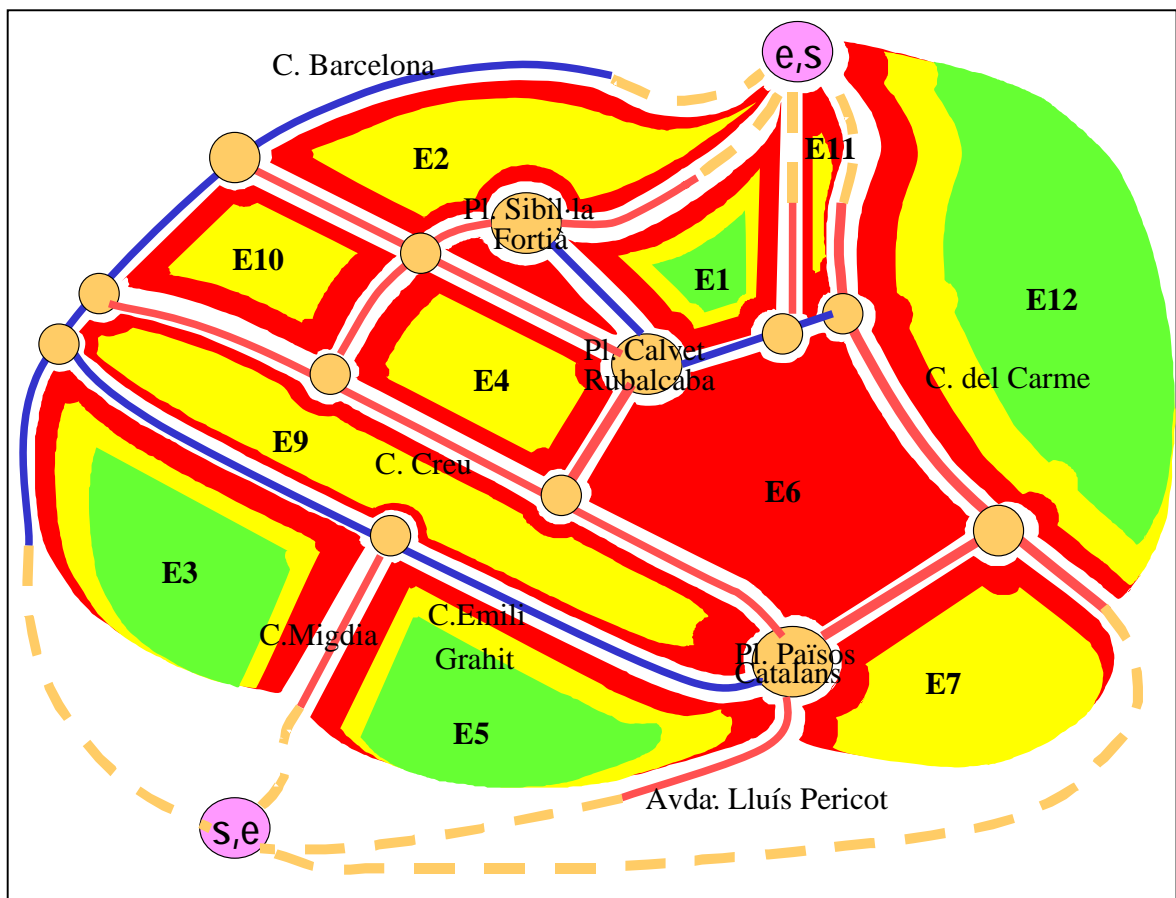
Zona 3C Real



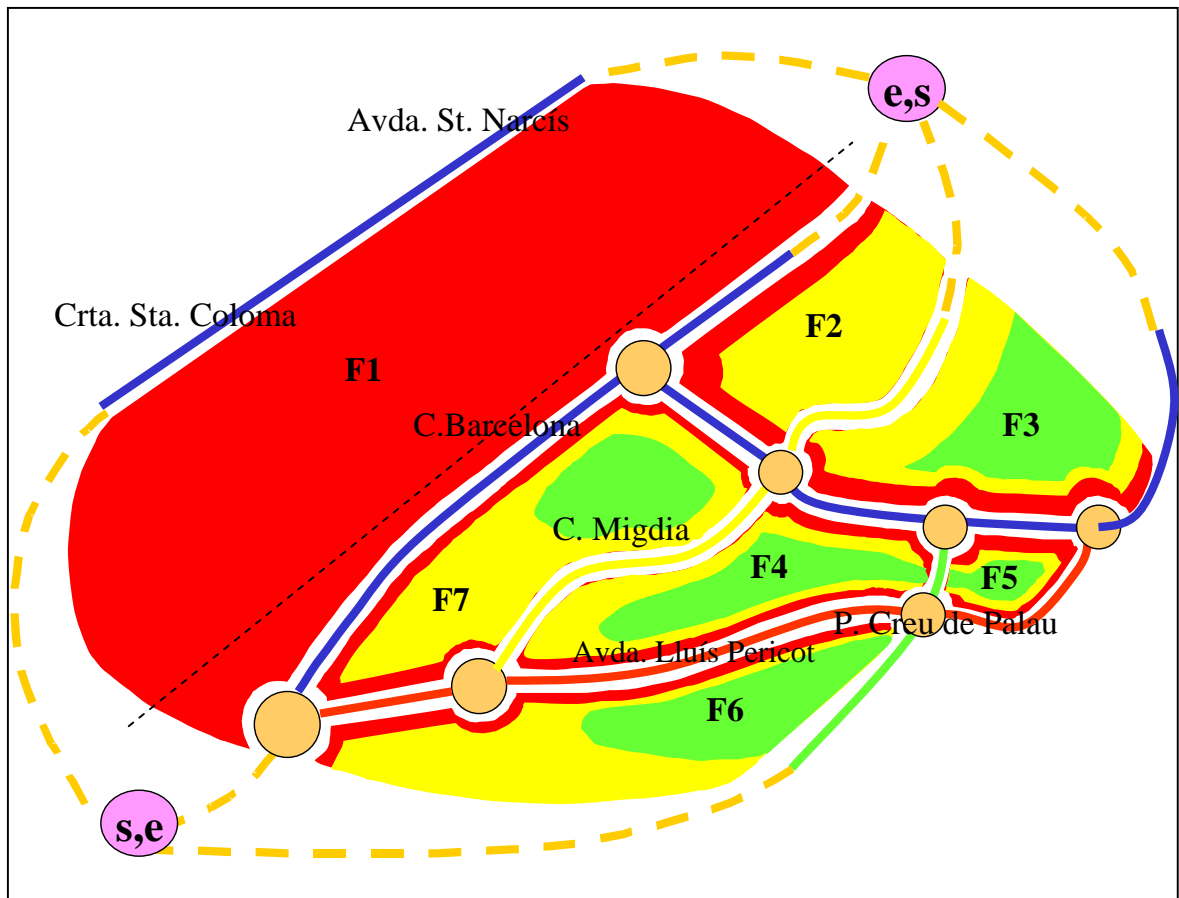
Zona 4D Real



Zona 5E

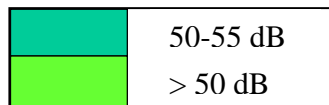


Zona 6F

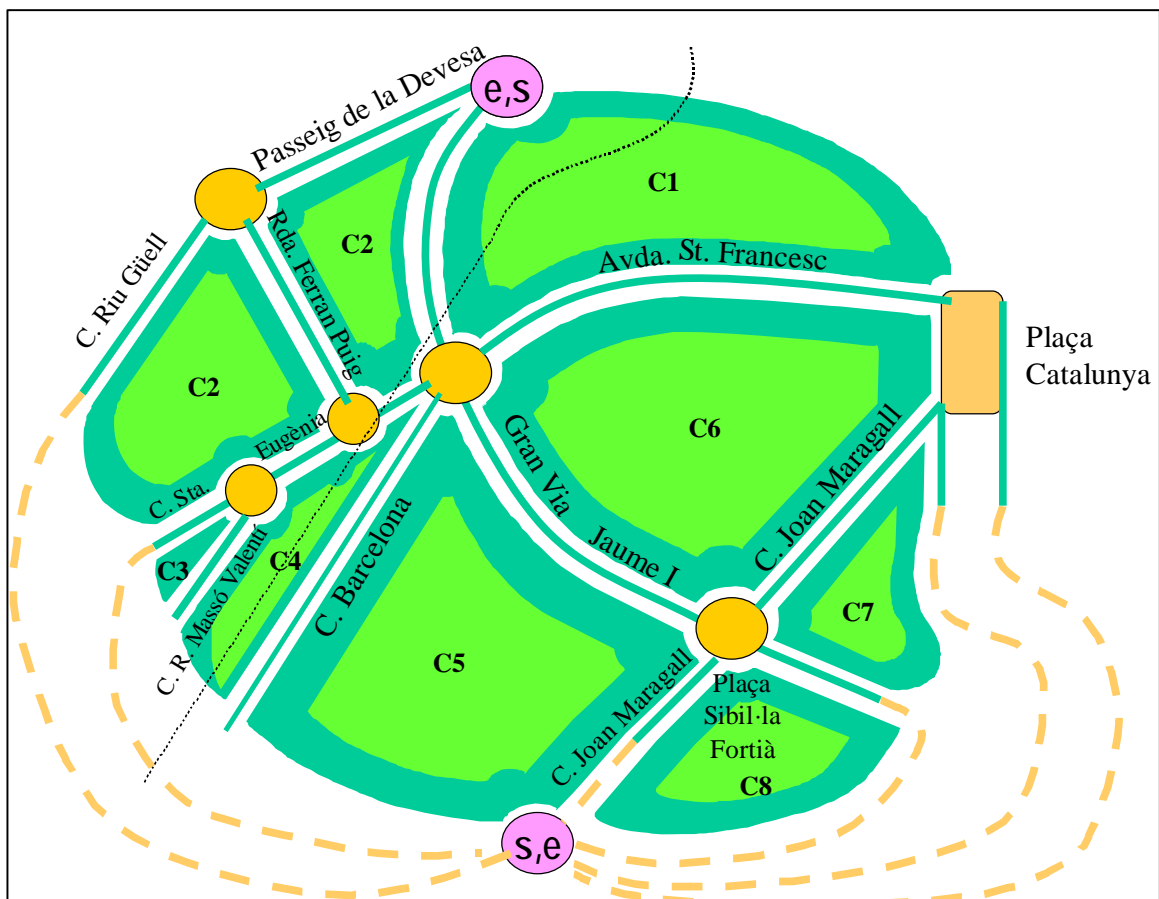


Apèndix Q

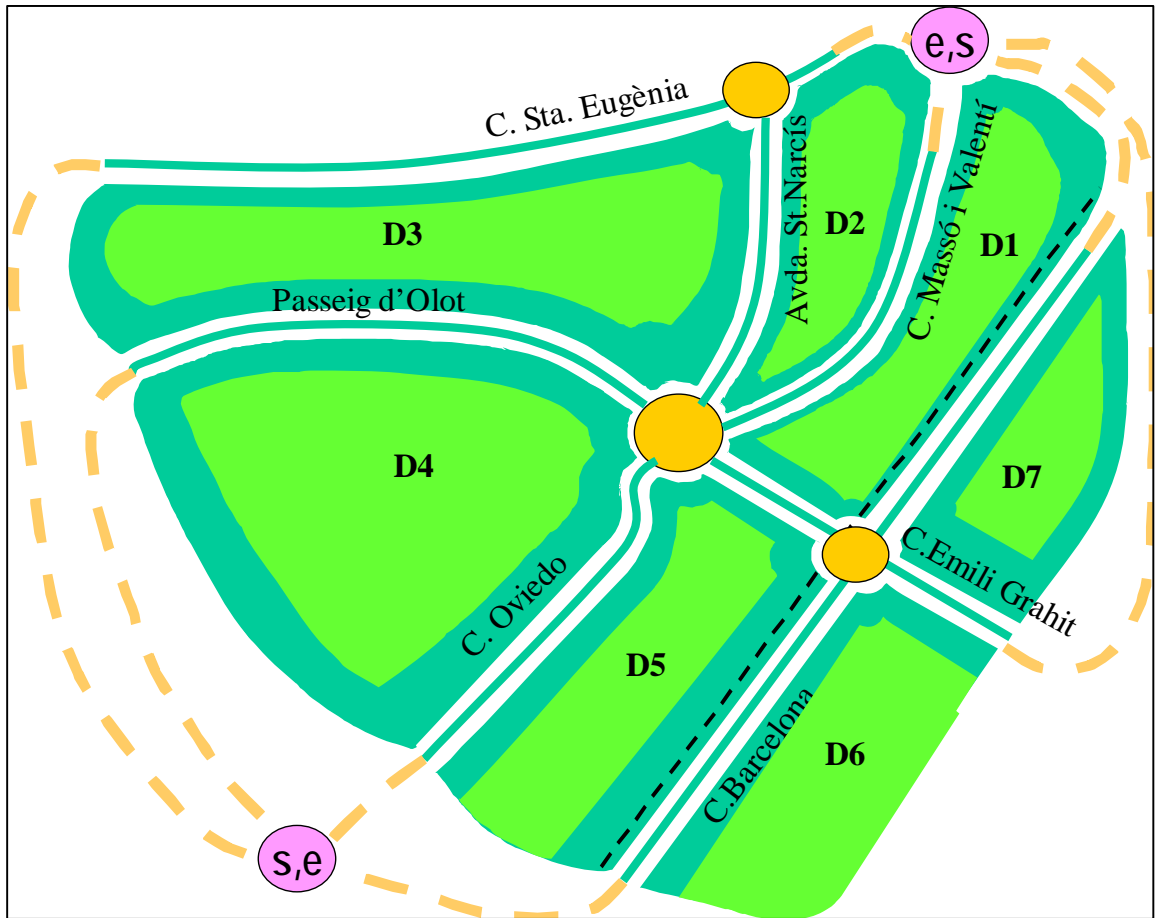
En aquest apèndix estan representades les zones 3,4,5 i 6, en el supòsit que es prohibís l'accés al trànsit i només estigués en funcionament una xarxa de transport públic. A tot arreu, els nivells equivalents de 10 minuts de durada tindrien un valor de 50 dB si es col·loqués el sonòmetre a 1 m de la via i menys de 45 dB en les zones més interiors, allunyades dels carrers per on circularien els autobusos. Hi haurien, però, focus de soroll variables i de natura aleatòria per la qual cosa són impredecibles, com el xerrar de la gent, activitats esporàdiques que es realitzen a l'exterior ... L'escala de colors utilitzada, donat els baixos nivells acústics que s'enregistrarien, es redueix ara a



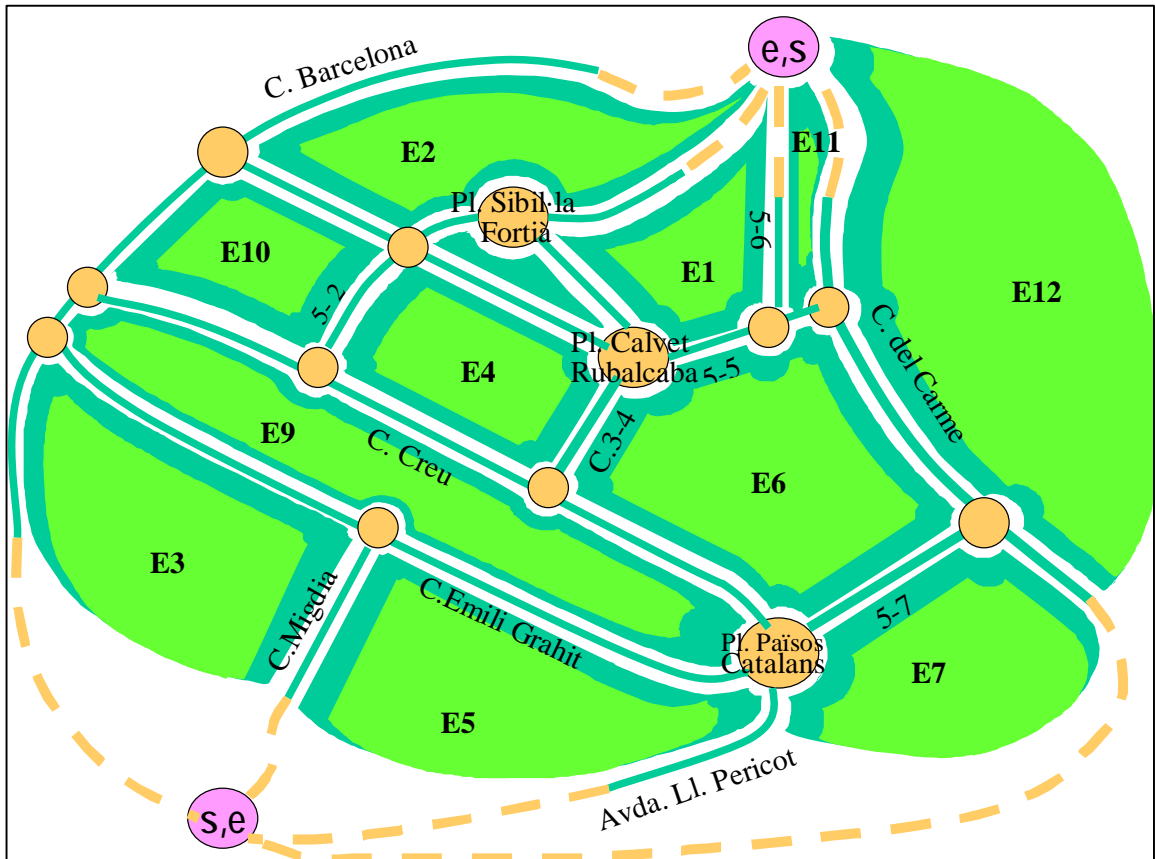
Zona 3C Ideal



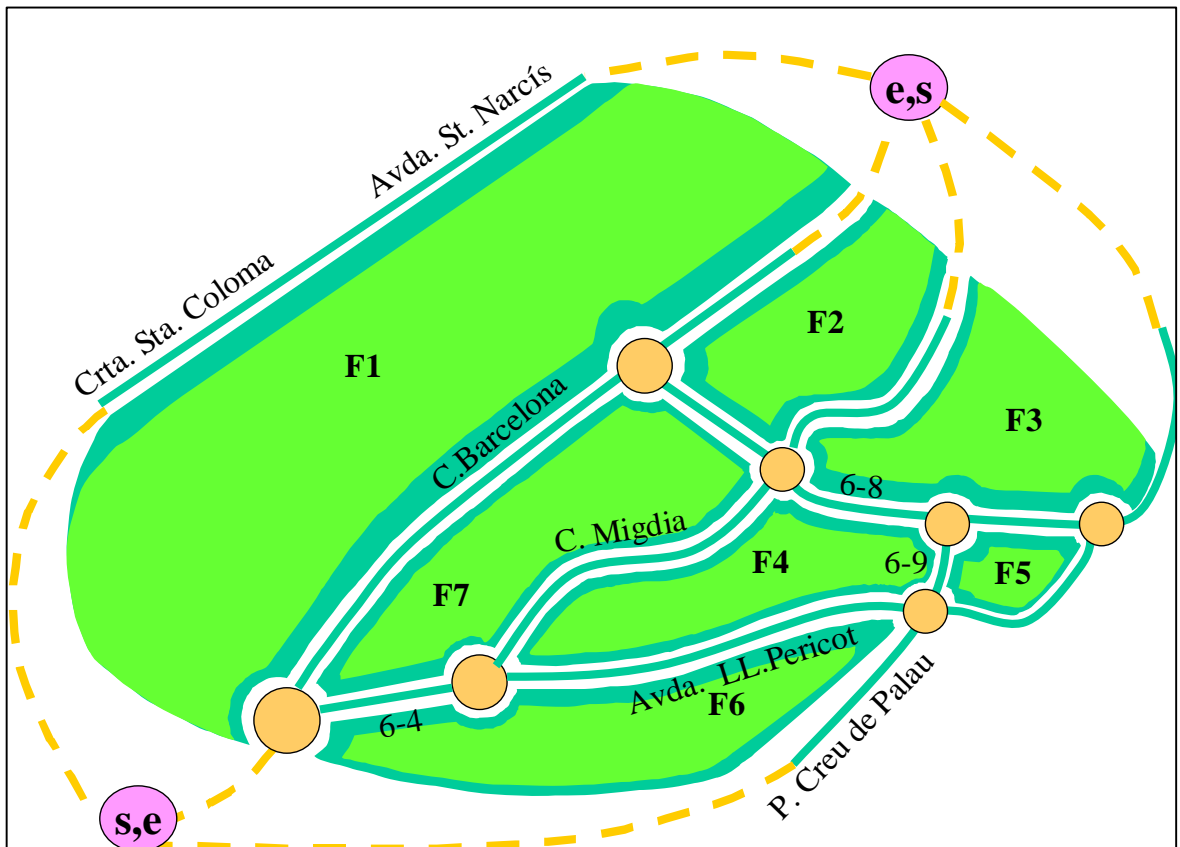
Zona 4D Ideal



Zona 5E Ideal

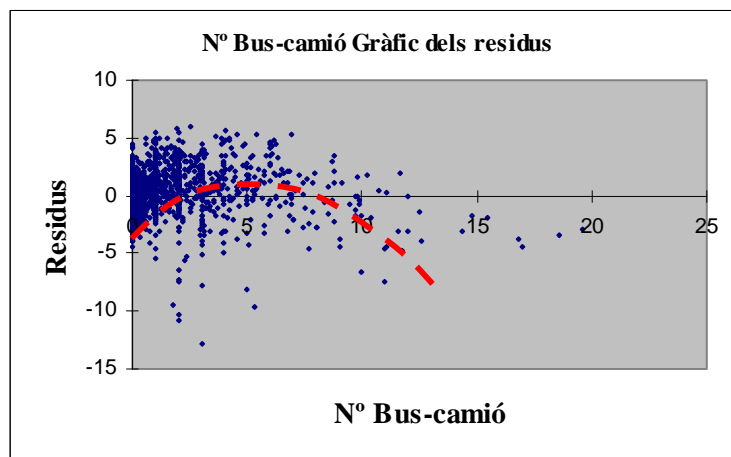
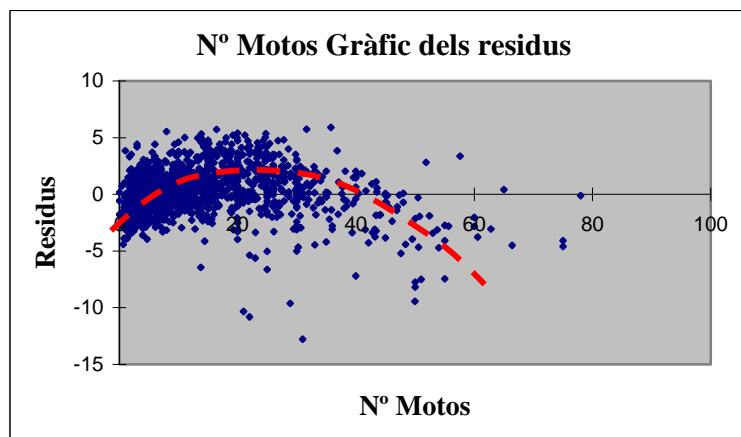


Zona 6F Ideal



Apèndix R

Tal com s'aprecia en aquestes gràfiques els residus de les variables “motos” i “bus-camió”, també mostren una lleugera tendència curvilínia, la qual cosa indica que la dependència no és estrictament lineal. La línia amb traç vermell intermitent és representativa de la curvatura pròpia d'aquests núvols de dispersió.



Apèndix S

Taula de valors de l'Índex Compost d'Exposició al soroll (IT) i els corresponents nivells continus equivalents.

Índex compost D'exposició al soroll	Nivell de soroll continu equivalent (dBA)
10	80
15	82
20	83
25	84
30	85
40	86
50	87
60	88
80	89
100	90
125	91
160	92
200	93
250	94
315	95
400	96
500	97
630	98
800	99
1.000	100
1.250	101
1.600	102
2.000	103
2.500	104
3.150	105
4.000	106
5.000	107
6.300	108
8.000	109
10.000	110
12.500	111
16.000	112
20.000	113
25.000	114
31.500	115

Relació entre l'Índex Compost i el Nivell de Soroll Continu Equivalent.

Apèndix T

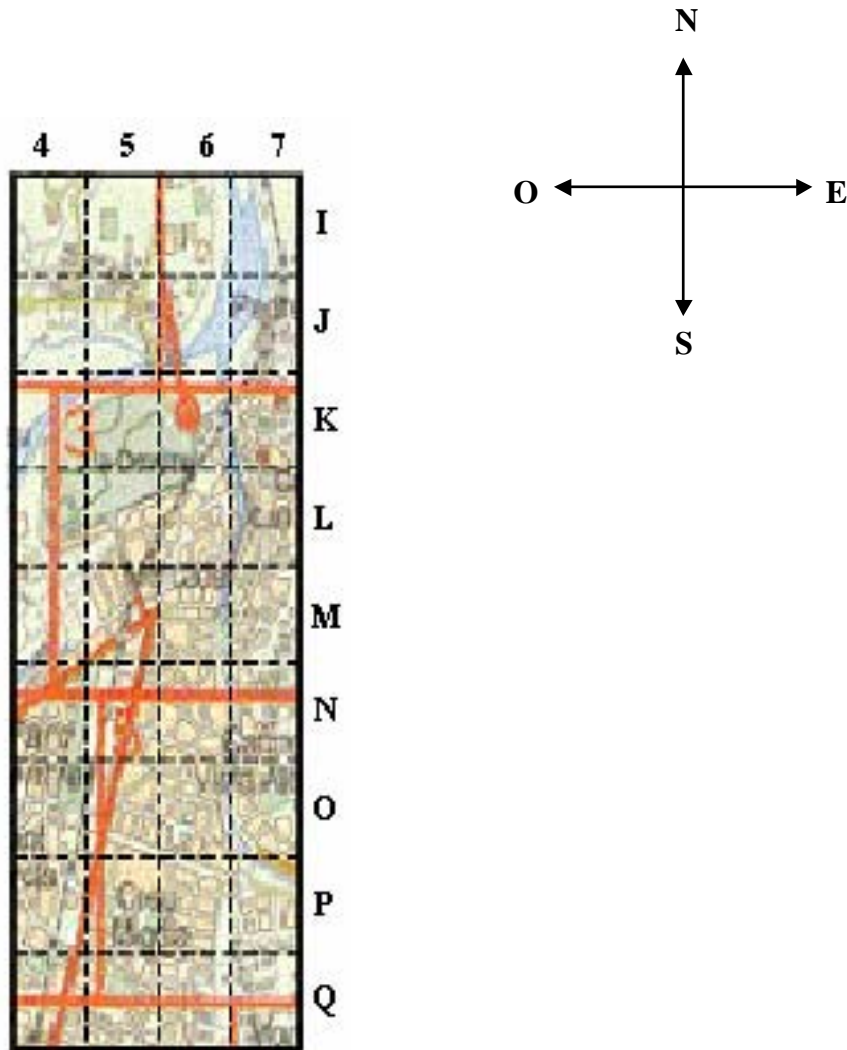
En aquesta taula figuren les coordenades de les 36 zones i els llocs on s'han realitzat les mesures. Aquesta divisió de l'àrea urbana de Girona consisteix en una partició que recobreix exhaustivament la part interior. La correspondència d'aquestes coordenades amb la seva situació geogràfica real es troba en l'apèndix U.

Coordenades	Carrer	Total Vehicles	dB
I-7	C.E.Adroher Pascual	11	51
	C.Narcís Roca Figueras	14	53
I-6	Avinguda de França	125	68
	C.Esport	23	58
I-5	Crta. Palamós	78	65
	Crta. Palafrugell	89	63
I-4	Ronda del Roig	6	49
	C.Onze de setembre	4	48
J-7	Rambla d'en Xavier Cugat	81	67
	C.Bluefields	3	49
J-6	Pont de la Barca	110	69
	Avinguda de França	125	68
J-5	Crta. Palafrugell/Palamós	82	63
	C.Bellaire	41	60
J-4	Camí de Montjuic	6	51
	Pujada a la Barrufa	8	53
k-7	Passeig de la sardana	18	54
	Instalacions esportives	2	46
k-6	Passeig de la devesa	160	69
	Parc de la devesa	0	44
k-5	Plaça catedral	3	46
	Jaume Pons Martí	36	56
k-4	C. Muralla	44	58
	C.Alemanya	12	53
L-7	C.Riu Güell	145	68
	C.Caterina Albert	53	59
L-6	Gran Via Jaume I	134	67
	Ronda Ferran Puig	282	75
L-5	C.Ciudadans	5	49
	Portal nou	53	59

L-4	Passeig fora muralla	16	53
	Portal nou	49	57
M-7	C. Sta. Eugènia	166	72
	Avda. St. Narcís	175	73
M-6	Crta. Barcelona	181	73
	C.Juli Garreta	73	61
M-5	C. del Carme	95	66
	C.Ultònia	194	73
M-4	C. Sol	51	59
	C.Isabel la Catòlica	13	53
N-7	Passeig d'Olot	120	67
	C.Santander	123	61
N-6	C.Emili Grahit	184	73
	C. del Príncep	81	63
N-5	C. del Carme	95	66
	C. Rutlla	72	63
N-4	Vista alegre	12	53
	Vista alegre	19	54
O-7	C. Oviedo	95	65
	C. Mare de Déu de la Salut	152	72
O-6	C. Migdia	94	65
	Parc del migdia	0	46
O-5	C. Pericot	123	69
	C. Rutlla	109	66
O-4	C. Joaquim Ruyra	20	55
	C. Joan Coromines	26	56
P-7	Crta.Barcelona	197	72
	Crta. Sta. Coloma	110	66
P-6	C. Migdia	99	66
	Passeig Agustí Font	120	74
P-5	Avda. Lluís Pericot	116	68
	Avda. Montilivi	55	58
P-4	J.M. Corredor i Pomés	22	54
	C. Serres	13	51
Q-7	Crta.Barcelona	208	74
	C. Migdia	87	64
Q-6	Avda. Lluís Pericot	82	63
	Torre Rafaela	10	51
Q-5	Avda. Lluís Pericot	86	64
	Mas Abella	14	51
Q-4	Avda. Montilivi	63	62
	UDG	42	59

Apèndix U

En aquest mapa es localitzen les 36 zones que corresponen a l'àrea central de la ciutat de Girona. En cadascuna de les quadrícules s'han escollit dues mesures de soroll representatives d'acord amb els principis exposats en el capítol 5.



Aquest mapa representa la part central de la ciutat de Girona i cobreix una superfície de 6'29 Km². S'han exclòs les zones perifèriques, menys poblades i amb uns nivells d'emissió acústica que actualment es podrien qualificar de tolerables.

Apèndix V

Regulació comunitària i la seva adaptació al dret espanyol:

Vehicles a motor

Directiva 70/157/CEE, de 6 de febrer de 1970, relativa al nivell sonor admissible i al dispositiu d'escapament dels vehicles a motor (DOCE L42/16, de 23 de febrer de 1970). Les darreres adaptacions i modificacions al Reial Decret Espanyol 2028/1986, de 6 de juny de 1986, relatiu a la legislació sobre temes acústics, són:

- Directiva 92/97/CEE, de 10 de novembre de 1992 (DOCE L 371/1, de 19 de desembre de 1992).
- Directiva 77/311/CEE, de 29 de març de 1977, relativa a l'aproximació de les legislacions dels estats membres sobre el nivell sonor a les oïdes dels conductors de tractors agrícoles o forestals amb rodes (DOCE L 10571, de 28 d'abril de 1977).

Motocicletes

Directiva 78/1015/CEE, de 23 de novembre de 1978, relativa a l'aproximació de les legislacions dels estats membres sobre el nivell sonor admissible i el dispositiu d'escapament de les motocicletes (DOCE L 349/21, de 13 de desembre de 1978). Adaptada pel Reial Decret 2028/1986, de 6 de juny de 1986.

Aquesta directiva ha estat modificada per les següents:

- Directiva 87/56, de 18 de desembre de 1986 (DOCE L 24/42, de 27 de gener de 1987).
- Directiva 89/235/CEE, de 13 de març de 1989 (DOCE L 98/1, de 11 d'abril de 1989).

Maquinària i equips d'obres

Directiva 89/392/CEE, de 14 de juny de 1989, relativa a l'aproximació de les legislacions dels estats membres sobre màquines (DOCE L 183/9, de 29 de juny de 1989).

Aquesta directiva ha estat modificada per les següents:

- Directiva 91/368/CEE, de 20 de juny de 1991 (DOCE L 198/16, de 22 de juliol de 1991).
- Directiva 93/44/CEE, de 14 de juny de 1993 (DOCE L 175/12, de 19 de juliol de 1993).

Directiva 84/538/CEE, de 17 de desembre de 1984, relativa a l'aproximació de les legislacions dels estats membres pel que fa al nivell de potència acústica admissible dels tallagespa (DOCE L 300/171, de 19 de novembre de 1984).

Aquesta directiva ha estat modificada per les següents:

- Directiva 87/252/CEE, de 7 d'abril de 1987 (DOCE L 117/22, de 5 de maig de 1987).
- Directiva 88/180, de 22 de març de 1988 (DOCE L 81/69, de 26 de març de 1988).
- Directiva 88/181, de 22 de març de 1988 (DOCE L 81/69, de 26 de març de 1988).

Aeronaus subsòniques

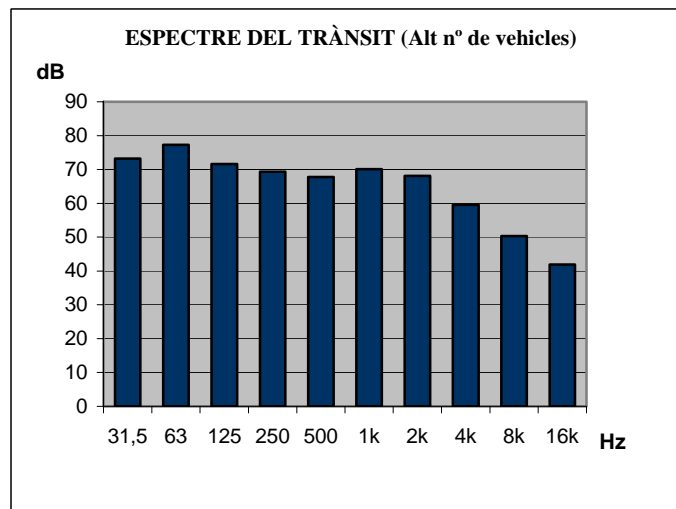
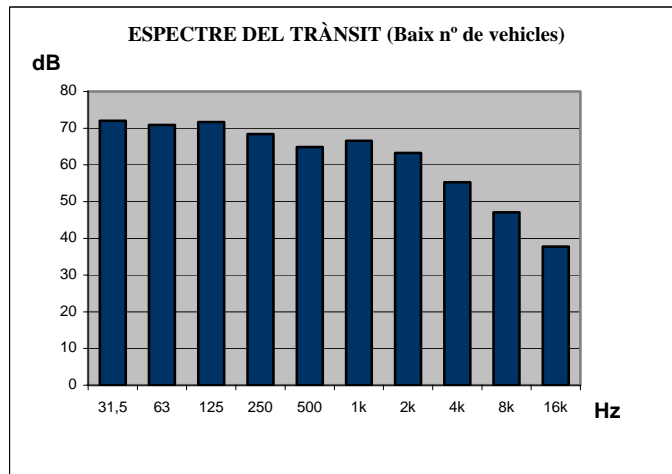
Directiva 80/51/CEE, de 20 de desembre de 1979, relativa a la limitació de les emissions sonores de les aeronaus subsòniques (DOCE L 18/26, de 24 de gener de 1980).

Aquesta directiva ha estat modificada per les següents:

- Directiva 83/206/CEE, de 21 d'abril de 1983 (DOCE L 117/15, de 4 de maig de 1983).
- Directiva 89/629/CEE, de 4 de desembre de 1989 (DOCE L 363/27, de 13 de desembre de 1989).

Apèndix X

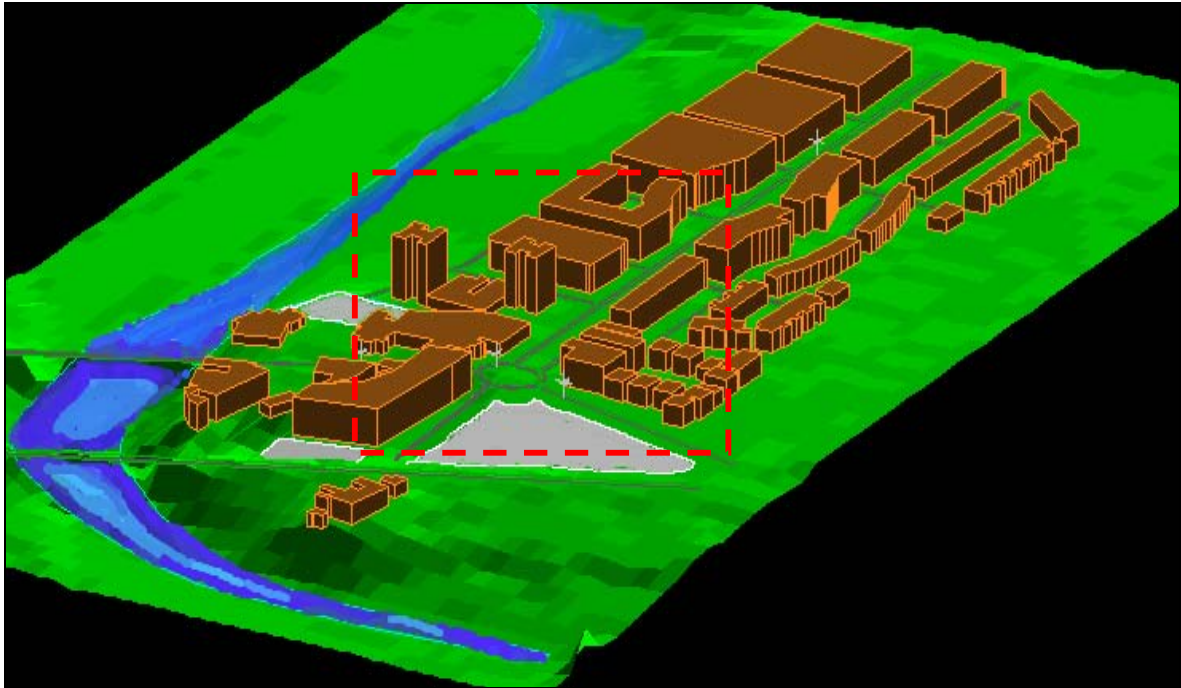
Histogrames representatius de l'espectre acústic en banda d'octava corresponents a un flux de trànsit amb un baix i alt nombre de vehicles (menys de 30 i més de 120 respectivament).



Ambdues gràfiques presenten un perfil molt similar on s'aprecia que els nivells de màxima intensitat sonora corresponen a les freqüències de la part més baixa de l'espectre.

Apèndix Y

Perspectiva aèria de la zona 1A:



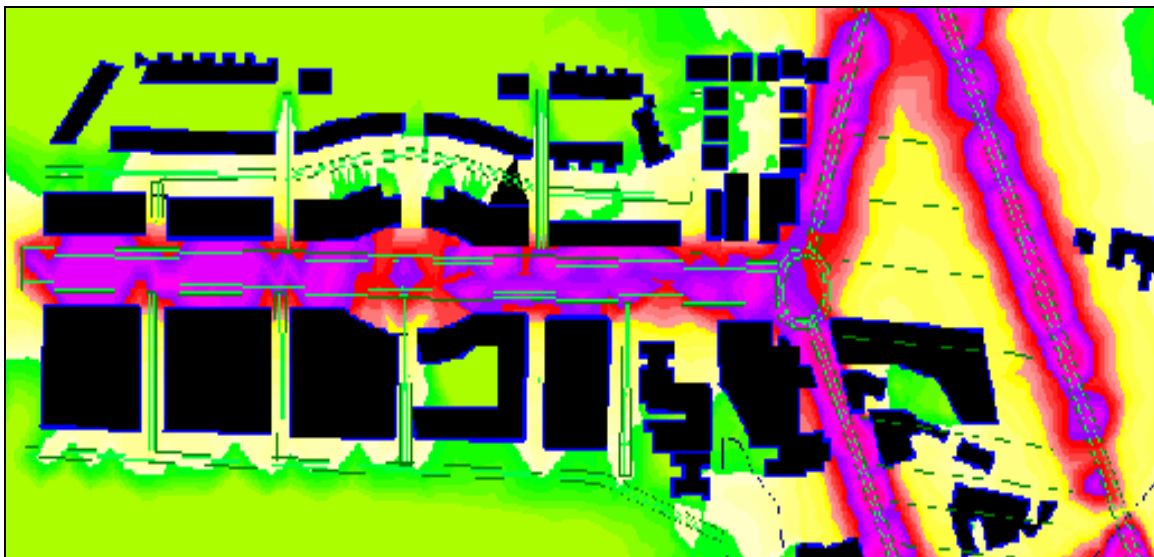
Amb el programa de simulació acústica MITRHA s'ha fet l'estudi dels nivells de soroll existents, provocats pel trànsit viari durant el dia, en la zona interior al perímetre marcat amb línia discontinua. En la pàgina següent hi ha el mapa acústic fet a partir de la següent metodologia:

- Es realitza una plantilla amb AUTOCAD on s'introdueixen les dades relatives a les dimensions dels edificis.
- Amb el MITRHA s'obre aquesta plantilla i s'indiquen les dades relatives als nivells de soroll enregistrats en diferents punts i al nombre de vehicles que transiten pels carrers i vies principals en 1 hora.
- Seguidament es poden escollir diferents paràmetres (direcció del vent, tipus d'asfalt...) entre els que destaca el nombre de receptors de la xarxa que utilitza el programa per calcular el soroll en cada punt de la zona.
- Finalment es pot escollir el nombre de colors i l'escala en decibels associada a cadascun.

El nombre de decibels associat a l'escala cromàtica escollida per aquesta simulació és:

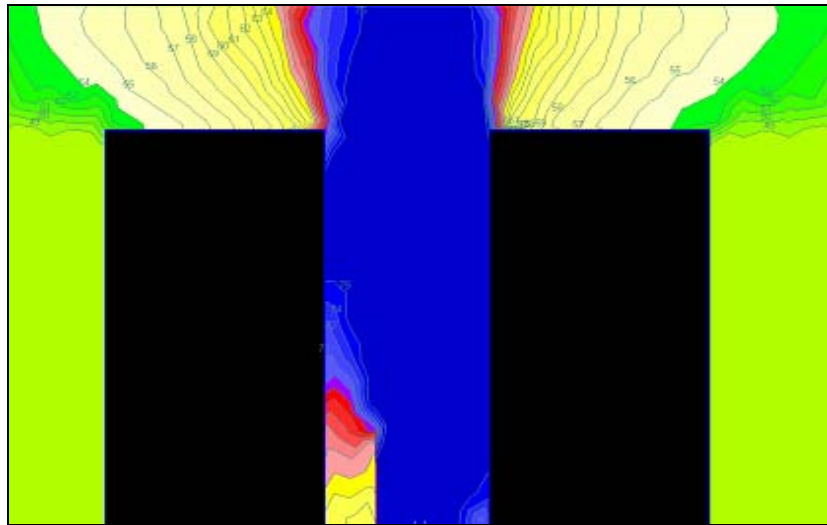
> 75
74 .. 75
73 .. 74
72 .. 73
71 .. 72
70 .. 71
69 .. 70
68 .. 69
67 .. 68
66 .. 67
65 .. 66
64 .. 65
63 .. 64
62 .. 63
61 .. 62
60 .. 61
59 .. 60
58 .. 59
57 .. 58
56 .. 57
55 .. 56
54 .. 55
53 .. 54
52 .. 53
51 .. 52
50 .. 51
49 .. 50
< 49

i el mapa corresponent a la part central de la zona és:

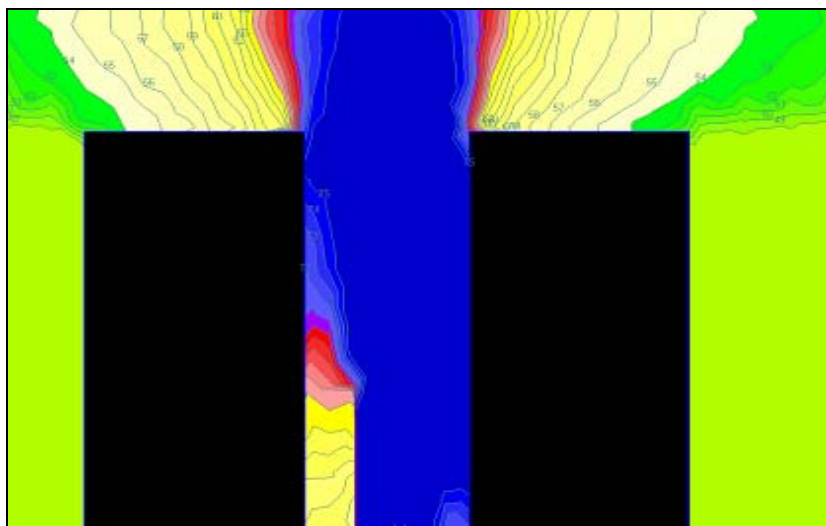


Apèndix Z

Amb el programa de simulació MITRHA s'ha fet un estudi de l'efecte d'apantallament que tindrien sobre edificis de 20 m d'altura, unes barreres acústiques de 4 i 6 m d'alçada respectivament. Els nivells de soroll es corresponen amb l'escala de colors de l'apèndix Y anterior i serien els propis d'un flux continu equivalent a 140 vehicles en 10 minuts. S'aprecia que, malgrat el cost monetari i l'impacte visual, només són efectives en els pisos dels nivells més baixos, fins on arriba l'alçada de la pantalla aproximadament.



Barrera de 4 m d'alçada.



Barrera de 6 m d'alçada.

Apèndix AA

La funció a diferenciar és:

$$S_{so} = 10 \text{Log} \left[10^{\frac{(74 \cdot 7 + 10 \log(N_{LL}/600))}{10}} + 10^{\frac{(89 \cdot 8 + 10 \log(N_P/600))}{10}} + 10^{\frac{(82 \cdot 1 + 10 \log(N_M/600))}{10}} \right] + C_0 \cdot C_{LL}^{N_{LL}} \cdot C_M^{N_M} \cdot C_P^{N_P}$$

i essent l'expressió de la diferencial total donada per:

$$\Delta S_{so} = \frac{\partial S_{so}}{\partial N_{LL}} \Delta N_{LL} + \frac{\partial S_{so}}{\partial N_P} \Delta N_P + \frac{\partial S_{so}}{\partial N_M} \Delta N_M$$

el càlcul de les respectives derivades parcials és:

$$\frac{\partial S_{so}}{\partial N_{LL}} = \frac{10^{\left[\frac{10(\log(N_{LL}) - 2 \log 5 - \log 3 - 3 \log 2) + 757}{10} \right]}}{\Theta} + C_0 C_{LL}^{N_{LL}} C_M^{N_M} C_P^{N_P} \cdot \ln(C_{LL}) = -0'12$$

$$\frac{\partial S_{so}}{\partial N_M} = \frac{10^{\left[\frac{10(\log(N_M) - 2 \log 5 - \log 3 - 3 \log 2) + 831}{10} \right]}}{\Theta} + C_0 C_{LL}^{N_{LL}} C_M^{N_M} C_P^{N_P} \cdot \ln(C_M) = 1'81$$

$$\frac{\partial S_{so}}{\partial N_P} = \frac{10^{\left[\frac{10(\log(N_P) - 2 \log 5 - \log 3 - 3 \log 2) + 454}{10} \right]}}{\Theta} + C_0 C_{LL}^{N_{LL}} C_M^{N_M} C_P^{N_P} \cdot \ln(C_P) = O(10^{-48}) \approx 0$$

on el símbol en el denominador de les fraccions s'identifica amb l'expressió:

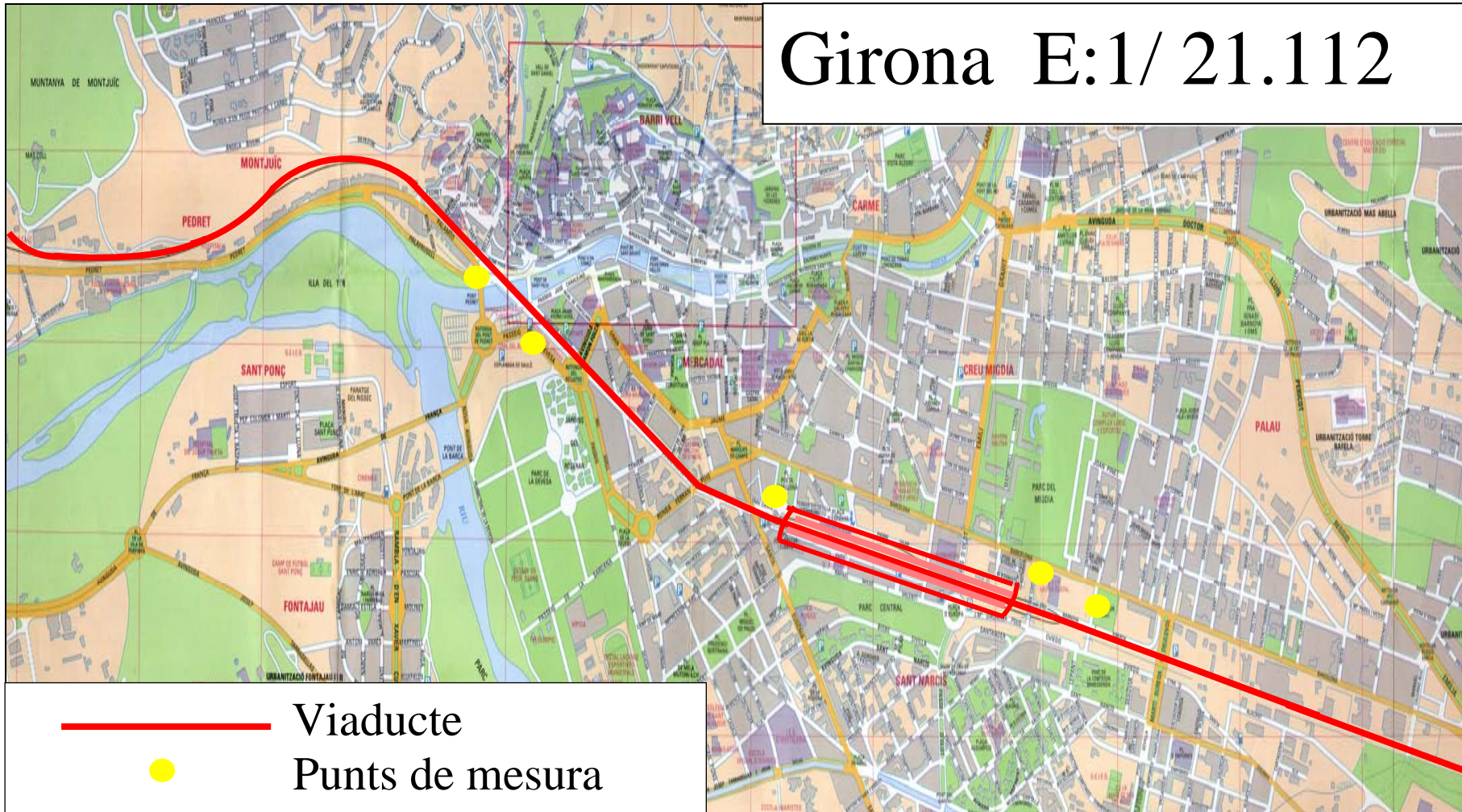
$$\Theta \equiv \ln 10 \left[\frac{10^{\left[\frac{10(\log(N_{LL}) - 2 \log 5 - \log 3 - 3 \log 2) + 747}{10} \right]}}{10} + \frac{10^{\left[\frac{10(\log(N_M) - 2 \log 5 - \log 3 - 3 \log 2) + 821}{10} \right]}}{10} + \frac{10^{\left[\frac{10(\log(N_P) - 2 \log 5 - \log 3 - 3 \log 2) + 449}{10} \right]}}{10} \right] = 2'97 \cdot 10^{65}$$

Per calcular aquestes expressions s'han considerat els valors mitjans dels coeficients C_i i del nombre de vehicles. Aquestes dades es mostren en la taula:

Coeficients	C_0	C_P	C_{LL}	C_M
	13,6559732	1	0,99722446	1,045986
Nombre de vehicles		V.Pesats	V.LLeugers	Motos
		1	38	11

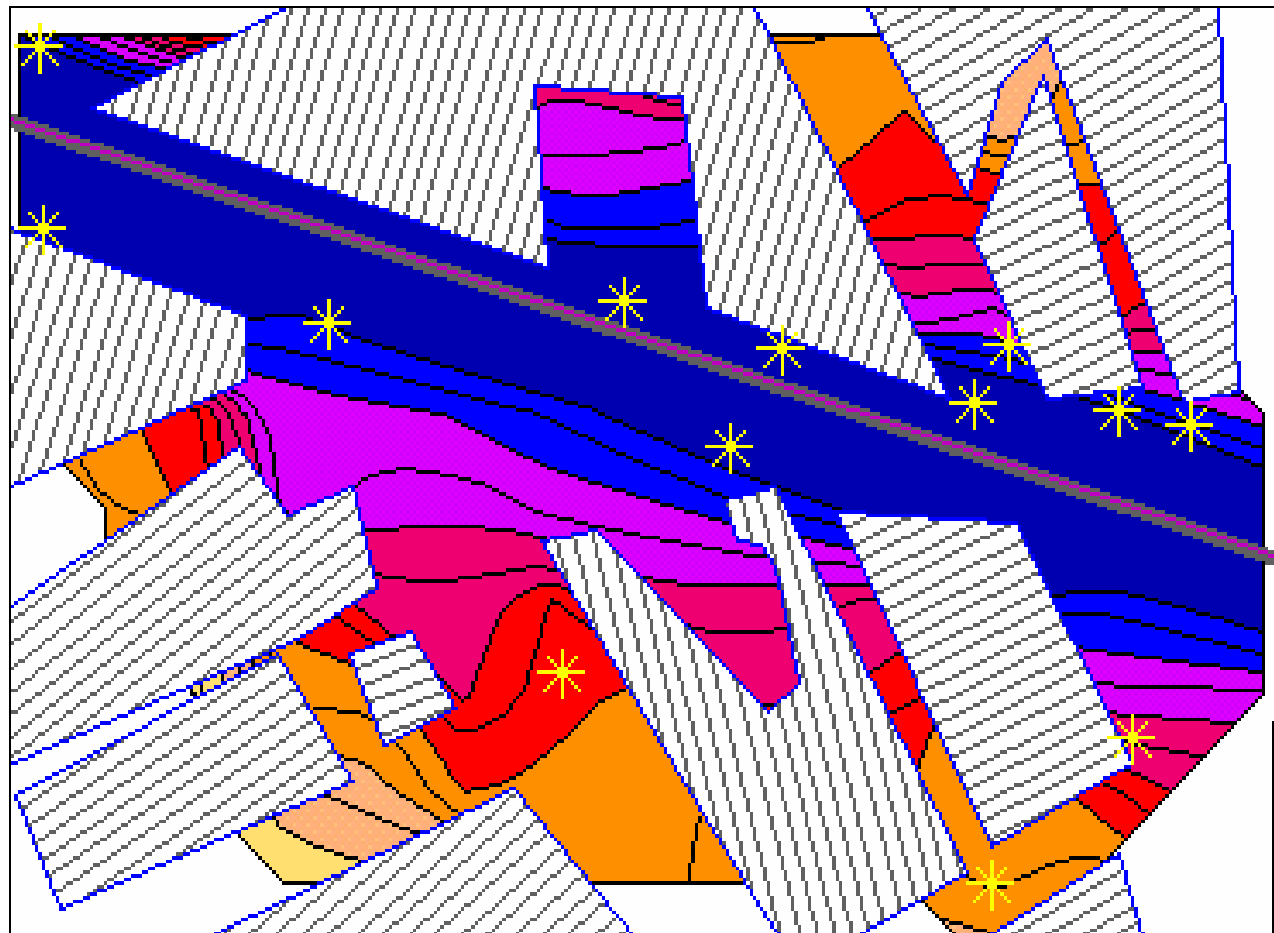
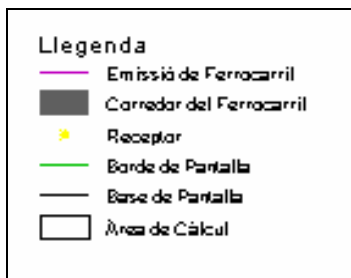
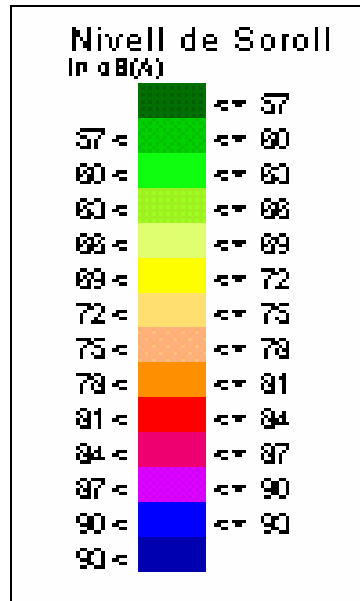
Apèndix AB

Girona E:1/ 21.112



Apèndix AC

ANÀLISI SoundPLAN: sense barreres



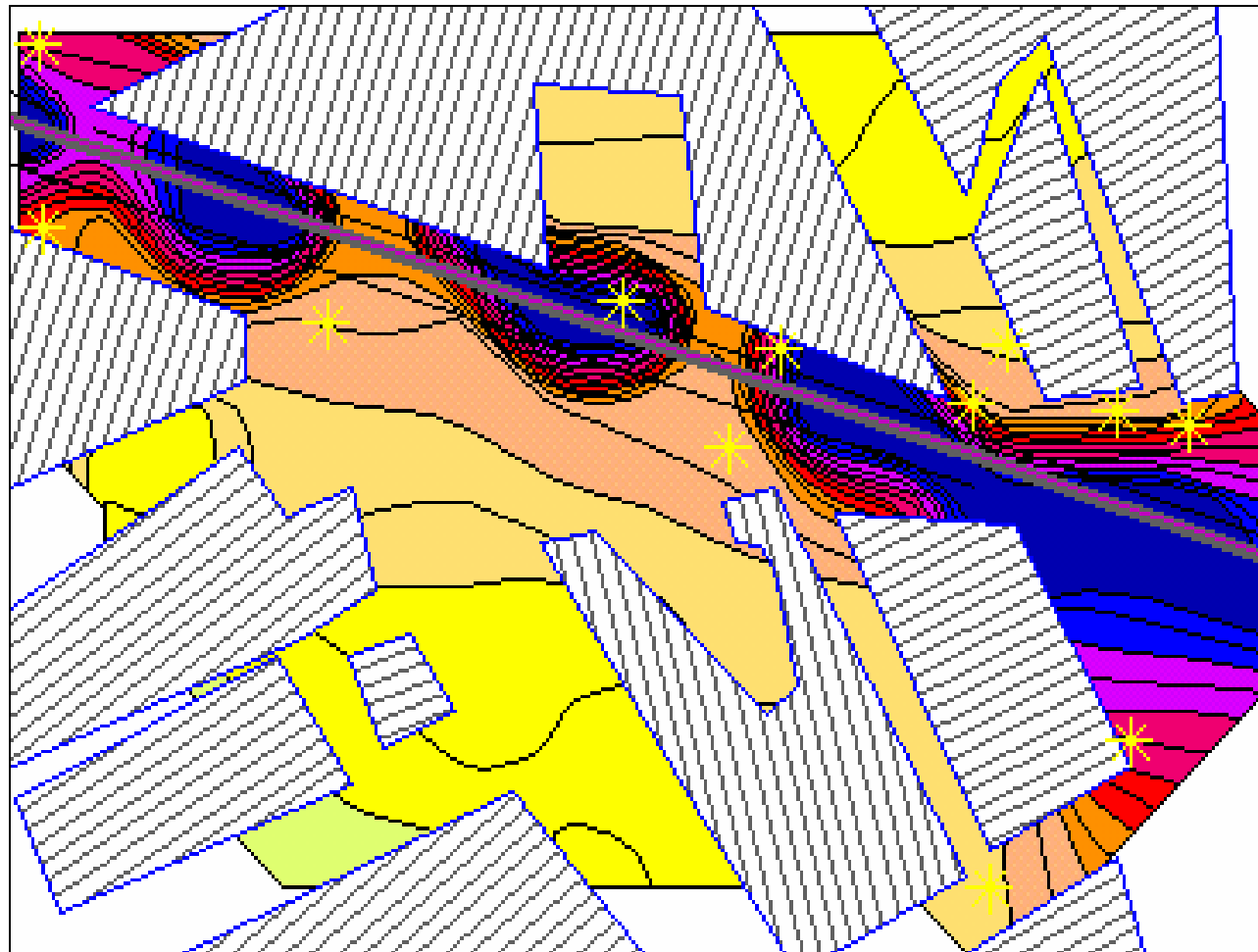
ANÀLISI SoundPLAN: amb barreres

Nivell de Soroll
in dB(A)



Llegenda

- Emissió de Ferrocarril
- Corredor del Ferrocarril
- Receptor
- Borde de Pantalla
- Base de Pantalla
- Àrea de Càlcul



Apèndix AD

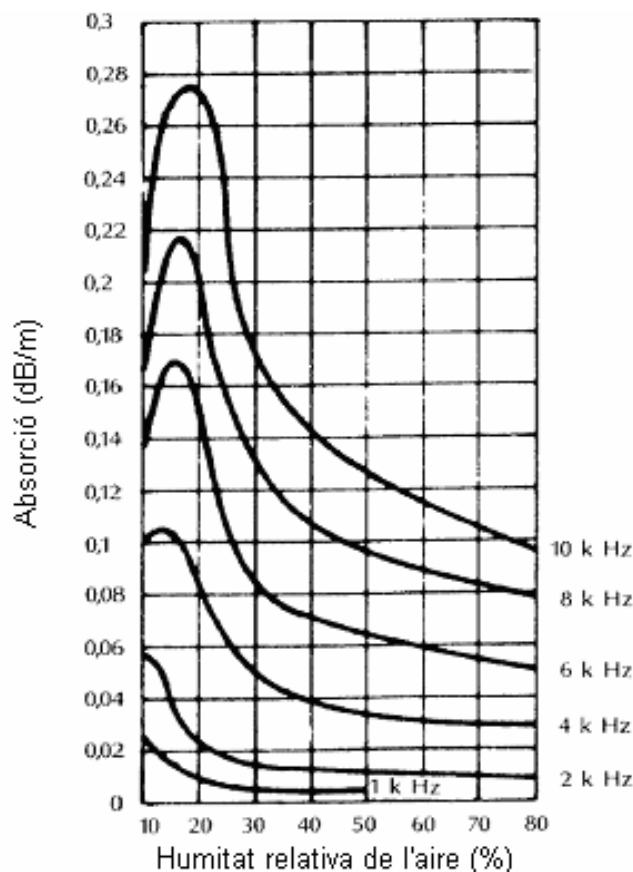
Dades meteorològiques enregistrades a Girona el dia 13 d'agost del 2003, durant la franja diürna (07-22 h.) en intervals de mitja hora. Es correspon amb un dels dies de l'any on la variabilitat de la temperatura al llarg de la mateixa jornada és màxima, oscil·lant entre un valor màxim de 41°C i un mínim de 27°C dins aquesta franja de temps. En la taula es mostren aquestes dades i d'altres variables. Les fonts consultades han estat el servei meteorològic de la UDG i la Generalitat de Catalunya.

Franja horària	Temperatura (°C)	Direcció del vent (graus)	Velocitat del vent (m/s)	Humitat relativa (%)	Pressió (hPa)	Precipitació (mm)
07:00 - 07:30	27.6	196	1.3	34	1009	0.0
07:30 - 08:00	28.7	190	1.2	32	1009	0.0
08:00 - 08:30	29.8	167	1.5	30	1009	0.0
08:30 - 09:00	31.7	177	0.7	27	1009	0.0
09:00 - 09:30	33.6	173	0.2	25	1009	0.0
09:30 - 10:00	35.9	188	0.7	21	1009	0.0
10:00 - 10:30	38.2	192	1.5	15	1009	0.0
10:30 - 11:00	40.0	203	1.9	11	1009	0.0
11:00 - 11:30	40.4	193	2.4	12	1009	0.0
11:30 - 12:00	40.5	169	3.6	13	1009	0.0
12:00 - 12:30	40.6	173	4.0	12	1009	0.0
12:30 - 13:00	40.6	184	3.9	11	1009	0.0
13:00 - 13:30	40.1	184	4.3	11	1009	0.0
13:30 - 14:00	40.9	190	4.4	10	1009	0.0
14:00 - 14:30	39.8	183	5.0	10	1008	0.0
14:30 - 15:00	39.6	189	4.5	9	1008	0.0
15:00 - 15:30	39.4	193	4.2	11	1008	0.0

15:30 - 16:00	38.1	189	4.6	12	1008	0.0
16:00 - 16:30	37.2	179	4.6	15	1008	0.0
16:30 - 17:00	36.4	181	3.9	19	1008	0.0
17:00 - 17:30	35.3	173	3.7	22	1007	0.0
17:30 - 18:00	34.2	161	2.5	23	1007	0.0
18:00 - 18:30	33.1	155	2.0	25	1007	0.0
18:30 - 19:00	32.0	151	1.9	26	1007	0.0
19:00 - 19:30	31.3	156	2.1	26	1007	0.0
19:30 - 20:00	30.6	184	1.6	27	1007	0.0
20:00 - 20:30	29.0	229	0.2	31	1008	0.0
20:30 - 21:00	28.3	191	0.1	32	1007	0.0
21:00 - 21:30	28.2	181	0.5	32	1007	0.0
21:30 - 22:00	27.5	193	0.5	34	1007	0.0

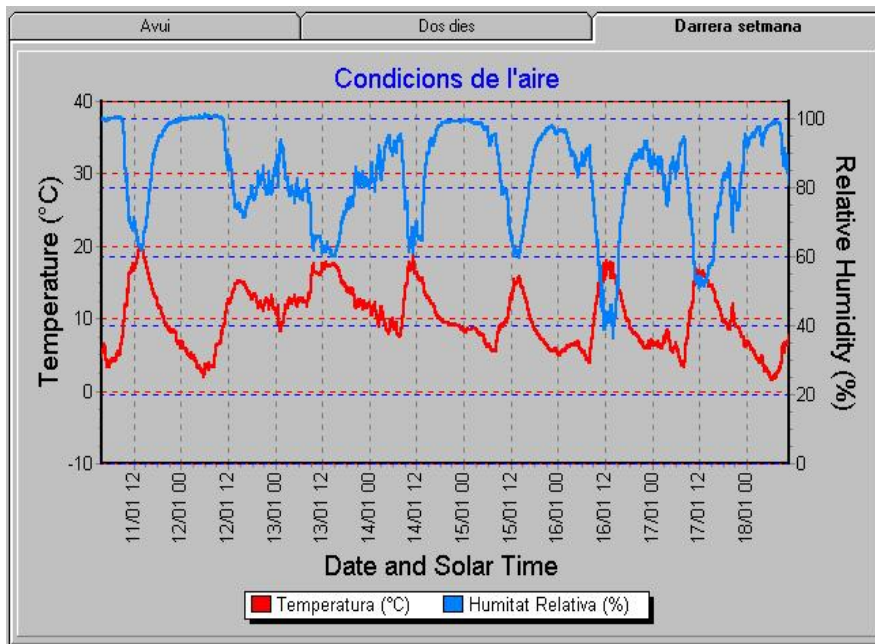
Apèndix AE

En la gràfica s'observen els nivells d'esmoreïment (decibels) que experimenten les ones sonores de diferent freqüència i en diferents condicions d'humitat relativa quan es propaguen 1 m per l'espai. El màxim d'esmoreïment s'obté quan l'aire és molt sec.



Error associat a les variacions de la humitat relativa

L'error associat a aquesta variable pot estimar-se a partir de la màxima variabilitat que experimenta la humitat relativa al llarg d'un any. En la taula de l'apèndix AD, pot veure's els valors enregistrats a Girona en un dia típic d'estiu, concretament el 13 d'agost del 2003, són força baixos pel que fa a la humitat relativa; el 9% a les 13.00 hores, mentre que en un dia d'hivern o de tardor aquesta variable pot sobrepassar fàcilment la cota del 80%. En la gràfica de la pàgina següent es recull la variació de la humitat relativa a Girona durant la setmana de l'11 al 18 de gener del 2004.



Aquestes dades han estat consultades a la *web* del grup de física ambiental de la UDG.

D'altra banda en els histogrames de l'apèndix X s'aprecia com les freqüències en banda d'octava predominants en el soroll del trànsit estan per sota els 2 KHz, per la qual cosa si en la gràfica de la pàgina anterior ens fixem en la corba d'aquesta freqüència i considerem que les ones sonores amb una potència prou rellevant, arriben al sonòmetre quan la font sonora es troba a menys de 20 m de distància de l'aparell de mesura, resulta que la incertesa associada a la variació de la humitat relativa (10% i 80% en els casos extrems) és de

$$\Delta H_R = (0'03 - 0'005) \cdot 20 = 0'5 \text{ dB}$$

valor insignificant per qualsevol efecte pràctic de mesura. Pel que fa al ferrocarril quan passa pel viaducte, la variació de l'absorció a una distància major de, per exemple, 30 m seria de

$$\Delta H_R = (0'03 - 0'005) \cdot 10 = 0'75 \text{ dB}$$

que tot i ser significativament major, tampoc es rellevant.

Bibliografia

- Alzina T. “Ruido ambiental, producido por tráfico viario. Análisis tipológico” Universitat de Girona.
- Arnau J. “Impacte ambiental del ruido. Aplicacions” DMA-Delegació territorial.
- Arnau J. Blanco JC. Ruiz J. Deltell A. “Taller internacional de estudios urbanos. Estudio del ruido ambiental en la ciudad de Girona” Universidad de la Habana.
- Arnau J. Deltell A. “Ruido ambiental, modelización y predicción” Forum Auma 2000.
- Arnau J. Deltell A. “Simulación del ruido producido por diferentes tipos de fuentes” Acetir 2002.
- Arnau J. Deltell A. Blanco JC. Ruiz J. “El catastro sónico como herramienta de planificación del territorio” DMA-2002.
- Arnau J. Deltell A. Castro A. “Noise Study of railroad traffic in the city of Girona” Internoise-2000.
- Arnau J. Deltell A. Frigola L. “Contaminación acústica de las actividades de ocio” Universidad de verano Ramon Llull 2002.
- Ayats J. “Ruido de componentes de motores térmicos” Universitat de Girona.
- Deltell A. “Contribución a la caracterización del ruido procedente del tránsito. Un nuevo enfoque” Programa de doctorado TMA. Universitat de Girona.
- Frigola L. “Estudio integral de la contaminación acústica producida por tráfico viario, aéreo, portuario y lúdico. Aplicación a una zona turística (TD)” Programa de doctorado TMA. Universitat de Girona.
- Xuclà J. “Estudio de ruido ambiental en una zona urbana de Olot” UPC.
- A. Alexandre, C. Lamure, F.J. Langdon “Road Traffic Noise” Editorial: John Wiley & Sons.
- Alexandre, A. “Road traffic noise” Applied Science, London 1975
- Amando Garcia “La contaminación acústica” Editorial Universitat de València.
- Barti R. “Modelització del grau de molèstia del soroll d’automoció” Enginyeria La Salle.

- Blanco J. “Estudio y evaluación del ruido de tráfico urbano en diferentes áreas caracterizadas por el tipo de actividad y situación geográfica” Programa de doctorado. Universitat de Girona.
- Carlos Rosado Rodríguez “Acústica” Editorial Trillas.
- César Pérez “Estadística aplicada a través d’Excel” Editorial Prentice Hall.
- Crocker, M.J. “Encyclopedia of acoustics” John Wiley & Sons, N.Y. 1997
- De la Colina Tejeda, C., Moreno Arranz A. “Acústica de la edificación” Fundación Escuela de la Edificación.
- Fahy, F.j. “Sound Intensity” Elsevier Applied Science, London 1989.
- Flores Pereita, Pedro “Manual de acústica, ruido y vibraciones: fundamentos básicos y sistemas de control” GYC Barcelona 1989.
- Foch, A. “Acoustique” Librairie Armand Colin, Paris 1994.
- Ford R.D. (Department of Applied Acoustics, University of Salford UK) “Transportation Noise Reference Book” Editorial: Butterworth & Co. (Publishers).
- Ford, R.D. “Introduction to acoustics” Elsevier Amsterdam, 1970.
- Hassal, J., Zaveri, K., “Acoustic Noise Measurements” B&K DK2850 (1988)
- Hussain, M., Goelles, J., “Statistical Evaluation of an Annoyance Index for Engine Noise Recordings” Proceedings SAE Noise & Vibration Conference. (1991)
- Institute of transportation engineers “Transportation Planning Handbook” Editorial Prentice Hall.
- Internoise 2.000. Edition: Didier Cassereau. Ministère de l’aménagement du territoire et de l’environnement.
- Investigación y Ciencia (edició espanyola de Scientific American) Desembre 2002.
- J.Pérez Mariña “Compendio Práctico de acústica” Editorial Labor S.A.
- Joseph F. Hair, Rolph E. Anderson, Ronald L. Tatham, William C. Black “Anàlisis multivariante”.. Editorial Prentice Hall.
- Journal of sound and vibration (març 2001, desembre 2001, octubre 2002)
- Karmasin, H., “Sound. An essential component of the branding process, from the viewpoint of motivation research” AVL- Sound Engineering Conference (1999)

- Kinsler, Lawrence E. "Fundamentals of acoustics" John Wiley & Sons, New York, 1982
- Knudsen, Vern Oliver "Architectural acoustics" John Wiley & Sons, London, 1932
- McAdams, S., Susini, S., Misdariis, P., Winsberg, S. "Multidimensional characterisation of perceptual and preference judgements and instantaneous loudness"
- Paul A. Tipler "Física" Editorial Reverté S.A.
- Pedro Flores Pereira "Manual de acústica ruidos y vibraciones" Ediciones GYC.
- Piskunov "Cálculo Diferencial i Integral" Editorial Mir
- Querol i Noguera, J.M. "Manual de mesurament i avaluació del soroll" Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient.
- Recuero López, M. "Ingenieria acústica" Editorial Paraninfo.
- Riera X. "Caracterización acústica de trenes" Programa de doctorado. Universitat de Girona.
- Sears, Francis Weston "Mecánica, calor y sonido" Aguilar, Madrid, 1964.
- Seto, W. "Acústica" Editorial McGraw-Hill.
- Shaw, E.A.G., "Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane", J.A.S.A. (1974)
- Susini, P., McAdams, S., Winsberg, S., "A multidimensional technique for sound quality assessment" Acústica (1999)
- Vijay Gupta "Regression explained in simple terms" A Vijay Gupta Publication.
- Zemansky, M. "Calor y termodinámica" Editorial McGraw-Hill

Pàgines web visitades

<http://www.derive-europe.com/>

<http://www.lri.fr/~durr/MaxFlow/>

<http://www.TheorieGraphes/Algorithme/Ford-Fulkerson.htm>

<http://www.eli.sdsu.edu/courses/fall96/cs660/notes/NetworkFlow/NetworkFlow.html>

<http://mdsp.bu.edu/Courses/SC330/Demos/maxflow.html>

<http://riot.ieor.berkeley.edu/riot/Applications/graal-flow/graal.html>

<http://math.uc.edu/~halpern/Linear.progr.folder/Handouts.lp.02/Maximal.flow.ford.fulkerson.pdf>

<http://www.utexas.edu/cc/docs/math01.html>

<http://www.statslab.cam.ac.uk/~rrw1/mor/s.pdf>

<http://www.maths.abdn.ac.uk/~igc/tch/index/mx3503/notes/node20.html>

http://www.renfe.es/empresa/cercanias/ficha_serie447.html

<http://www.acousticbarrierconstructions.com/>

<http://www.nonoise.org/library/highway/policy.htm>

http://www.trl.co.uk/static/environment/noise_watts.pdf

http://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Sound_Propagation.html

<http://ergo.human.cornell.edu/studentdownloads/DEA350notes/Acoustics/Acoustics4.html>

<http://www.classroomacoustics.com/treatments.html>

<http://www.videoautomation.com/southsound.html>

<http://www.physicsclassroom.com/Class/sound/soundtoc.html>

<http://www.nonoise.org/library/highway/traffic/traffic.htm>

<http://copernic.udg.es/gfa/estacio.php>

http://www.meteocat.com/marcs/marcos_historia/marcs_dades.htm

Software utilitzat

- Paquet de MICROSOFT OFFICE 2000 (Word, Excel, Power Point i Access).
- Eines gràfiques: POWER POINT, PAINT i AUTOCAD 2000.
- Eines matemàtiques: EXCEL i DERIVE.
- Eines d'Internet: MICROSOT INTERNET EXPLORE 6.0.
- Eines de simulació acústica: MITHRA.

Agraïments

- *Al Dr. Josep Arnau per la seva direcció i encertats consells.*
- *Al meu amic Joan Carles Blanco per facilitar el banc de dades.*
- *A la meva dona Olga, qui m'ha ajudat a prendre les mesures.*
- *Al meu amic Alex Deltell per la seva bona disposició a col·laborar.*